YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

MÜHENDİSLER İÇİN JEOLOJİ BİLGİLERİ

(GENİŞLETİLMİŞ İKİNCİ BASKI)

Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM *Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN*



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

MÜHENDİSLER İÇİN JEOLOJİ BİLGİLERİ

(GENİŞLETİLMİŞ İKİNCİ BASKI)

Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM

Yıldız Teknik Üniversitesi

İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,

Geoteknik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi

İstanbul - 2013

GENİŞLETİLMİŞ İKİNCİ BASKININ ÖNSÖZÜ:

"Mühendisler için Jeoloji Bilgileri" kitabının 249 sayfadan oluşan birinci baskısı, 2007 yılı Mayıs ayında Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi tarafından 1000 adet olarak basılmış ve tamamı 2007-2009 yılları arasında tükenmiştir. Kitabın birinci basımında yer alan konularda 29 Mart 2011 tarihinde vefât eden rahmetli Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN'ın değerli katkıları olmuştur.

Genişletilmiş ikinci baskı için, kitabın tümü, birinci yazar tarafından dört yıl süren yoğun bir çalışma sonunda tekrar gözden geçirilerek yeniden incelenmiş, revize edilmiş ve yayıma hazır hale getirilmiştir. Bu süreçte, kitapta yer alan bazı konular yeniden ve detaylandırılarak yazılmış, ayrıca örnek uygulama ve yorumlarla mühendislik konularını da içeren güncel yeni bölüm ve konular eklenmiştir.

"Mühendisler için Jeoloji Bilgileri" kitabının genişletilmiş bu ikinci baskısı; başta çok sevdiğim sevgili öğrencilerim olmak üzere, inşaat, harita, çevre, jeoloji, jeofizik, mimarlık ve şehir bölge planlama dallarında uzmanlaşmış mühendisler ve akademisyenler yanında, bu konulara ilgi duyan halkımızın da yararlanması amacıyla hazırlanmıştır.

Kitabın genişletilmiş ikinci baskısına değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, Dr. Murat TONAROĞLU'na, Dr. Cem AKGÜNER'e, Dr. Murat Ergenekon SELÇUK'a, Geoteknik Mühendisi Serpen DEMİR ile İnşaat Yüksek Mühendisi S. Şehnaz AKTAŞ, İnşaat Mühendisi Selvinaz DADALOĞLU, İnşaat Mühendisi Lale ÖNER ve bu zaman sürecinde bana desteğini eksik etmeyen aileme ve bu kitabın baskı işlerini titizlikle yürüten Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi elemanlarına en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Sevgili öğrencilerime,

Mart 2013

Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM

YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bl. Geoteknik Anabilim Dalı, Davutpaşa Kampüsü, İstanbul.

BİRİNCİ BASKININ ÖNSÖZÜ:

Günümüzde teknolojik ilerlemeye bağlı olarak bilimdeki gelişmeler, diğer bilim dallarında olduğu gibi, yerbilimleri öğretisindeki kavramların da yeniden gözden geçirilmesine neden olmuştur. Bilimin tarihsel evrimi içerisinde ilk çağlarda doğayı anlamaya çalışan coğrafyacıların inceleme konularından biri olarak ele alınan yerbilimleri, tarihsel dönem içerisinde uzmanlık alanlarının gelişmesine paralel olarak coğrafyadan ayrılarak jeoloji, jeofizik, jeomorfoloji, jeokimya, paleontoloji, uygulamalı jeoloji ve benzeri uzmanlık dallarında ihtisaslaşmıştır. Ancak 20. yüzyılın son çeyreğinde, doğa olaylarının anlaşılmasında olaylara uzmanlık dallarının sadece kendi bakış açıları çerçevesinde bakmalarının, bütünün anlaşılmasında yetersiz kalacağının ortaya çıkması sonucu, doğa olaylarını bir bütün olarak değerlendirme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu gerçeğin anlaşılmasının ardından ise, ilk aşamada yerbilimlerindeki ihtisas kurumları, çıkış noktalarındaki bütünlüğüne doğru yeniden hareket ederek çalışmalarını birleştirmeye ve çok disiplinli yaklaşımlara yönelmeye başlamışlardır. Bunu izleyen dönemde, ozon tabakasındaki değişim, küresel ısınma ve buna bağlı olarak değişen çevre koşulları, probleme yönelik olarak atmosfer ve okyanus bilimlerinin araştırma konularının yerbilimleri araştırmaları ile birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmış ve coğrafya'dan ayrılarak evrimlerini bir süre yalnız sürdüren bu bilim dalları, günümüzde "Yer Sistem Bilimleri" adı altında yeniden birleşmeye başlamışlardır. Bu bakış açısı altında Yer Sistem Bilimleri, doğayı incelerken ayrıca, yeryüzünün evrimi içerisinde özellikle günümüzde etkileri hızla artan insansı tahribatın boyutlarını ve sürdürülebilir bir kalkınma içerisinde insan faktörünün doğal dinamiğe nasıl entegre edilebileceğinin araştırılmasını da hedefler. Bu bakımdan, Doğaya zarar vermeden yapılacak kalkınmayı gerçekleştirecek olan uygulayıcıların, yani mühendislerin, doğayı iyi bilmeleri ve uygulamalarında doğal dinamiği, önemli kriterlerden biri olarak göz önünde bulundurmaları gerekir. Bu nedenden dolayı, başta İnşaat Mühendisliği olmak üzere, doğa ile ilgili Mühendislik/Mimarlık dalları olan Çevre, Jeodezi-Fotogrametri ve Orman Mühendislikleri ile Mimarlık ve Şehir Plancılığı'nın mesleki eğitimlerinin ilgili uzmanlık dallarında "Mühendislik Jeolojisi" dersi, bu branşların temel derslerinden biri konumundadır. Bununla birlikte doğayı incelemeyi hedefleyen dallardaki bu hızlı evrimleşmeye karşın, ülkemizde bu hızlı gelişimi karşılayabilecek oranda, eğitim amaçlı ve/veya üniversite mezunlarının başvuru kaynağı olabilecek güncel Türkçe kaynaklar maalesef sınırlıdır. Var olan çok değerli kaynakların önemli bir bölümü ise, eski ve belki günümüzde basımı olmayan veya ilk hâli ile yeniden basıldığından dolayı temelde son derece önemli bilgiler içeriyor olsalar da güncelliklerini giderek kaybetmekte olan kaynaklardır. Bu nedenle, yerbilimlerindeki güncel kaynak sayısının, ülkemizdeki yetersizliği göze çarpmaktadır. Ülkemizde var olan eserlerin

önemli bir bölümü, kendi dallarındaki eğitimi desteklemeye yönelik olduklarından dolayı, bu eserler ayrıca disiplinler arası yaklaşımlar gerektiren dallardaki kullanımlarında da yetersiz kalmaktadırlar. Örneğin, inşaat mühendisliğindeki jeoloji uygulamaları hakkında yazılmış pek çok ve değerli "Mühendislik Jeolojisi" kitapları bulunmakla birlikte, bu yayınlar daha çok jeoloji mühendislerine inşaat uygulamalarını öğretmeye yöneliktir. Bu nedenle söz konusu eserler, okuyucularının temel yerbilimsel bilgi birikimine sahip olduğu öngörüsünden yola çıkılarak bu bilginin mühendislik uygulamalarında ne şekilde kullanılabileceğini öğretmeyi hedef edinilerek hazırlanmıştır. Ancak yukarıda değinilen diğer mühendislik dallarındaki yerbilimsel bilgi ihtiyacını karşılayabilecek nitelikte olan ve bunların sözü edilen alanlardaki çalışmalarına yönelik çıkarımlarını öğretebilecek yayınların sayısı ise yok denecek kadar azdır.

Bu nedenle söz konusu bölümlerde okutulan "Mühendislik Jeolojisi" derslerindeki konuların tamamını kapsayabilecek nitelikte kaynak bulmak oldukça zordur. Bu durumun bir sonucu olarak, diğer mühendislik dallarındaki öğrenci ve mühendisler ihtiyaç duydukları yerbilimsel bilgiye, bu amaca uygun düzenlenmemiş olan yerbilimleri ile ilgili farklı kaynaklardan ilgili bölümleri seçerek ulaşmaya çalışmaktadırlar. Öğrencilerin elindeki ikinci ve daha çok başvurulan kaynak ise derslerde tutulan ve muhtemelen yetersiz (bazen hatalı) notlar olmaktadır. Bu ikinci kaynak maalesef, kişilerin ilerki mühendislik yaşamında da kullanmak zorunda kalacağı en önemli başvuru kaynağı niteliğinde olmaktadır.

Bu kitabın yazılmasındaki temel nedeni, kitabın yazarlarının Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde vermekte oldukları "Mühendislik Jeolojisi" dersinde, yerbilimlerinin İnşaat Mühendisliği için gerekli olan konularına uygun kaynakları öğrencilerine yeterince temin edememe sorunu oluşturmaktadır. Mühendislik uygulamalarıyla ilgili yerbilimsel konuların, pek çok farklı kaynaktan yararlanarak anlatıldığı bu derslerde, buna uygun bir yayının bulunamamış olması nedeniyle bu kitabın hazırlanmasına karar verilmiştir. Kitapta ayrıca, yerbilimlerinin farklı dallarıyla ilgili konular, bir bütünlük içerisinde ele alınmış olduğundan, yazarlar önemi giderek artmakta olan Yer Sistem Bilimleri'ne ilgi duyan yerbilimciler açısından da kitabın yararlı bir kaynak olacağı inancındadırlar. Kitabın 8. Bölümü içinde yer alan "Sıvılaşma" konusunun oluşturulmasında, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında, Dr. Murat TONAROĞLU (Tonaroğlu, 2006) tarafından hazırlanmış olan "Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi" adlı doktora tezinden yararlanılmıştır.

Yazarlar, bu esere olan değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, Prof. Dr. Okay EROSKAY'a, Doç. Dr. Timur USTAÖMER'e, Prof. Dr. Oğuz SELVİ'ye, Arş. Gör. Dr. Murat TONAROĞLU'na, Y.Doç.Dr. Zafer KÜTÜĞ'e, Arş. Gör. Tolga GÖRÜM'e ve Arş. Gör. Murat Ergenekon SELÇUK'a en içten teşekkürü bir borç bilirler (29.03.2007).

İ Ç İ N D E K İ L E R

		SAYFA
	GENİŞLETİLMİŞ İKİNCİ BASKININ ÖNSÖZÜ ……..	I
	BİRİNCİ BASKININ ÖNSÖZÜ ……..	II
	1. B Ö L Ü M : GİRİŞ	1
1.1	Kitabın Amacı ……..	1
1.2	Jeolojinin Tanımı ……..	1
1.3	Dünyanın Oluşumu, Yapısı ve Kitabın Diğer Bölümlerinin Konuları ..……..	4
	2. B Ö L Ü M: DÜNYANIN (YERKÜRE) İÇ YAPISI, LEVHA TEKTONİĞİ, YER KABUĞUNU OLUŞTURAN MADDELER ve MİNERALLER	8
2.1	Giriş ……..	8
2.2	Dünyanın (Yerküre) İç Yapısı ……..	9
2.3	LEVHA TEKTONİĞİ (1) Konveksiyon Akımları ve Levha Kavramları ……..	15
2.4	LEVHA TEKTONİĞİ (2) Levha Hareketleri, Sınırları, Kıta ve Okyanus Oluşumları …...	18
2.5	Aktif Volkanizma ve Volkanik Dağ Kuşakları ……..	31
2.6	YER KABUĞUNU OLUŞTURAN MADDELER ve MİNERALLER ……..	34
2.6.1	Minerallerin özellikleri ……..	37
2.6.2	Minerallerin mühendislikteki önemi ve kullanıldıkları alanlar ……..	39
2	Bölümün Özeti ……..	44
	3. B Ö L Ü M: KAYAÇLAR ve AYRIŞMA	47
3.1	Giriş ……..	47
3.2	Mağmatik Kayaçlar ……..	48
3.2.1	Derinlik kayaçları ……..	51
3.2.2	Damar kayaçları (yarı derinlik kayaçları) ……..	51
3.2.3	Yüzey kayaçları (volkanik kayaçlar) ……..	54
3.2.4	Mağmatik kayaçların yapı ve dokuları ……..	63
3.3	Metamorfik (Başkalaşım) Kayaçlar ……..	65
3.3.1	Metamorfik kayaçların yapı ve dokuları ……..	68
3.4	Sedimenter Kayaçlar ……..	73
3.4.1	Kırıntılı sedimenter kayaçlar ……..	74
3.4.1.1	Kırıntılı (çimentosuz-tutturulmamış) sedimenter kayaçların fiziksel özellikleri ……..	77
3.4.2	Organik sedimenter kayaçlar ……..	80
3.4.3	Kimyasal sedimenter kayaçlar ……..	83
3.5	KAYAÇLARDA AYRIŞMA (Bozunma) ……..	96
3.6	Sedimentlerin Taşınması ve Sedimenter Ortamlar ……..	117
3.7	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR ……..	118
3.7.1	Yavuz Sultan Selim Câmii Galerisi Örneği ……..	118
3.7.2	Rüzgâr Türbinleri Sahasında Gözlenen Ayrışmaya Örnek Uygulama ……..	120
3	Bölümün Özeti ……..	126
	4. B Ö L Ü M: TABAKALI KAYAÇLARIN ÖZELLİKLERİ, STRATİGRAFİ, FAYLAR, TOPOĞRAFİK-JEOLOJİK HARİTA ve KESİTLER	130
4.1	Giriş ……..	130
4.2	Tabakalanma ……..	130
4.2.1	Tabakalı kayaçlarda deformasyon izleri, tabaka doğrultu ve eğimi ……..	141
4.3	Kıvrımlar ……..	143
4.4	STRATİGRAFİ ……..	148
4.4.1	Kaya stratigrafi birimleri ……..	148

		SAYFA
4.4.2	Zaman kaya stratigrafi birimleri	150
4.4.3	Jeolojik zaman birimleri	151
4.4.4	Biyostratigrafik birimler	152
4.5	Yarık, Çatlak ve Fissürler	154
4.6	Faylar	155
4.6.1	Normal fay, ters fay ve bindirmeler	156
4.6.2	Doğrultu atımlı faylar	160
4.7	TOPOĞRAFİK-JEOLOJİK HARİTALAR VE KESİTLER	162
4.8	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR	168
4.8.1	Topoğrafik Harita Örneği	168
4.8.2	Jeoloji Haritası ve Kesiti	169
4.8.3	Bir Jeolojik Zemin Kesitinde Stratigrafik Dizilimin Değerlendirilmesi	169
4.8.4	MAKALE: İstanbul'un Jeolojisi, Güncellenmiş Jeoloji Haritası, Stratigrafisi ve Tersiyer Çökellerinin Tipik Geoteknik Parametreleri	171
4.9	Mühendislik Çalışma ve Uygulamalarına Yönelik Sıkça Karşılaşılan Bazı Kavramlar, Terimler ve Deyimler	177
4	Bölümün Özeti	181
	5. B Ö L Ü M: YÜZEYSEL AKIŞ	183
5.1	Giriş	183
5.2	Akarsu Akış Sistemleri	185
5.3	Akarsuyun Aşındırma-Taşıma Etkisi ve Vâdi Şekillenmeleri	188
5.4	Vâdi Şekilleri	189
5.5	Drenaj Tanımı ve Akarsu Drenaj Sistemleri	194
5.6	Tektonik Faktörlerin Akarsu Vâdisi Gelişimi Üzerindeki Etkileri	199
5.7	Deltalar	204
5.8	Yüzey Sularının Afetler ve Mühendislik Açısından Önemi	206
5	Bölümün Özeti	209
	6. B Ö L Ü M: YERALTI SULARI JEOLOJİSİ (HİDROJEOLOJİ)	213
6.1	Giriş	213
6.2	Akifer Oluşumu ve Yeraltı Sularının Birikmesi için Gerekli Koşullar	215
6.3	Akifer Ortamları ve Akifer Türleri	221
6.4	Karst, Karstlaşma ve Yeraltı Suları	225
6.5	Yeraltı Sularından Yararlanılması	235
6.6	Yeraltı Sularının Kirlenmesi	237
6.7	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR	245
6.7.1	Yeraltı Su Tablasının Belirlenmesi	245
6.7.2	"Zemin Etüt Sondajı ve Yorumu"na Örnek Bir Çalışma: Antalya Travertenleri (tufa) ve Mühendislik Özellikleri	246
6.7.3	Çevre Kirlenmesine Bir Örnek: İstanbul Kemerburgaz "Hasdal Vahşi Çöp Döküm Sahası ve Islahı"	251
6	Bölümün Özeti	255
	7. B Ö L Ü M: KIYI ve DENİZ ORTAMLARI	258
7.1	Giriş	258
7.2	Kıyı Alanları	258
7.3	Kıyılarda Yapılaşma	270
7.4	Kıyı Alanları ile İlgili Hukuki Tanımlar	273
7.5	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR	276
7.5.1	YORUM: Dünya Deniz Seviyelerinin Yükselmesi, Kıyı Alanları ve Tarihî Batık Kentler - Arkeoloji İlişkisi	276
7.5.2	Dünya Deniz Seviyelerinin Yükselmesine İstanbul, Marmaray-Yenikapı Metro İstasyonu Örneği	278

		SAYFA
7	Bölümün Özeti ……	283
	8. B Ö L Ü M: AKTİF TEKTONİK, DEPREMLER, SIVILAŞMA, TSUNAMİLER ve TÜRKİYE AKTİF FAYLARI	285
8.1	Giriş ……	285
8.2	Kayaçlardaki Gerilme-Mukavemet İlişkisi ve Deprem Oluşumu ……	288
8.2.1	Büyüklük (magnitüd) ve şiddet kavramları ……	295
8.3	Sismik Dalgalar ……	298
8.4	YEREL ZEMİN KOŞULLARININ YAPI DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ ……	306
8.5	ZEMİNLERDE SIVILAŞMA ……	308
8.5.1	Sıvılaşmayı etkileyen faktörler ……	309
8.5.1.1	Zemin yapısı ……	309
8.5.1.2	Sıvılaşmaya neden olan dış etkenler ……	310
8.5.2	Sıvılaşmanın yol açtığı zemin problemleri ……	311
8.6	Liman Dalgaları (Tsunamiler) ……	314
8.7	Kuzey Anadolu Fayı, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ve Marmara Fayları ……	319
8.8	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR ……	325
8.8.1	YORUM: Türkiye Yeni Aktif (Diri) Fay Haritası, Deprem Bölgeleri ve Aktif Fay–Dalma/Batma Zonu İlişkisi ……	325
8	Bölümün Özeti ……	336
	9. B Ö L Ü M: KÜTLE HAREKETLERİ	339
9.1	Giriş ……	339
9.2	Kütle Hareketlerinin Türleri ve Sınıflandırılmaları ……	341
9.2.1	Düşme ……	342
9.2.2	Devrilme ……	343
9.2.3	Akma ……	346
9.2.4	Kayma ……	353
9.2.4.1	Düzlemsel kaymalar ……	353
9.2.4.2	Heyelânlar (eğri yüzeyli kaymalar) ……	356
9.2.5	Çökme ve Oturma ……	360
9.2.5.1	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN OTURMA KAVRAMI ……	361
9.2.6	Karmaşık kütle hareketleri ……	363
9.3	Kütle Hareketlerin Nedenleri ……	363
9.3.1	Doğal nedenler ……	365
9.3.2	Yapay nedenler ……	366
9.4	Kütle Hareketlerinin Önlenmesi ……	368
9.5	Deniz Altı Kütle Hareketleri ……	371
9.6	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR ……	375
9.6.1	Kuzulu Heyelânı/Akması: Doğal nedenlerle oluşan Kütle Hareketlerine bir örnek …..	375
9.6.2	Manisa/Soma Heyelânı: Yapay nedenlerle oluşan Kütle Hareketlerine bir örnek ……	375
9.6.3	İstanbul "Kemerburgaz Düzenli Katı Atık Depolama Sahası"nda (Odayeri Deponi Alanı) oluşan heyelânın önlenmesine yönelik örnek uygulama	377
9.6.4	İstanbul Topkapı Sarayı, İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi Binası ile Sur-i Sultanî Duvarlarında meydana gelen deformasyonların nedenleri ……	384
9.6.4.1	Onarım ve İyileştirme Önerileri……	388
9.6.5	Farklı Oturmaya Örnek ……	390
9.6.6	Heyelânda Ana Kayma Düzleminin Belirlenmesi ……	394
9.6.6.1	Heyelân Modeli –Mekanizması- ……	407
9.6.6.2	Stabilite Analizleri ……	408
9.6.6.3	Alternatif Yol Güzergâhının Belirlenmesi ……	409
9	Bölümün Özeti ……	409

		SAYFA
	10. B Ö L Ü M: KAYAÇLARIN ve SÜREKSİZLİKLERİNİN MÜHENDİSLİKTEKİ ÖNEMİ	413
10.1	Giriş ……...	413
10.2	Kayaçların Jeolojik Özelliklerinin Mühendislikteki Önemi …….	414
10.3	Kayaçların Kimyasal Özelliklerinin Önemi ……..	416
10.4	Kayaçların Fiziksel Özellikleri ……	416
10.5	Kayaçların Mekanik Özellikleri ……...	417
10.6	Kayaç, Kaya, Taş ve Zeminlerin Mühendislik Özellikleri ……...	420
10.7	Zeminin Tanımı, Sınıflandırılması ve Zeminlerde Uygulanan Deneyler ……	425
10.8	Süreksizliklerin Mühendislikteki Önemi ……...	428
10.9	Kaya Şevlerinde Süreksizlikler ve Stabilite Sorunları ……	435
10.9.1	Süreksizliklerin pürüzlülüğü ve dalgalılığı ……...	435
10.10	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR ……...	441
10.10.1	TCR, SCR, RQD ve FF'in Hesaplanması (Uygulama) ……	441
10.10.2	Kohezyonlu Kaya Süreksizliklerinde, Boşluk Suyu Basıncının Var Olup/Olmaması Durumunda Şev Stabilitesinin Hesaplanması (Uygulama) …….....	442
10.10.3	Zemin Etüt Sondajında, Yapay Dolgu ve Altında Ana Zemini (zemin+kaya ardalanmalı istif) Kesen Sondaj Logu Örneği ……	443
10.10.4	Zemin Etüt Sondajında, Bitkisel Toprak ve Alüvyal Zemini Kesen Sondaj Logu Örneği ……...	444
10.10.5	Zemin Etüt sondajında, Yapay Dolgu-Ana Kaya-Zemini Kesen Sondaj Logu Örneği ve Formasyon Adlaması ……	445
10.10.6	Sondaj, Ayrışma ve Süreksizliklerin Değerlendirilmesi ve Yorumlanmasında "Türk Telekom Arena Stadyumu" Örneği ……...	446
10.10.7	YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark Alanı Geoteknik Etüt Örneğinde, Kontrolsuz Yapay Dolgu Zeminlerin İyileştirilmesine Yönelik "Taş Kolon" Uygulaması ve "Tac Mahal" Örneği ……...	457
10.10.7	.1) Arazi Çalışmaları ……..	458
10.10.7	.2) Temel Zemini ve Ana Zemine Oturacak Yapı Temellerine İlişkin Değerlendirmeler ……	459
10.10.7	.3) Dolgu Zemine Oturacak Yapı Temelleri için Önerilen "Darbeli Kırmataş Kolon" Uygulaması ……	463
10.10.7	.4) TAC MAHAL ……	469
10.10.8	Zemin Araştırmalarına Yönelik Bir Teknik Şartname Örneği ve Jeofizik Ölçüm Uygulaması: "Zemin İnceleme Sondajları ve Sismik Etüt Teknik Şartnamesine Bir Örnek (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü) ……	471
10.10.8	.1) Araştırma Programı ……..	471
10.10.8	.2) Zemin İnceleme (etüt) Sondajları ……	471
10.10.8	.2.1) Sondaj Makine ve Ekipmanı ……..	471
10.10.8	.2.2) Zemin Sondajları ……	472
10.10.8	.2.3) Kaya Sondajları ……	473
10.10.8	.2.4) Yeraltı Suyu Gözlemleri ……	473
10.10.8	.3) Presiyometre Deneyleri ……	473
10.10.8	.4) Sismik Kırılma ve Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) Çalışmaları ….	475
10.10.8	.5) Kırılma-Mikrotremor (Re-Mi) Çalışmaları ……	475
10.10.8	.6) Kuyu İçi Sismik Çalışmaları ……	476
10.10.8	.7) Mikrotremor Çalışmaları ……...	478
10	Bölümün Özeti ……	480
	11. B Ö L Ü M: BARAJLAR ve BARAJ İNŞAATLARINDA JEOLOJİK KRİTERLER	483
11.1	Giriş ……...	483
11.2	Barajlar ve Türleri ……	483
11.2.1	Baraj yapımında mühendislik jeolojisi çalışmaları, baraj tipi ve yeri seçimine etki eden faktörler ……...	495

		SAYFA
11.2.2	Farklı kayaç gruplarının mühendislik özelliklerinin baraj yapımına etkisi ……..	512
11.2.2	.1) Mağmatik kayaçların baraj yapımına etkisi ……...	513
11.2.2	.2) Metamorfik kayaçların baraj yapımına etkisi ……..	514
11.2.2	.3) Sedimenter kayaçların baraj yapımına etkisi ……	515
11.2.3	Barajların çevreye etkisi ……..	518
11	Bölümün Özeti ……..	519
	12. B Ö L Ü M: TÜNELLER ve TÜNEL İNŞAATLARINDA JEOLOJİK KRİTERLER	521
12.1	Tüneller ……..	521
12.1.1	Tünel ve galerilerde kullanılan terimler ……..	521
12.1.2	Tünel tipleri ……..	527
12.1.3	Tünel türleri ve özellikleri ……...	528
12.1.4	Tünel açma yöntemleri ……...	529
12.1.5	Tünel güzergâhı seçiminde göz önünde bulundurulacak jeolojik kriterler ……	532
12.2	ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR ……...	547
12.2.1	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli ……...	547
12	Bölümün Özeti ……..	558
	13. B Ö L Ü M: HALİÇ ISLAH PROJESİ KAPSAMINDA YAPILAN JEOLOJİK ve GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR	560
13.1	Giriş ……...	560
13.2	Haliç Islah Projesinde Yapılan Jeolojik-Geoteknik Çalışmalar ……	561
	KAYNAKLAR ……...	573
	FİHRİST (İNDEKS) ……..	586

ŞEKİL LİSTESİ

		SAYFA
Şekil 1.1	Jeoloji, geoteknik ve inşaat mühendisliği ilişkisi ……	3
Şekil 1.2	Dünyada yer alan tüm katmanlar ve aralarındaki ilişki ……..	6
Şekil 2.1	Dünyanın kesiti ……	11
Şekil 2.2	Sismik "P" ve "S" dalgalarının dünya içerisindeki yayınımları ve gölge zonları .	12
Şekil 2.3	Üst manto ile üst mantonun üst tabakalarını oluşturan astenosfer, litosfer ve litosferin en üst katını oluşturan kıtasal ve okyanusal kabuk ……...	13
Şekil 2.4	Litosferin ortalama ilk 50 km'lik bölümü içerisinde kıtasal-okyanusal kabuk ve altında yer alan litosferik manto ……	13
Şekil 2.5	Yeryüzünün hipsografya profili ……..	14
Şekil 2.6	Yeryüzündeki taşıyıcı unsurlar ve çökelme ortamları ……	15
Şekil 2.7	Konveksiyon akımları ve oluşum mekanizması ……	16
Şekil 2.8	Astenosfer üzerinde kayan litosfer parçaları, "levhalar" ……	16
Şekil 2.9	Yeryüzünü oluşturan litosfer parçaları, levhalar ……	17
Şekil 2.10	Uzaklaşan tip levha sınırları boyunca bir okyanus gelişiminin aşamaları ……..	20
Şekil 2.11	Uzaklaşan tip levha sınırı boyunca bir okyanusun evrim aşamaları detayları ..	20
Şekil 2.12	Okyanus oluşumunun ilk aşamasında gelişen Doğu Afrika Rift Vâdisi ……..	21
Şekil 2.13	Okyanus oluşumunda rift vâdisinin deniz düzeyi altına inmesi ile oluşan genç okyanus aşamasındaki Kızıldeniz ……	21
Şekil 2.14	Atlantik Okyanusu orta sırtını kesen okyanusal kökenli transform faylar ……..	22
Şekil 2.15	Levha sınırlarında gelişen hareket türleri ……	22
Şekil 2.16	Pangea Süper Kıtasının parçalanması ile okyanus oluşumunun olgunlaşma aşaması, Atlantik Okyanusu ……..	24
Şekil 2.17	Okyanus oluşumunun tükenme aşaması ……	24
Şekil 2.18.1	Yakınlaşan tip levha sınırlarının oluşturdukları tektonik ve morfolojik yapılar ...	26
Şekil 2.18.2	Hindistan ve Asya Kıtalarının çarpışması ile Himalaya Dağ Kuşağının Oluşumu ……	26
Şekil 2.19	Okyanus tabanlarının ve kıtaların yüzey morfolojisi ……..	29
Şekil 2.20	Kuzey Amerika-Cebelitarık arasında Atlantik Okyanusunun deniz tabanı profili ……..	29
Şekil 2.21	Avustralya-Güney Amerika arasında Pasifik Okyanusunun deniz tabanı profili	30
Şekil 2.22	Pasif Kıta Kenarının şematik kesiti ……..	30
Şekil 2.23	Yeryüzünde volkanizmanın gelişebileceği ortamlar ……..	33
Şekil 2.24	Yerkürede ve yer kabuğunda bulunan elementler ve yüzdeleri ……..	34
Şekil 2.25	Ametist (mor kuvars) kristalleri ……..	36
Şekil 2.26	Mohs Sertlik Skalası mineralleri ……..	44
Şekil 3.1	Kayaç türleri ve litosfer içerisinde bulundukları alanlar ……	47
Şekil 3.2	Yeryüzündeki kayaç grupları ve aralarındaki ilişki ……	48
Şekil 3.3	Mağmatik kayaçlardaki kimyasal bileşimin değişimine göre kayaçta izlenen farklılaşma ……	49
Şekil 3.4	Derinlik, yarı derinlik ve yüzey kayaçlarının yer kabuğunda oluştukları bölgeler ile asidik ve bazik karakterli kayaçlara ait örnekler ……	50
Şekil 3.5	Derinlik, yarı derinlik ve yüzey kayaçlarının yer kabuğunda bulundukları ortamlar ……	53
Şekil 3.6	Derinlik kayaçlarından granit ile diğer bir derinlik kayacı olan gabronun yüzeyde oluşmuş kayacı bazalt arasındaki kristal büyüklükleri arasındaki dokusal farkın kayaç örneği üzerindeki ve mikroskop altındaki görüntüleri …...	53
Şekil 3.7	Kimyasal bileşimlerine ve oluşum derinliklerine göre kayaç örnekleri ……	54
Şekil 3.8	Yarı derinlik kayaçlarının doğada görünümleri ……..	59
Şekil 3.9.A	Aksaray İli civarında henüz yeni gelişme aşamasında olan "peri bacaları" …...	61

		SAYFA
Şekil 3.9.B	Aksaray İli, Kapadokya bölgesinde oluşmuş peri bacaları ……..……....	62
Şekil 3.9.C	Aksaray İli, Kapadokya bölgesi ..……	62
Şekil 3.10	Bazaltlarda görülen prizmatik sütunsal yapılar …….....	63
Şekil 3.11.A	Metamorfizma türleri ……...	66
Şekil 3.11.B	Kontakt metamorfizma oluşumu …….....	67
Şekil 3.12	Metamorfik kayaçlarda yapı ve doku ……	71
Şekil 3.13	Kaynaktan kopan malzemenin akarsu tarafından taşınıp, ufalanıp biriktirilme işlemi ……	75
Şekil 3.14	Kırıntılı sedimenter kayaçların taşlaşmış olanlarına bazı örnekler ……..….	75
Şekil 3.15	Küresellik ve yuvarlaklığın taşınma mesafesi ile olan ilişkisi ……..	75
Şekil 3.16	Sedimentlerde boylanma ve derecelenme ……..	79
Şekil 3.17	Kavkılı kireçtaşı (Küfeki Taşı) ……	80
Şekil 3.18	Erzurum Oltu Taşından yapılmış bir tespih ……	83
Şekil 3.19	Mardin, Zinciriye (Sultan İsa) Medresesi, Taç Kapısında yer alan motifler ….....	87
Şekil 3.20.A	Divriği Ulu Câmii, Kuzey Taç Kapısı ……	89
Şekil 3.20.B	Divriği Ulu Câmii, Batı Taç Kapısı ……	89
Şekil 3.20.C	Divriği Ulu Câmii'ye ait orijinal taş, tuğla, sıva ve harçlar ……	90
Şekil 3.21.A	Edirne Selimiye Câmii ……	93
Şekil 3.21.B	Edirne Selimiye Câmii minaresinin dış görünüşü …….	93
Şekil 3.21.C	Edirne Selimiye Câmii minaresinin iç görünüşü ……	94
Şekil 3.22.A	Kumtaşı tabakasında görülen fiziksel ayrışma ……..	97
Şekil 3.22.B	Kayalarda fiziksel ve kimyasal ayrışma ……..	100
Şekil 3.22.C	Küresel ayrışma ……..	101
Şekil 3.22.D	Küresel ayrışma ……..	102
Şekil 3.22.E	Yeryüzünde mostra veren ana kayacın ayrışması ve toprak oluşumu ……..	107
Şekil 3.23	Yerinde ayrışma ile oluşmuş ve taşınmış zeminler ……	109
Şekil 3.24	Yerinde ayrışma ile oluşmuş tipik bir Toprak Profili ……..	111
Şekil 3.25	Farklı iklimlerde gelişen ayrışma (bozunma) zonları ve ayrışmamış ana kaya zonu ……..	113
Şekil 3.26	Mağmatik ve sedimenter kayaların bulundukları yerlerde, zemin yüzeyinden zemin içine doğru gelişen ayrışma (bozunma) zonları …….....	113
Şekil 3.27.A	Ayrışmanın oluşturduğu renk farkı …….....	114
Şekil 3.27.B	Bazalt kayasında kimyasal, biyolojik ve güneş radyasyonu gibi etkenlerle oluşmuş ayrışma, dereceleri ve renk solmaları …….....	117
Şekil 3.28	Sedimenter (çökel, tortul) ortamlar ……	118
	3. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
3.7.1.A	Yavuz Sultan Selim Câmii'nin altında yer alan galeri ……..	119
3.7.1.B	Şekil 3.7.1.A'da yer alan Yavuz Sultan Selim Câmii altındaki galeride, yapımda kullanılmış orijinal Horasan Harcı numuneleri ……	119
3.7.2.A	Ofiyolitik karmaşık kayaları ……	121
3.7.2.B	Ayrık (ayrışmış, bozunmuş) volkanik kayalar ……	121
3.7.2.C	Terra Rosa ……	122
3.7.2.D	Rüzgâr türbini temeli ……..	122
3.7.2.E	Susurluk, Kel Tepeyi oluşturan mermerlerde oluşmuş kimyasal ayrışma …….	123
3.7.2.F	Karstik boşluk ……..	123
3.7.2.G	Mermerlerde karstik boşluklarda görülen ayrışma ve karbonatlaşma ……	124
3.7.2.H	Çatlaklar boyunca gelişmiş aşırı ayrışma ……	124
3.7.2.İ	Dolin ……..	125
3.7.2.J	Rüzgâr Türbinleri ……	125
Şekil 4.1	Depolanma ortamlarında sedimentlere ait yatay tabaka çökelimleri …….....	131
Şekil 4.2	Sedimenter kayaçların ayrışıp, taşınarak uzun bir jeolojik süreçte tabakalaşmalarına kadar geçen aşamalar ……..	132
Şekil 4.3.A	Sedimenter kayaçlarda görülen yatay tabakalanmalar ve bir nehrin oluşturduğu aşınma (erozyon) ……..	132
Şekil 4.3.B	Laminalı stratifikasyon ……	133

		SAYFA
Şekil 4.4.A	Tabaka içi yapılarına örnek ……	134
Şekil 4.4.B	Çapraz tabakalanma ……..	135
Şekil 4.5	Tabaka üstü yapıları …….....	136
Şekil 4.6	Transgresyon ve Regresyon ……	138
Şekil 4.7	Açısız uyumsuzluk ve açılı uyumsuzluk yüzeylerinin oluşum aşamaları ……	140
Şekil 4.8	Açılı uyumsuzluk (açısal diskordans) yüzeyi ve doğadan bir örnek ……..	141
Şekil 4.9	Tabakaların yatay düzlemle yaptıkları açılara göre adlandırılmaları ……..	141
Şekil 4.10	Tabaka doğrultu ve eğimi ……..	142
Şekil 4.11.A	Kayaçlarda görülen kıvrımlar ve türleri ……	144
Şekil 4.11.B	Budinaj yapısı ……...	145
Şekil 4.11.C	YTÜ, Beşiktaş Kampüsü bahçesi taş duvar istinat yapısı ……	146
Şekil 4.11.D	Yumrulu kireçtaşlarında görülen budinaj (bademli) yapıları ..……..……...	146
Şekil 4.11.E	Budinaj yapısı ……..	147
Şekil 4.11.F	Yumrulu kireçtaşları ……	147
Şekil 4.11.G	Laminasyon ve budinaj yapısı ……...	147
Şekil 4.12	Tabaka, üye, formasyon, kama ve merceği gösteren bir sediment grubu ……	149
Şekil 4.13	Kat, seri, fosil menzili ve eşzaman yüzeyleri ……...	150
Şekil 4.14	Bir kuvvet çiftinin etkisi altında oluşan (tüy) çatlakları ……	154
Şekil 4.15	Kayaçlarda düzenli gelişmiş süreksizlik takımları ve süreksizlikler boyunca gelişen ayrışmalar ……...	155
Şekil 4.16	Fay ve fayın elemanlarını gösteren blok diyagram ……	155
Şekil 4.17	Eğim atımlı normal fayın arazide görünümü ……...	156
Şekil 4.18	Eğim atımlı normal fayın arazide görünümü ……...	157
Şekil 4.19	Cisimler üzerine uygulanan değişik kuvvetler ve bunlara göre oluşan fay türleri ……	157
Şekil 4.20	Normal faylar ile gelişen horst-graben sistemi ……	158
Şekil 4.21	Doğrultu atımlı faylara örnek ……	161
Şekil 4.22	Doğrultu atımlı faylara Türkiye'den örnek ……..	161
Şekil 4.23	Topoğrafik konturlar ve morfolojik anlamı ……...	165
Şekil 4.24	Topoğrafik harita üzerinden kesit alınması ……..	165
Şekil 4.25	Bir jeoloji haritası üzerinde tabaka doğrultularına dik bir hat boyunca jeolojik kesit alınması ……...	166
Şekil 4.26	Jeolojik harita ve kesitine ait bir örnek ……	167
	4. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
4.8.1	Topoğrafik harita örneği ……	168
4.8.2	Jeoloji haritası ve kesiti ……..	169
4.8.3	Bir çökel dizisinin jeolojik geçmişindeki bağıl yaş ilişkisi ……..	171
4.8.4.1	İstanbul ve çevresinin güncellenmiş jeoloji haritası ……..	172
4.8.4.2	İstanbul ve yakın çevresi Tersiyer çökellerinin güncellenmiş stratigrafik sütun kesiti …….....	173
4.8.4.3	Avcılar formasyonu ……	174
4.8.4.4	Bakırköy fm. çökelleri üzerine diskordan oturan Samandıra fm. çökelleri ……	174
4.8.4.5	İstanbul, Avrupa Yakası, Küçük Çekmece zemin etüt sondajı logu …….....	175
4.9.1	Bina katlarına ilişkin tanımlamalar ……	180
Şekil 5.1	Hidrolojik döngünün aşamalarının şematik gösterimi ……	184
Şekil 5.2	Akarsularda gözlenen düzenli ve düzensiz akış ……	186
Şekil 5.3	Akarsu aşındırma mekanizmaları ……	187
Şekil 5.4	Bir akarsu içerisindeki sediment yükü ve hareket mekanizması ……	187
Şekil 5.5	Akarsu vadilerinde kayaç sertliğine, yamaç duraysızlığına ve yapay nedenlere bağlı olarak gelişen vâdilerde akış hızındaki değişim ……	187
Şekil 5.6	Akarsu tabanında gelişen ripple-marklar ……	188
Şekil 5.7	Tipik bir vâdi kesiti ve elemanları ……..	190
Şekil 5.8	Akarsuyun boyuna profili ile yüksek ve alçak bölgelerdeki enine profilleri ……	191
Şekil 5.9	Örgülü tip akarsu gelişimi ……..	192

		SAYFA
Şekil 5.10	Menderesli vâdi-akıntı hızı ilişkisi ve akarsuyun kıvrımlı ve kıvrımsız kesimlerinde oluşan en yüksek hız bölgeleri ……..	193
Şekil 5.11	Menderesli vâdi oluşum mekanizması ……	193
Şekil 5.12	Akarsu drenaj havzası ve su bölüm hattı ……	195
Şekil 5.13.A	Anadolu'dan doğarak Karadeniz'e boşalan ana akarsular ve oluşturdukları doğal drenaj sistemleri (akarsu sistemleri) ……	195
Şekil 5.13.B	Paralel drenaj sistemi ……..	196
Şekil 5.14	Jeolojik yapı ve morfolojiye bağlı olarak gelişen değişik doğal drenaj tipleri ….	198
Şekil 5.15	Akarsu denge profilinin, kaide seviyesine (deniz düzeyine) göre olan değişimi ..	200
Şekil 5.16	Akarsularda gençleşme ve taraça oluşumu ……	200
Şekil 5.17	Bir kıvrımın akarsu vâdisi tarafından kesilmesi ve antesedant vâdi oluşumu ...	201
Şekil 5.18	Akarsu vâdisini kesen bir fay tarafından oluşturulan havzanın, akarsu tarafından doldurularak denge profilinin yeniden kazanılması ……	202
Şekil 5.19.A	Bir akarsu vâdisini kesen fay tarafından derinleştirilen bölgede oluşan alüvyon yelpazesi ve üzerinde gelişmiş karışık yelpaze tipi drenaj ……	203
Şekil 5.19.B	Kayalarda ve zeminlerde yamaç (tabiî şev) açıları ……	203
Şekil 5.20.A	Bir deltanın elemanları ve çökelen sedimentler ……	205
Şekil 5.20.B	Deltanın oluşumu, elemanları ve sediment çökelim yerleri ……..	205
Şekil 5.21	Dalga, gel-git ve akarsu hâkimiyetinde gelişen deltalar ……	205
Şekil 6.1	Suyun yer altında birikmesi ve serbest akifer oluşumu ……	214
Şekil 6.2	Yer altında suyun bulunuş şekilleri ……...	214
Şekil 6.3	Yeraltı su düzeyinin ve yeraltı suyundan beslenen kaynakların, mevsimsel olarak değişen yağış miktarına göre olan değişimleri ……..	219
Şekil 6.4	Yeraltı su düzeyindeki değişimlere göre yüzey suyu-yeraltı suyu ilişkisi ……..	220
Şekil 6.5	Yeraltı suları tarafından beslenen göl ve akarsu ……..	220
Şekil 6.6.A	Serbest akifer ve serbest akiferin doymamış bölgesinde yer alan tünek akifer	223
Şekil 6.6.B	Asılı su tablası (tünek akifer), serbest akifer, basınçlı akifer ve alıcı-verici akarsular ……..	223
Şekil 6.6.C	Basınçlı akifer ……..	224
Şekil 6.6.D	Sızdıran akifer ……..	225
Şekil 6.7	Karışık akifer ……	225
Şekil 6.8.A	Obruk ……	229
Şekil 6.8.B	Karbonatlı kayalar (kireçtaşı, dolomit, mermer) içerisinde ve yüzeyinde erime ile oluşan farklı karstik yapılar ……..	231
Şekil 6.9	Mağaralar (karstik yapı) ……	232
Şekil 6.10	Yer altındaki ortamların jeolojik özelliklerine ve çatlak sistemlerine göre açılan su kuyularının verimliliği ……..	235
Şekil 6.11	Bir kuyuda su çekilme işlemi yapıldığında yeraltı suyunda meydana gelen alçalma konisi ……..	236
Şekil 6.12	Bir serbest akiferdeki aşırı pompaj sonunda yeraltı su düzeyinde meydana gelen yapay düşüş ……..	237
Şekil 6.13	Zeminde oturma ……..	237
Şekil 6.14	Yeraltı sularını kirleten kaynaklar ……	238
Şekil 6.15	Vahşi çöp sahasında, yüzeyden yer altına sularla sızan kirleticilerin hareket yönleri boyunca yayılması ……	238
Şekil 6.16	Kırıntılı ve çatlaklı birimler içerisindeki yeraltı suyunun kısmen temizlenmesi ..	239
Şekil 6.17	Kirleticilerin yoğunluklarına göre yeraltı suları ile olan ilişkileri	240
Şekil 6.18	Yeraltı suyu kirlenmeleri ve tatlı su-tuzlu su ilişkisi ……	241
	6. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
6.7.1	Yeraltı su tablasının belirlenmesi ……..	245
6.7.2.A	Antalya Travertenlerinde oluşan falezlerin genel görünümü Konya Altı ……	247
6.7.2.B	Antalya Traverten kayaları karotları ……	247
6.7.2.C	Antalya Traverten kayaları karotları (yakından görünüş) ……	247
6.7.2.D	Antalya Travertenlerinin (bitki boşluklu travertenler) yakından görünüşü ……..	248
6.7.2.E	Antalya Traverteni (bitki boşluklu "kamış tipi" traverten) ……	248

		SAYFA
6.7.2.F	Kahverengi, bitki kırıntılı, erime boşluklu Antalya Traverten kayası ……	249
6.7.2.G	Traverten kayaları çeşitleri ……	249
6.7.3.A	Hasdal vahşi çöplüğünde kontrolsuz dökülen çöplerin oluşturduğu çöp dağı ve yamacı ……	251
6.7.3.B	Hasdal vahşi çöplüğünde 22 Mayıs 1996 sabahı, çöpten oluşan dağ yamacında, çöpün kendi içinde meydana gelen heyelân ……	252
6.7.3.C	Çöpte oluşan heyelân nedeniyle tüm vâdi tabanına yığılan çöpler ile kapanan Kemerburgaz-Cendere yolunu açma çalışmaları ……	252
6.7.3.D	Kâğıthane Deresi membası ……	253
6.7.3.E	Kâğıthane Deresinin Hasdal vahşi çöplüğünden geçerken çöplük tabanından sızan, kötü kokan, zehirli çöp sularıyla karışarak zift rengini alması ……	253
6.7.3.F	Hasdal vahşi çöp sahasının iyileştirilmesi ……	254
6.7.3.G	Hasdal vahşi çöplüğünden elektrik enerjisi üretimi ……	254
Şekil 7.1	Açık denizde bir dalganın oluşumu ve elemanları ……	259
Şekil 7.2	Dalganın açıktan kıyıya doğru olan hareketi sırasında dalga açısı ve kıyıyı oluşturan litolojik değişimler vb. farklılıklara bağlı olarak gelişen unsurlar ……	260
Şekil 7.3	Açık deniz ile kıyı önü ve kıyı ardından oluşan kıyı alanı bölgeleri ……	261
Şekil 7.4	Kıyıya açılı gelen dalga ile sürüklenen ince kırıntılı sedimentlerin, sahil çizgisinin geriye büküldüğü yerlerde oluşturduğu kıyı oku ……	262
Şekil 7.5	Kıyı boyu akıntıları ile sürüklenen kırıntılı sedimentlerin, kıyıda oluşturdukları yapılara örnekler (kıyı kordonu ve tombolo) ……	263
Şekil 7.6	Kıyılarda oluşan rip akıntıları ……	264
Şekil 7.7	Kıyı erozyonu ……	266
Şekil 7.8	Mevsimsel değişimlere bağlı olarak kıyıdaki kırıntılıların yer değiştirmeleri ve bunun sonucu olarak kıyıda meydana gelen değişimler ……	266
Şekil 7.9	Kıyı aşınımları ……	267
Şekil 7.10.A	Kıyıda meydana gelen sediment getirim ve kayıpları ……	267
Şekil 7.10.B	Deniz yığını ……	268
Şekil 7.11	İstanbul Boğazı mikro-batimetri haritası ……	270
Şekil 7.12	Kıyılardaki yapılar ve buna bağlı olarak plâj oluşumu örnekleri ……	273
Şekil 7.13.	Kıyılarda tanımlanan bölgeler	275
	7. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
7.5.2.A	İstanbul Marmaray Yenikapı Metro İstasyonu kazı alanı ……	279
7.5.2.B	Yenikapı Metro İstasyonu kazısında bulunan savaş gemisi kalıntısı ……	279
7.5.2.C	Yenikapı Metro İstasyonu kazısında tsunami sonucu oluşmuş ve çok miktarda tarihi kalıntıları içeren çamur tabakası ……	280
7.5.2.D	Yenikapı Metro İstasyonu kazısı şevinde tarihi kalıntı düzeyi (çamurlu tabaka) ..	280
7.5.2.E	Yenikapı Metro İstasyonu kazısında C ve D'de yer alan fotoğraflarda, tsunaminin neden olduğu tarihî kalıntılardan oluşan çamurlu düzeyin yakından görünüşü ……	281
7.5.2.F	Yaklaşık 9.000 yıl önce, insanlar tarafından o dönemde karasal olan zemin yüzeyi üzerine düzenli yerleştirilerek oluşturulmuş tarihî yüzey taş kaplaması	282
7.5.2.G	7.5.2.F'de yer alan taşların yakından görünüşü ……	282
7.5.2.H	Yenikapı Metro İstasyonu kazısı, güneye Yenikapı Tren İstasyonu tarafına bakış ……	283
Şekil 8.1	Litosferi oluşturan levhalar ve levhaların hareket yönleri ……	286
Şekil 8.2	Depremlerin kaynağı ……	287
Şekil 8.3	Aktif bir fayın, genç sedimentler içerisindeki gelişimi ……	287
Şekil 8.4	Kayaçların üzerlerinde biriken gerilmeye bağlı olarak deformasyona uğramaları ve deprem oluşumu ……	290
Şekil 8.5	Deprem oluşum mekanizması ve depremin oluşumunu izleyen dönemde sismik dalgaların, depremin merkezinden dışa doğru yayılması ……	291
Şekil 8.6	Depremde sismik dalga yayılımı ve depremin Hiposantrı ile Episantrı ……	292
Şekil 8.7	Bir ana deprem öncesi ve sonrasında gelişen öncü ve artçı depremlerin, deprem sırasında kırılan fay yüzeyi üzerindeki dağılımları ……	293

		SAYFA
Şekil 8.8	Depremlerin oluşum derinlikleri ve farklı derinliklerde depremin oluşmasına neden olan tektonik mekanizma ……..	293
Şekil 8.9	Yeryüzünde 1 yılda meydana gelen deprem sayısı ve büyüklüğü ile bu depremleri, aynı enerjiyi üretebilecek diğer doğal-yapay olaylarla kıyaslanması ……	295
Şekil 8.10.A	Yerkürenin yaklaşık olarak 8.000 km'lik bir bölümünü, farklı hız ve yayılma karakterine bağlı olarak kateden sismik dalgaların, sismograf tarafından kaydedilmiş izleri ……..	300
Şekil 8.10.B	Bir deprem sonrası gelişmiş sismik dalgaların sismogramı (grafik çıkışı) ……	300
Şekil 8.11	P, S ve Yüzey Dalgalarının yayılım şekilleri ……	303
Şekil 8.12	P, S ve Yüzey Dalgalarının bir bahçe çiti üzerindeki farklı etkileri ……..	304
Şekil 8.13.A	ABD'de meydana gelmiş önemli depremlerin yarattığı hasarlar ……	305
Şekil 8.13.B	Yerel zemin koşullarının deprem ivmesine etkisi ……..	306
Şekil 8.14	Bir yanal akma örneği ……	311
Şekil 8.15	Sıvılaşma etkisiyle zemin yüzünde meydana gelen bir çökme örneği ……	312
Şekil 8.16	Sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybının sonuçlarına bir örnek ……	312
Şekil 8.17	1999 Marmara (Gölcük) Depremi nedeniyle oluşan sıvılaşmanın yol açtığı taşıma gücü kaybının Adapazarı'nda bir binaya etkisi ……..	313
Şekil 8.18	İstanbul, Harami Dere yokuşu E-5 Karayolu yakınında yıkılmış bir istinat duvarı ……	313
Şekil 8.19	Sıvılaşma nedeniyle oluşan kum öbeğine (konisine) bir örnek ……	314
Şekil 8.20	Deniz tabanında meydana gelen bir depremi oluşturan fayın, deniz tabanında yarattığı yükselim/alçalımın denizde oluşturacağı tsunami ……..	316
Şekil 8.21	Tsunami gelişimi ……	316
Şekil 8.22	Tsunaminin oluşturduğu yıkımlar ……..	318
Şekil 8.23	Tsunamiden etkilenen tesisler ……..	319
Şekil 8.24	Türkiye MTA aktif fay haritası ……	320
Şekil 8.25	Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde son 100 yılda meydana gelmiş olan önemli depremlerin oluşumu sırasında kırılan fay bölümleri ……	320
Şekil 8.26	17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 depremleri sırasında kırılan faylar ……..	321
Şekil 8.27	Yanal atım ……	321
Şekil 8.28	Depremin neden olduğu hasarlar ……	322
Şekil 8.29	KAF Zonunun İzmit Körfezi içerisinde oluşturduğu kırık zonun sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görünümü ……	323
Şekil 8.30.A	Marmara Denizi batısı, Tekirdağ Havzası içerisinde KAF Zonunun kuzey kolunun sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görüntüsü ……..	324
Şekil 8.30.B	Marmara Denizi doğusu, Çınarcık Havzası içerisinde KAF Zonunun kuzey kolunun sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görüntüsü ……..	324
Şekil 8.31	Kuzey Anadolu Fay Zonunun Marmara ve Ege Denizleri içerisinde kalan deniz altı bölümündeki aktif faylar ……	325
Şekil 8.32	Maden Tetkik Arama Enstitüsüne ait 1992 yılı ve 2012 yılı Türkiye Aktif Fay Haritası ……..	328
Şekil 8.33	Türkiye'nin tavsiye edilen yeni Aktif Fay Haritası ……..	329
Şekil 8.34	T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ……	330
Şekil 8.35	Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası üzerinde 1. Derece Deprem Bölgeleri içinde yer alması gereken muhtemel ilâve alanlar ……	331
Şekil 8.36	Dünya'nın en büyük iç denizi olan Akdeniz'in, tabanında yer alan Dalma-Batma Zonları ve yönleri ……	332
Şekil 8.37	26 Aralık 2004 Sumatra Depremine neden olan Dalma-Batma Zonu ve yönü .	333
Şekil 8.38	Fukuşima Depremi ……..	334
Şekil 8.39	22 Mayıs 1960 Şili Depremi ve Dalma-Batma Zonu ……	335
Şekil 9.1	Kütle hareketlerinin türlerine ait bazı örnekler ……	340
Şekil 9.2	Doğada meydana gelebilecek bazı kütle hareketi türleri ve bu hareketlerin oluşumunu kontrol eden faktörler ……	341
Şekil 9.3.A	Kaya düşmesine örnek ……..	343

		SAYFA
Şekil 9.3.B	Kaya düşmesine Türkiye'den bir örnek ……	343
Şekil 9.4	Doğada gözlenen devrilme türleri ……	344
Şekil 9.5.A	Devrilme ve Düşmeler ……	344
Şekil 9.5.B	Mardin eski yerleşim alanından kuzeye, Mardin Kalesinin üzerinde yer aldığı dik yamaçları oluşturan kireçtaşlarına bakış ……	345
Şekil 9.5.C	Mardin Kalesinden güneye, kaya düşme ve devrilmelerinden zarar gören eski Mardin'e bakış ……	345
Şekil 9.6	Çatlaklı kayalarda tek bir blok için devrilme ve kayma koşulları ……	346
Şekil 9.7	Suyun kütle hareketli üzerindeki etkisi ……	347
Şekil 9.8.A	Kaya kripi gelişimi ve etkileri, toprak kripi oluşum mekanizması ……	349
Şekil 9.8.B	Kaya ve toprak kripi ……	349
Şekil 9.9.A	Kolüvyon ve yakından görünüşü ……	350
Şekil 9.9.B	Yamaç molozları (taluviyum ve kolüvyonlar) ……	351
Şekil 9.9.C	Yamaç molozları: Taluvivum'un yakından görünüşü ……	351
Şekil 9.10	Hızlı akma türlerine örnekler ……	352
Şekil 9.11	Kaya kaymasına bir örnek ……	354
Şekil 9.12	Kaya kayması: Düzlemsel kayma ……	354
Şekil 9.13	Düzlemsel (a) ve kama tipi (b) kaymanın blok diyagramda görünümleri ……	355
Şekil 9.13	.a.1) Düzlemsel kaymaya örnek ……	355
Şekil 9.13	.b.1) Kama tipi kaymaya örnek ……	356
Şekil 9.14	Bir heyelâna ait bölümlerin blok diyagramda görünüşü ……	357
Şekil 9.15.A	Akma ve heyelân ……	359
Şekil 9.15.B	Eğri yüzeyli (dönel, rotasyonal) heyelân örneği ……	359
Şekil 9.16	Tünellerde kazı faaliyetleri sonucu oluşan tasman büyüklükleri ……	361
Şekil 9.17	Yamaç eğiminin kaydırıcı kuvvetler üzerindeki etkisi ……	364
Şekil 9.18	Kütle hareketlerine neden olan faktörler ……	364
Şekil 9.19	Kütle hareketlerinin oluşmasında su etkisi ……	366
Şekil 9.20	Bir şevin duraylılığını bozabilecek yapay etkenler ……	367
Şekil 9.21	Kayalarda, süreksizlik yönü ve açısı dikkate alınmadan önlemsiz geçilen bir yol yarmasının kütle hareketini tetikleyici yöndeki etkisi ……	367
Şekil 9.22	Drenaj önlemleri, süreksizlik yönü/açısı dikkate alınmamış, iyi projelendirilmemiş dayanma yapılarıyla desteklenmiş şevde oluşan heyelân ve akma ……	368
Şekil 9.23	Su basıncının etkisi ……	369
Şekil 9.24	Kütle hareketlerinin engellenmesinde kullanılan yöntemler ……	370
Şekil 9.25	Yamaç duraylılığını sağlamak amacıyla kayada gerçekleştirilmiş bulonlama ...	370
Şekil 9.26	Deniz altında oluşan kütle hareketleri ……	371
Şekil 9.27	Los Angeles açıklarında kıta yamacında meydana gelmiş olan bir deniz altı heyelânına ait sayısal arazi modeli ……	372
Şekil 9.28	Marmara Denizi içinde, kıyı yamaçlarında oluşmuş heyelânlar ……	373
Şekil 9.29	Deniz altı heyelânının izleri ……	374
	9. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
9.6.1	Kuzulu Heyelânı ……	375
9.6.2	Manisa/Soma Heyelânı. Heyelân alanını ve heyelân mekanizmasını gösterir zemin kesiti ……	376
9.6.3.A	Kemerburgaz Deponi Alanında (düzenli katı atık depolama sahası) katı atık dökümü için hazırlanmış BA-I Hücresi ……	377
9.6.3.B	Kemerburgaz Deponi Alanında çöp dökümüne hazır BA-I hücresi ……	378
9.6.3.C	Deponi Alanında oluşan heyelân ……	378
9.6.3.D	Heyelânın BA-1 ve yanında henüz çöp dökümü için hazırlanmamış BA-III hücresine doğru giderek büyümesi ……	379
9.6.3.E	Vâdi tabanında heyelân topuğunda yer alan betonarme çöp sızıntı suyu havuzunun heyelândan etkilenmesi ……	379
9.6.3.F	Kemerburgaz Katı Atık Depolama Alanının mühendislik jeolojisi haritası ve kayma mekanizmasını gösterir zemin kesitleri ……	380

		SAYFA
9.6.3.G	Yer altı (yüzey altı) drenaj hendeği yapım çalışması ……..	381
9.6.3.H	Drenaj hendeği kesiti ve kutu menfez ……..	381
9.6.3.İ	Kemerburgaz Deponi Alanında oluşan heyelânda belirlenen zemin hareketleri	382
9.6.3.J	Heyelânın iyileştirme çalışmalarıyla önlenip stabil ve hazır hâle getirilmesiyle yeniden kullanıma açılan Kemerburgaz Deponi Alanı (Odayeri) ……..	383
9.6.3.K	İstanbul Avrupa Yakası Katı Atık Tesisleri Girişi ……..	384
9.6.3.L	Katı atık gazından elektrik üreten santral ……..	384
9.6.4.A	Gülhane Parkı-Sarayburnu arası zemin kesiti ve Marmaray Tünel güzergâhı .	386
9.6.4.B	Zemin oturması ……..	386
9.6.4.C	Yüzey ekstansometreleri ……..	386
9.6.4.D	Çatlak ve Çatlak Ölçer ……..	387
9.6.4.E	C'de yer alan Sur-i Sultanî Suru duvarındaki çatlağa sabitlenmiş, çatlağın zamanla değişen genişliğini ölçen Deplâsman Ölçer ……..	387
9.6.5.A	Farklı oturma nedeniyle binanın her iki yan duvarında yamaç aşağı yöne doğru meydana gelen çatlaklar ……..	391
9.6.5.B	Kontrolsuz yapay dolgu üzerinde yer alan tekil sömel ……..	392
9.6.5.C	Kömür kırıntılarını içeren, kontrolsuz yapay dolgu üzerine oturtulmuş ve 9.6.5.B'de yer alan tekil temel tabanının yakından görünüşü ……..	392
9.6.6.1.A	İstanbul-Kemerburgaz'da oluşan heyelân ve sondaj yerlerini gösterir harita ...	396
9.6.6.1.B	İstanbul, Kemerburgaz-Tayakadın YSK-5 ile YSK-2 sondajları arası heyelân kesiti ……..	397
9.6.6.2	Kemerburgaz, YSK-2 sondajı inklinometre ölçümleri ……..	398
9.6.6.3	Kemerburgaz, YSK-4 sondajı inklinometre ölçümleri ……..	399
9.6.6.4	Kemerburgaz, YSK-5 sondajı inklinometre ölçümleri ……..	400
9.6.6.5	Kemerburgaz, YSK-7 sondajı inklinometre ölçümleri ……..	401
9.6.6.6	Kemerburgaz, YSK-10 sondajı inklinometre ölçümleri ……..	402
9.6.6.7	Bir inklinometre (eğim ölçer) ölçüm sistemi ……..	402
9.6.6.8	Bir sondaj kuyusunda, inklinometre aleti ile sondaj tabanından itibaren yüzeye doğru 1'er metre aralıklar ile ölçüm alınması ……..	403
9.6.6.9.A	Kemerburgaz duble asfalt yolunun güney yamacını oluşturan şevde görülen heyelânın taç kısmı ……..	403
9.6.6.9.B	Heyelân nedeniyle hasar görmüş 570m uzunluğundaki kazıklı istinat yapısı ...	404
9.6.6.9.C	Kazık başlıklarının kırılan kesimleri ve göçme ……..	404
9.6.6.9.D	5,20m x 1,20m boyutlarındaki kazık başlığının heyelân nedeniyle kırılması ve donatıların kopması ……..	405
9.6.6.9.E	Heyelân nedeniyle kazık başlığının kırılması, donatıların kopması ……..	405
9.6.6.9.F	Kemerburgaz Heyelânının gelişimi ……..	406
9.6.6.9.G	F'de görülen aktif heyelânın hızlı gelişmesi ile topoğrafyada görülen değişim .	406
9.6.6.9.H	F'de görülen aktif heyelânın hızla ilerlemesi ……..	407
Şekil 10.1	Tane dizilişinin basınç direncine etkisi ……..	418
Şekil 10.2	Tek eksenli ve üç eksenli basınç gerilme etkisi altındaki kaya numunelerinin içerisindeki süreksizlik açısının değişimi ile değişen dayanım ilişkileri ……..	419
Şekil 10.3.A	Birim kaya elemanı ……..	421
Şekil 10.3.B	Mermer-kalkşist-metapelit ardalanmaları ……..	424
Şekil 10.4	Casagrande Plâstisite Kartı ……..	428
Şekil 10.5	Bir temel zemini inceleme sondajı ……..	431
Şekil 10.6	Karot sandığı ve karotlar ……..	431
Şekil 10.7	SPT tüpü numuneleri ……..	432
Şekil 10.8.A	Süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülük ve dalgalılık ……..	436
Şekil 10.8.B	Metal telli profilometre ile bir kaya mostrasında süreksizlik yüzeyi üzerindeki pürüzlülüğün pratik olarak ölçümü ……..	437
Şekil 10.9	Düzenli ve farklı yönlerde gelişmiş süreksizlik takımlarını içeren kayalarda, süreksizliklerin yön ve açılarına göre yamaçlarda oluşturulacak şevlere verilmesi gerekli eğimler ……..	438

		SAYFA
Şekil 10.10	Süreksizlikleri kohezyonlu malzeme ile dolmuş çatlaklı kayalara verilecek eğim ……..	439
Şekil 10.11	Ağırlık kuvvetinin süreksizlik yüzeyine ve ona dik doğrultudaki bileşeni ……	439
Şekil 10.12	Kaya bloğunun serbest cisim diyagramı ……..	440
	10. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
10.10.1	TCR, SCR, RQD ve FF'in Hesaplanması ……..	441
10.10.3	Zemin etüt sondajında, yapay dolgu ve altında ana zemini (zemin+kaya ardalanmalı istif) kesen sondaj logu örneği ……..	443
10.10.4	Zemin etüt sondajında, bitkisel toprak ve alüvyal zemini kesen sondaj logu örneği ……	444
10.10.5	Zemin etüt sondajında, yapay dolgu-ana kaya-zemini kesen sondaj logu örneği ve formasyon adlaması ……..	445
10.10.6.A	Türk Telekom (TT) Arena Stadyumu Mühendislik Jeolojisi haritası ……	447
10.10.6.B	TT Arena Stadyumu ana taşıyıcı süper kolon yerleri ve zemin kesit doğrultuları ……..	448
10.10.6.C	TT Arena Stadyumu zemin kesitleri ……..	449
10.10.6.D	TT Arena Stadyumu geoteknik etüt çalışmaları ……..	450
10.10.6.E	Sağlam mavi grovak ve silttaşları üzerinde yer alan S1 ve S2 süper kolon temel yerleri ……..	450
10.10.6.F	TT Arena Stadyum sahası ……..	451
10.10.6.G	TT Arena Stadyumu temeli …….....	451
10.10.6.H	TT Arena Stadyumu inşaat çalışmaları ……..	452
10.10.6.İ	Mavi grovak-silttaşı üzerinde yer alan radye temel ve kayada ayrışma ile oluşan renk farklılıkları ……..	452
10.10.6.J	1 No'lu süper kolon yeri ……..	453
10.10.6.K	Yapay dolgu ……..	453
10.10.6.L	Stadyum kuzey sınırında yer alan şevin, kontrolsuz yapay dolguyu oluşturan kesimlerinde görülen yersel kaymalar ……..	454
10.10.6.M	Fore kazıklar ……..	454
10.10.6.N	Süper kolon yeri ……..	455
10.10.6.O	Stadyum içi inşaat çalışmaları ……..	455
10.10.6.P	2 No'lu (S2) süper kolon imâlat çalışmaları ……..	456
10.10.6.R	Türk Telekom Arena Stadyumu ……..	456
10.10.7	YTÜ Davutpaşa Kışlası, Teknopark alanı ……..	457
10.10.7.1	.A) Davutpaşa Kampüsü Teknopark alanı mühendislik jeolojisi haritası ……	460
10.10.7.1	.B) Davutpaşa Kampüsü Teknopark alanı1-1/ ve 2-2/ zemin kesitleri ……..	461
10.10.7.1	.C) Davutpaşa Kampüsü Teknopark alanı alanı3-3/ ve 4-4/ zemin kesitleri …	462
10.10.7.3	.A) Yapay dolgu ……..	464
10.10.7.3	.B) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı ve bu alanda yapılan darbeli kırmataş kolon imâlatı ……..	464
10.10.7.3	.C) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanında çalışan bir darbeli kırmataş makinası ……..	465
10.10.7.3	.D) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı taş kolon yükleme deneyi ….	465
10.10.7.3	E) Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı, yapay dolguda sıkıştırılmış taş kolonlar üzerine yerleştirilen tekil ve mütemadi temeller ……..	466
10.10.7.3	.F) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanında yapay dolguda oluşturulmuş ve kenar kesimlerde yer alan taş kolon dizisi sütun kesitleri ……	466
10.10.7.3	.G) Davutpaşa Kampüsü, yapay dolguda temel kazısı kenarlarında görülen taş kolon sütunları ……..	467
10.10.7.3	.H) Sıkıştırılmış taş kolonun, zemin içindeki kesitinin yakından görünüşü …….	467
10.10.7.3	.İ) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü Teknopark alanı ……..	468
10.10.7.3	.J) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü ……..	468
10.10.7.4	.A) TAC MAHAL ……..	469
10.10.7.4	.B) TAC MAHAL mermerleri …….....	470
10.107.4	.C) TAC MAHAL anıtının dört cephesinde yazılı "Yasin Suresi" …….....	470

		SAYFA
10.10.8.3	.A) Menard Presiyometre Ölçüm Cihazı …….....	474
10.10.8.3	.B) Menard Presiyometre Probu …….....	474
10.10.8.5	Sismik kırılma, MASW ve Re-Mi çalışmaları ……	476
10.10.8.6	.A) Bir sondaj kuyusuna yerleştirilen SARA SS-BH 5 bileşenli kuyu içi jeofonu	477
10.10.8.6	.B) Sondaj kuyusunda S tipi sismik enerji üretimi hazırlığı ……..	477
10.10.8.6	.C) Sondaj kuyusunda S-tipi sismik enerji üretimi …….....	477
10.10.8.7	Güralp System CMG-6TD sismometre ile sondaj lokasyonunda mikrotremor ölçümü. …….	478
10.10.8.8	Mikrotremor ölçümünde kullanılan 1 Hz'lik Sismometre ……..	478
10.10.8.9	A ve B; MASW, Re-Mi ve Downhole yöntemleri ile belirlenen S-tipi sismik hızların düşey değişimi ……...	479
Şekil 11.1	Barajların değişik açılardan sınıflandırılması ……..	484
Şekil 11.2	Barajlarda kullanılan terimlerin şematik kesitlerde gösterilmesi ……..	485
Şekil 11.3	Bir beton ağırlık barajı kesiti ……..	489
Şekil 11.4	Bir kemer baraj ve kesiti ……	489
Şekil 11.5	Beton kemer-ağırlık türü barajlara örnek; Fırat nehri üzerinde inşa edilmiş Karakaya Barajı ……..	490
Şekil 11.6.A	Antalya-Manavgat Çayı üzerinde, beton kemer türünde inşa edilen Oymapınar Barajına, akış aşağıdan bakış ……..	490
Şekil 11.6.B	Bir payandalı ağırlık barajının şematik görünüşü ……	491
Şekil 11.6.C	Elmalı II Barajı ……	491
Şekil 11.7	Toprak dolgu baraj türleri ve çeşitli kısımları ……..	493
Şekil 11.8	Kaya dolgu baraj türleri ve çeşitli kısımları ……..	493
Şekil 11.9	Keban ve Atatürk Barajı ……	495
Şekil 11.10	Vâdi şekli ve kısımları ……	500
Şekil 11.11	Barajların temelindeki su kaçaklarını önlemek için geçirimli bölgelere yapılan geçirimsiz perde enjeksiyonu ……	501
Şekil 11.12	Baraj yapılacak bir havzanın jeolojik yapı ve özelliklerine bağlı olarak değişen beslenme ve yağış alanları ……	502
Şekil 11.13	Tortul kayaçların süreksizlik yüzeyleri doğrultusunun baraj eksenine dik olması durumu ……	502
Şekil 11.14	Tabaka doğrultularının baraj eksenine paralel, eğimlerinin membaya doğru olduğu ve geçirimsiz katmanlar dikkate alınarak belirlenen ideal bir baraj yeri	503
Şekil 11.15	Tortul kayaçların doğrultusunun baraj eksenine paralel ve değişik yönde eğimli olması ……	504
Şekil 11.16	May Barajı ……	505
Şekil 11.17	May Barajı'nda kireçtaşının ayrışmasıyla oluşmuş kırmızı renkli toprak ile örtülü düdenlerden suların kaçması ……	506
Şekil 11.18	Keban Barajı sol yamaç Petek mağarasında mermerlerde yer alan karstik boşluklardaki su kaçakları ……..	506
Şekil 11.19	Keban Barajı rezervuarından, yer altı karstik boşlukları içinden kaçan suların sifon yaparak Keban Deresi sol yamacından çıkması ……..	506
Şekil 11.20	.A) Vayont beton-kemer barajı …….....	509
Şekil 11.20	.B) Vayont Barajı göl havzasında oluşan kütle hareketi ve oklar ile gösterilen kayma yüzeyi ……..	510
Şekil 11.20	.C) Vayont Barajı'nın 09 Ekim 1963 tarihinde memba (göl alanı) durumu ……..	510
Şekil 11.20	.D) Vayont Barajı ……	511
Şekil 11.20	E) Vayont Barajı görüntüleri ……..	511
Şekil 11.21	Alibey Barajı zemin kesiti ……..	516
Şekil 12.1	Bir tünelin başlıca kısımları ……	522
Şekil 12.2	Tünellerde açılan şaft uygulamasına örnek; Ambarlı atık su tünel şaftı ……	522
Şekil 12.3.A	Atnalı tipi eski bir tünelin en kesiti ve çeşitli kısımlarına verilen isimler ……..	523
Şekil 12.3.B	Daire-Atnalı tipli bir tünelin (üç parçalı) tipik ilerleme kesiti ……	525
Şekil 12.3.C	Tünel kazısı ……..	525
Şekil 12.3.D	Tünel üst yarı kazısı ve Önsüren'ler ……	526

		SAYFA
Şekil 12.3.E	Tünel alt yarı kazısı ……	526
Şekil 12.4.A	Kesitlerine ve yapılarına göre tünel ve galeri tipleri ……..	527
Şekil 12.4.B	Yeni (modern) ve eski tip tünel kesitleri ……	528
Şekil 12.4.C	Tünel açma makinası (TBM) montaj çalışmaları ……	530
Şekil 12.4.D	Tünel açma makinası (TBM) montaj çalışmaları, Yedikule tünel girişi ……	530
Şekil 12.4.E	Tünel açma makinası (TBM) ……..	531
Şekil 12.4.F	Aç-Kapa yöntemi ……	531
Şekil 12.4.G	İkitelli Sanayi 1. Metro İstasyonu-Raylı Sistem, tünel ve TBM montaj çalışmalarının yakından görünüşü ……	532
Şekil 12.5	Tabaka ile tünel doğrultusu ilişkisi ……	533
Şekil 12.6.A	Tünel ile tabakalanma ve fay zonu arasındaki ilişki ……..	533
Şekil 12.6.B	Fayların ve oluşturdukları farklı ezik zonların tünel stabilitesine menfi etkileri ..	534
Şekil 12.6.C	Derin deşilmiş eski bir vâdi yatağını dolduran genç, gevşek alüvyal zeminlerin tünel güzergâhında oluşturduğu stabilite bozuklukları ……..	534
Şekil 12.6.D	Tünel açılmadan önce kayaçlarda doğal gerilme durumu ……	535
Şekil 12.6.E	Yer altında açılan bir boşluk (tünel) çevresinde oluşan farklı gerilme bölgeleri .	536
Şekil 12.6.F	Dairesel kesitli (modern) tünelde, tünel açılırken oluşan sekonder gerilmelerin dağılışı ……..	536
Şekil 12.6.G	Kesitlerine göre köşeli (yamuk ve kare) ve at nalı tipli açılan eski tip tünellerde gerilmelerin aşırı yoğunlaştığı kesimler ……..	537
Şekil 12.7	Tünelin içerisinden geçeceği tabakaların durumuna göre tünele etkiyecek muhtemel yük ağılımı ……	538
Şekil 12.8	Tünel güzergâhının kıvrım eksen düzlemi ve tabaka doğrultusuna dik olması hâli ……	538
Şekil 12.9	Her iki yönden geçirimsiz birimlerden geçen tünel kazısında, bir akiferin kesilmesi sonucu yeraltı suyunun tüneli basması ve tünel boyunca boşalması	540
Şekil 12.10	Jeolojik koşulların kaya patlamasına etkisi ……	541
Şekil 12.11	Kiraz çekirdeği olayı ……	542
Şekil 12.12	Doğal havalandırma sistemi ……..	546
Şekil 12.13	Tünel kazısında üfleyici ve emici havalandırma sisteminin üstten görünüşü …	547
	12. Bölümün "Örnek, Uygulama ve Yorumlar"ına ait şekiller:	
12.2.A	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı mühendislik jeolojisi haritası …..	549
12.2.B	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı jeolojik-geoteknik zemin kesiti ..	550
12.2.C	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı "Sarıyer girişi" jeolojik-geoteknik zemin kesiti ……..	551
12.2.D	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı "Çayırbaşı girişi" jeolojik-geoteknik zemin kesiti ……	552
12.2.E	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinin Sarıyer girişi ……..	553
12.2.F	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli içinde, iç kaplama çalışmaları ……..	553
12.2.G	Sarıyer-Çayırbaşı arası Karayolu Tüneli İnşaatı Uygulama Projesi, Standart Tünel Tip kesiti ……	554
12.2.H	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde zayıf zeminler için uygulanan tünel tip kesiti ve bulon yerleri ……..	555
12.2.İ	İç kaplaması tamamlanmış, Sarıyer Karayolu Tüneli girişi ……..	556
12.2.J	Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli etrafındaki maksimum gerilmeler ……..	556
12.2.K	Analiz edilen Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde düşey yer değiştirmelerin dağılımı ……	557
12.2.L	Analiz edilen Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde yanal yer değiştirmelerin dağılımı ……	557
Şekil 13.1	İstanbul Boğazı ve Haliç çevresinin Jeoloji Haritası ……	561
Şekil 13.2	Unkapanı-Perşembe Pazarı arası Haliç zemin kesiti ……	562
Şekil 13.3.A	Taraması yeni yapılmış koyu renkli siyah Haliç dip çamuru ……	562
Şekil 13.3.B	Kuruduktan sonra gri renge dönüşmüş Haliç dip çamuru ……	563
Şekil 13.4	İstanbul, eski Taşkızak Tersanesi kuzeyi Haliç batimetrik haritası ve sondaj yerleri ……	564

		SAYFA
Şekil 13.5	Haliç Köprüsü ile 1995 yılında mansap tarafında yer alan ve daha sonra yeri değiştirilen Valide Sultan köprüsü (eski Galata Köprüsü) arasında Haliç'te yapılan sondaj çalışması ……	565
Şekil 13.6	YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bl., Geoteknik Anabilim Dalı laboratuarında, Haliç çamurunda yapılan sulu çamur sedimentasyon ve konsolidasyon deneyi ……	565
Şekil 13.7	Haliç çamurunda kireç kolonu yöntemi ile yapılan iyileştirme deneyi ……	566
Şekil 13.8	Haliç Adaları ile Alibey Deresi arası, boyuna zemin kesiti ve kesit güzergâhı ..	567
Şekil 13.9	Haliç çamurunda dip taraması yapan iş makinası ……	568
Şekil 13.10	Haliç çamuru depolama alanı ……	568
Şekil 13.11	Haliç çamurunun depolandığı "taş ocakları" ve yakın çevresinin jeoloji haritası	569
Şekil 13.12	Atık Tutma Barajı-II ……	570
Şekil 13.13	Atık Tutma Barajı-I ……	570
Şekil 13.14	Atık Tutma Barajı-I ……	571
Şekil 13.15	Dip çamuru taraması yapılmadan "Önceki Haliç" ……....	572
Şekil 13.16	Dip çamuru taraması ve çevre düzenlemesi yapıldıktan "Sonraki Haliç" ……..	572

TABLO LİSTESİ

		SAYFA
Tablo 2.1	Mohs Sertlik Skalası	38
Tablo 2.2	Schmidt Sertlik Çekici geri tepme sayısına göre kaya ve zeminlerin sınıflandırılması ……..	39
Tablo 3.1	Mağmatik kayaçların sınıflaması ve başlıca örnekleri ……..	52
Tablo 3.2	Metamorfik kaya türleri ……..	68
Tablo 3.3	Sedimenter kayaç türleri ……	76
Tablo 3.4	Çimentosuz kırıntılı sedimentlerde, zeminlerin dane boyutlarına göre zemin grupları ve bunlar için kullanılan semboller ……	77
Tablo 3.5	Divriği Ulu Câmii malzeme özellikleri ……..	90
Tablo 3.6.A	Kayalardaki ayrışma (bozunma) dereceleri ve tanımları ……	115
Tablo 3.6.B	Kayalardaki ayrışma (bozunma) dereceleri ve tanımları (ISRM, 1978) ……..	115
Tablo 3.7	Ayrışma derecelerinin farklı sınıflandırılmaları (Oteo, 2002) …..……	116
Tablo 4.1	Tabaka kalınlıklarına göre değişik sınıflandırmalar ……..	133
Tablo 4.2	Jeolojik Zaman Tablosu ……	153
Tablo 4.3	İstanbul Tersiyer çökellerinin tipik geoteknik parametreleri ……..	176
Tablo 6.1	Yeraltı sularının düşey dağılışı, zemin yüzeyinden zemin içine doğru oluşan zonlar ……	215
Tablo 6.2	Zeminler için tipik permeabilite katsayıları ……..	216
Tablo 6.3	Değişik zeminlerde yaklaşık kapiler yükselme ……..	216
Tablo 6.7.2	G.1) Antalya Travertenlerinin mühendislik özellikleri ……	250
Tablo 8.1	Kil içeriği kriterleri ……	310
Tablo 9.1	Kütle hareketlerinin genel sınıflandırılması ……	342
Tablo 9.6.6.	1) Şekil 6.6.6.1'deki haritada yerleri gösterilen sondajlardan 20.01.2012 tarihinde alınan inklinometre ölçümleri ……	396
Tablo 10.1	Kohezyonlu zemin ve kayaların sınıflandırılması ……..	422
Tablo 10.2	Birleştirilmiş zemin sınıflandırması ……..	427
Tablo 10.3	Süreksizlik yüzeylerinde pürüzlülük ve dalgalılık ……..	437

1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1. Kitabın Amacı

"*Mühendisler için Jeoloji Bilgileri*" adlı bu kitabın amacı; başta inşaat mühendisliği olmak üzere, jeoloji, jeofizik, jeodezi-fotogrametri ve uzaktan algılama, orman ve çevre mühendislikleri ile mimarlık, şehir ve peyzaj plânlama gibi uygulamalarında doğa etkilerini göz önünde bulundurmak zorunda olan uzmanlık dallarına, dünyamızın (yerküre) dinamiği ve bu dinamiğin mühendislik uygulamalarındaki etkisi hakkında genel bir bilgi tabanı sunmaktır. Dolayısı ile bu kitapta, söz konusu uygulamalı dalların karşılaşabileceği yerbilimsel sorunlarla ilgili olası konular, bölüm sonlarında "Örnek, Uygulama ve Yorumlar" ile birlikte ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

1.2. Jeolojinin Tanımı

Jeoloji (*Ge:* Yer + *Logos* = Bilim; *Geology* = Yer Bilimi), yerküreyi inceleyen, onun oluşum ve gelişiminden, fiziksel özelliği ve kimyasal bileşiminden, iç ve dış kuvvetler etkisi ile uğradığı değişikliklerden, canlıların ilk yaradılışlarından günümüze kadar geçirmiş oldukları gelişimlerinden (tekâmül, evrim) söz eden ve fiziksel çevremizin anlaşılması ve tanımlanması için gerçekleştirilen çalışmaları kapsayan tarihsel bir bilim dalıdır. Jeolojinin kapsadığı geniş ve çeşitli konular ayrı ayrı bilim dalları olarak sınıflandırılacak olunursa;

a) Mineraloji, Petrografi ve Maden Yatakları, yer kabuğunu oluşturan maddelerden, mineral, kayaç ve madenlerden; **jeokimya**, kayaç ve minerallerin kimyasal özelliklerinden (Öztunalı, 1973),

b) Genel Jeoloji, iç ve dış kuvvetlerin etkisi altında yer kabuğunda meydana gelen değişikliklerden (Akartuna, 1982; Ketin, 1998; Önalan, 2000),

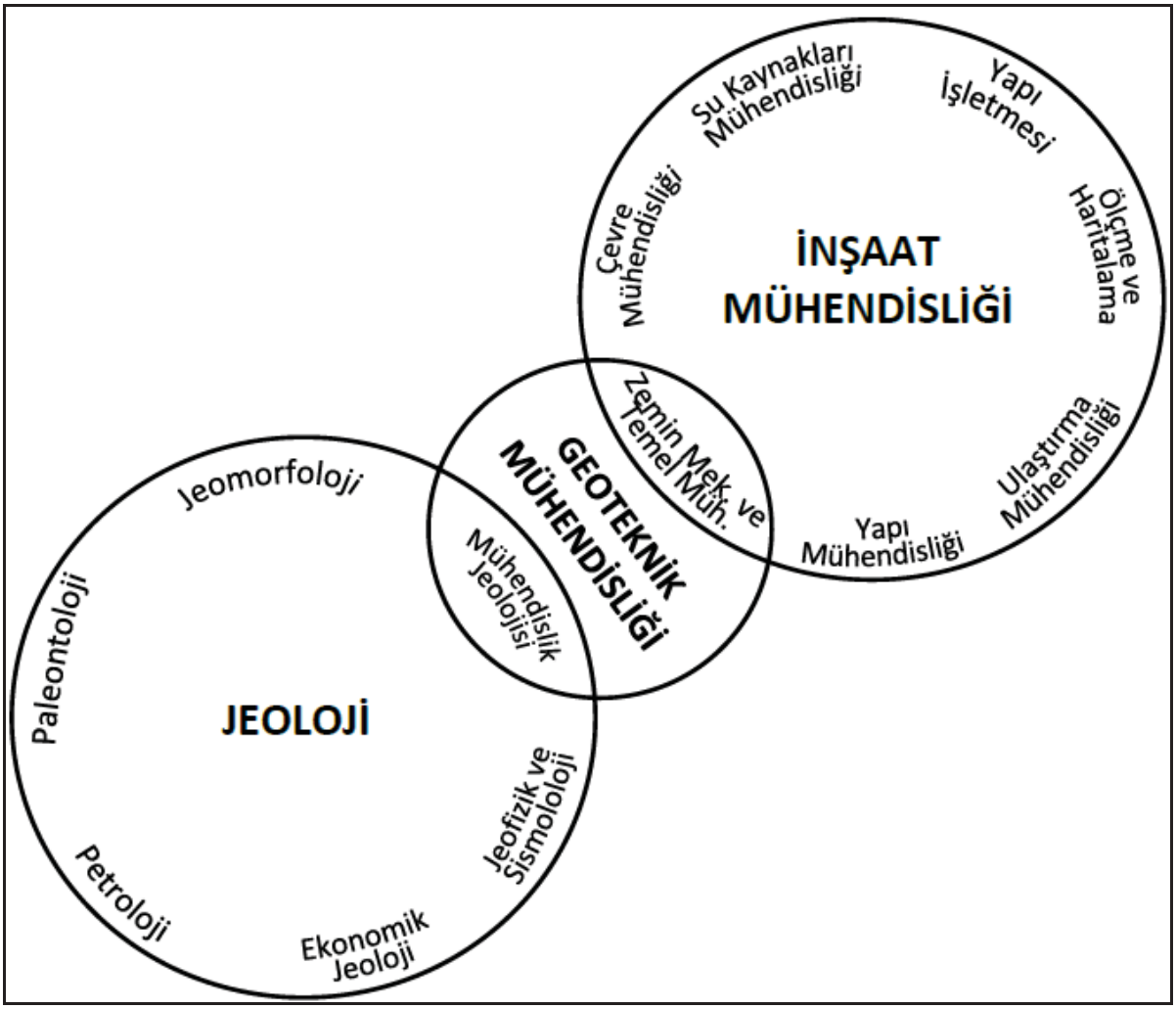
c) Yapısal Jeoloji, kayaçların geometrisinden (tabakalanma, kıvrım, fay, sill, dayk gibi jeolojik yapılar), küçük ölçekli yapıların orijini, oluşumu, sınıflandırılması, yayılımı, birbirleri ile olan ilişkilerinden (Yılmaz, Yiğitbaş, Yıldırım, 1987); **Tektonik**, dünyanın büyük ölçekli yapılarını yani litosferin yapısını, bu yapıyı doğuran evrimi araştıran ve bunları oluşturan kuvvet ve hareketlerinden (Yılmaz, Canıtez vd., 1983),

d) Historik (Tarihsel) Jeoloji veya **Arz Tarihi**, yer kabuğunun jeoloji devirlerinde geçirmiş olduğu koşullara bağlı olarak çeşitli olayları konumlayarak incelenmesinden (Baykal,1974); **Stratigrafi**, yer kabuğunda büyük boyutlu bir alan ya da bölgedeki kayaların nitelik, kalınlık, istiflenme, yaş, korelasyon ve yer tarihi (tortular ve tortul kayaçların ne zaman ve nerede oluştuğu) yönlerinden (Baykal, 1967); **Sedimentoloji**, farklı sedimenter kayaçların küçük zamansal ve alansal ölçeklerde kökeninin araştırılması, tanımlanması, sınıflandırılması, kayaçların ayrışarak taşınma, çökelme, yeniden taşlaşma süreçlerinin ve ürünlerinin, depolanma ortamlarının, fasiyesler ve çökelme yasalarının bilimsel incelenmesinden (Altınlı, 1986; Önalan, 1987/1988, 2000),

e) Paleontoloji, jeolojik zamanlar boyunca yaşayagelmiş canlı varlıkların evriminden ve bunların taşlaşmış artıklarından, fosillerinden (Dizer, 1983, 1985),

f) Bölgesel Jeoloji, bir ülkenin veya bir kıtanın jeolojik gelişmesinden (Yılmaz, Yiğitbaş, Yıldırım, 1987),

g) Uygulamalı Jeoloji veya **Tatbikî Jeoloji** *(applied geology)*; maden, petrol, yeraltı suyu jeolojisi, askerî faaliyetlerde jeolojinin uygulanması, mühendislik jeolojisi vb. özel uzmanlık konularından bahseder (Gürpınar, 1978; Altınlı, 1986; Eroskay, Kale, 1986; Erguvanlı, 1994; Karagüzel, Kılıç 2000; Vardar 2006; Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Jeoloji, geoteknik ve inşaat mühendisliği ilişkisi (*Coduto*, 1999'dan uyarlanmıştır).

Bu bilim dallarından ağırlıklı olarak i*nşaat jeolojisi* ve doğal yapı malzemesi jeolojisi konularından oluşan **Mühendislik Jeolojisi** *(engineering geology)*; jeolojik verilerin sayısal olarak belirlenmesi ve mühendislik problemlerinin çözümüne uygulanmasını sağlamakta, farklı türde mühendislik yapılarının yer seçimi, tasarımı ve inşaasında, ayrıca doğal ve insan kaynaklı âfetlerin değerlendirilmesinde ve zarar azaltma önlemlerinin tasarımında kaya *(rock)*, zemin *(soil)* ve hidrojeoloji *(hydrogeology)* ile ilgili jeolojik prensipleri mühendislik yaklaşımıyla birlikte uygulamaları olması nedeniyle de bilhassa inşaat ve geoteknik mühendisliğinde önem kazanmaktadır. Mühendislikteki uygulamalarda en önemli hususların başında ise sırasıyla; emniyet, ekonomiklik ve estetik gelmektedir.

1.3. Dünyanın Oluşumu, Yapısı ve Kitabın Diğer Bölümlerinin Konuları

Dünya gezegeni (yerküre), oluşumundan günümüze sürekli olarak bir yenilenme ve hareket içerisindedir. Bu yenilenme, yerkürenin sürekli olarak gelişmesini sağlamıştır. Bu açıdan yerküreyi sürekli olarak gelişen bir canlı olarak da görmek mümkündür. Dünya 4,5 milyar yıl önce, güneşin etrafında dönen ve güneşten arta kalan yoğun bir gaz ve toz bulutunun bir araya gelip oluşturduğu katı maddelerin çarpışıp akkor hâlinde bir kartopu gibi büyümesi ve zamanla soğumasıyla oluşmuştur.

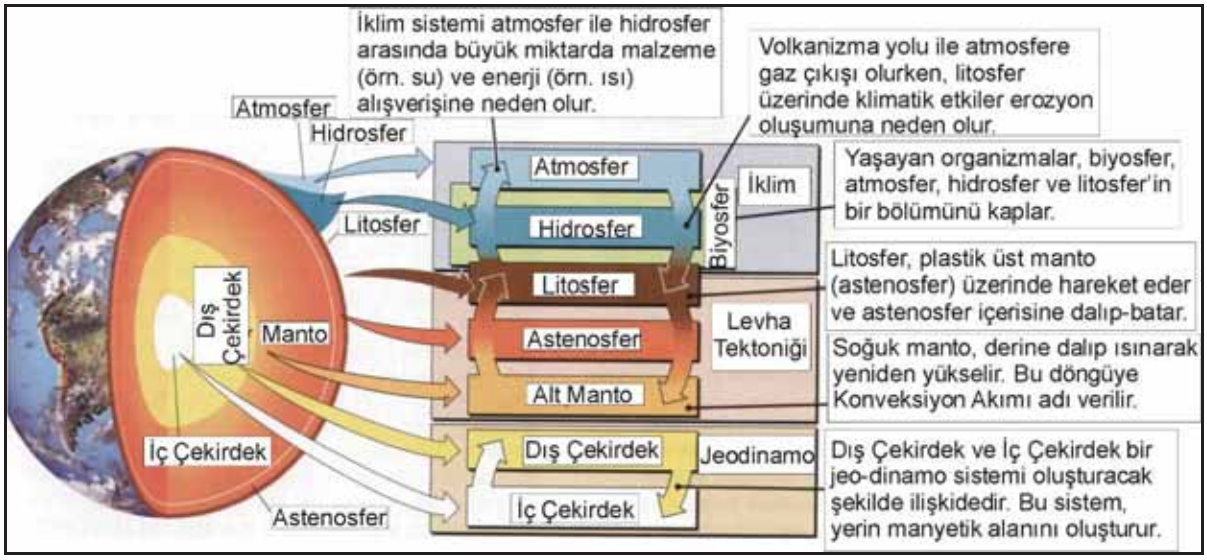
Bildiğimiz evren 13,7 milyar yıl önce sonsuza yakın sıcaklıkta-yoğunlukta, sıfır boyutlu ve sıfır hacimli enerji kökenli bir nur noktasının patlaması ile (Büyük Patlama, *Big Bang)* oluşmaya başlamış, giderek genişleyerek bilinen ve büyük çoğunluğu gözle ve mikro ölçekte görülemeyecek boyutta karanlık enerji+karanlık madde (% 95) yanında oluşan zaman içinde görünen ışık, madde, toz, gaz, yıldız, gezegenler ve kara delikler ile birlikte galaksi ve parçacıklarından oluşmuştur. 'Evrenler kümeleri' içinde oluşmuş 'evren parçası' içindeki uzayda, milyarlarca galaksi (gökada) yer almaktadır. Bu galaksilerden bir tanesi, dünyamızın ve güneş sistemimizin de içinde yer aldığı Samanyolu Galaksisi'dir.

Samanyolu Galaksisi (*Milky Way Galaxy*; Milchstraßensystem) içinde yer alan milyarlarca yıldızdan biri, yaklaşık 4,6 milyar yıl önce oluşan ekvatoral yarıçapı yaklaşık 696.000 km (109 Arz Yarıçapı) olan "Güneş"imizdir. Güneş; kütlece, yüzeyi ortalama % 70 Hidrojen ve % 28 Helyum'dan, % 2 kadar da C, N, O, Ca, Mg, Fe, Cr, Si vb. elementlerden oluşmaktadır. Güneş *(Sun)*, bize en yakın ve yüzeyini disk olarak görebildiğimiz tek yıldızdır. Güneş'in merkezi sıcaklığı 15 milyon, yüzeydeki sıcaklığı ise yaklaşık 5,5 milyon (°C) derecedir. Güneşin sıcaklık ve çekirdek (kor) olarak adlandırılan merkezindeki 150 gr/cm^3 olan yoğunluğu merkezden dışa doğru hızla azalmaktadır. Güneş yüzeyinin 200 bin km derinliklerinden itibaren dış yüzeyine kadar olan kesiminde (konveksiyon bölgesi), yoğunluk hızla azalmakta ve görünen yüzeyde bu yoğunluk sadece $2x10^{-7}$ gr/cm^3, yani yaklaşık deniz seviyesindeki havanın yoğunluğunun da onbinde birine (1/10.000) kadar düşmektedir (Oklay, 2006). Güneşin ortalama yoğunluğu ise 1,4 gr/cm^3 tür. Güneşin oluşumu sırasında etrafında geride güneş sistemi kütlesinden arta kalan yaklaşık % 2 gibi artık gaz ve tozdan ibaret güneş bulutsusundan da milyonlarca sene süre içinde yörüngedeki dönüş hareketleri esnasında bir araya gelip çarpışıp büyümeleri ve zamanla soğumalarıyla da gezegenler meydana gelmiştir.

Canlı varlıklara yaşam kaynağı olan Güneş, bünyesindeki hidrojen yakıtını yakmaya devam ederek ömrünün yarısını (~4,6 milyar yıl) tamamlamıştır. Güneş ve sistemi içinde dünya gezegeni olarak bilinen ve hemen hemen aynı yaşta, yani ~4,5 milyar yaşındaki dünyamızda da süregelen bu yavaş fakat sürekli işleyiş, jeolojik dönemlerin son on bin yıllık dilimini kapsayan kısa dönemini (Holosen), günümüz ile kıyaslayabilmek için günümüzdeki jeolojik olayları uzunca bir video filminin ortasında durdurulmuş bir sahneye benzetmek mümkündür. İşte yerbilimciler bir nevi bu durdurulmuş sahnedeki fotoğraf karesine bakarak, filmin oynamış olan kısımlarını, yani yerkürenin gelişimindeki geçmiş aşamaları ve filmin sonunu oluşturacak olan gelecekteki aşamalarını, bilimsel metodolojinin kuralları çerçevesinde belirlemeye çalışır. Bu belirlemenin doğru bir şekilde yapılması, yeryüzü üzerinde uygulamalar yapan mühendislik dallarındaki çalışmaların daha sağlıklı, etkin ve uzun ömürlü olarak kullanılmasını ve doğal dengeyi bozmamasını sağlayacaktır. Doğanın, jeolojik dönemler içerisinde çok yavaş olarak geliştiği düşünülse de bu evrimin, insanların âfet olarak adlandırdığı, bir katastrofik boyutu da bulunmaktadır. Genel olarak deprem, sel, fırtına, volkanik patlama, tsunami, heyelân gibi anîden gelişen bu büyük doğa olayları, herhangi bir yerleşimin olmadığı bir alanda doğal sistemin bir ürünü olarak gelişip bir zarara neden olmazken, yerkürenin dinamiği yeterince önemsenmeden yapılmış yerleşimlerin bulunduğu alanlarda ise kolaylıkla âfet boyutuna ulaşabilmektedir. Bu nedenle, yukarıda belirtilen uzmanlık dallarında yer alanların, yerkürenin dinamik yapısını iyi incelemeleri gerekmektedir.

Şekil 1.2'de özetlenmiş olduğu gibi yerküre, birbiri ile sürekli bir ilişki içerisinde olan sistemlerin (katmanlar) etkisi altında gelişimini sürdürmüştür. Bu sistemler genel olarak iki önemli süreç içerisinde kümelenmektedir. Bu süreçlerden ilki **atmosfer** (hava/gaz küresi, gaz tabakası, *atmosphere*), **hidrosfer** (su küresi, *hydrosphere*) ve **litosfer** (taş küresi; *lithos*=taş, *fer*=küre/dünya, *lithosphere*) ile bu üç sistemde yaşayan tüm canlıların yer aldığı biyosferin etkileşimini içeren iklim sistemi veya dış süreçlerdir. Yeryüzünü etkileyen ve atmosfer-hidrosfer-biyosfer kökenli etkiler olarak genelleyebileceğimiz bu süreçler, yeryüzündeki kayalar üzerinde daha çok ayrışma, erozyon, taşıma ve biriktirme türünde etkiler yaratırlar. Bu sistematik etkileri dışında dış süreçler; fırtına, sel, heyelân, çığ, yıldırım vb. anî (TDK,

1993) ve katastrofik boyutlardaki olayların da ana nedenini oluşturur. Yerkürenin gelişimindeki ikinci önemli süreç ise daha çok litosfer, astenosfer ve manto arasındaki ilişkilerden doğan levha tektoniği sistemi veya iç süreçler olarak tanımlanır. Bu sürece iç ve dış çekirdekler arasındaki döngünün bir sonucu olan jeodinamo sistemi de eklenir.



Şekil 1.2. Dünyada yer alan tüm katmanlar ve aralarındaki ilişki (*Press* vd., 2004).

Temelde, yerkürenin sıcak olan merkezi ile soğuk olan dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkından kökenlenen levha tektoniği sistemi, söz konusu farkın oluşturduğu ve merkezden dışa doğru gerçekleşen sıcaklık farkının manto malzemesi içerisinde oluşturduğu büyük konveksiyon akımları sayesinde etkinlik kazanır. Mantoda, konveksiyon akımları adı verilen bu büyük sistem, dünyanın (yerküre) en dış ve kırılgan olan litosfer adlı katmanında düşey ve yanal yönde önemli yer değiştirmelere neden olur. Jeolojik dönemler içerisinde bu hareketler sonucu, kıtalar birbirinden koparak, aralarında yeni okyanuslar gelişir veya okyanuslar kıtaların arasında yok olarak büyük dağ kuşakları oluşur. Bu süreçler, okyanuslar ve dağ kuşakları gibi jeolojik dönemler içerisinde çok yavaş olarak gelişen oluşumlarla kendini gösterebileceği gibi depremler ve/veya volkanik faaliyetler gibi anî oluşan katastrofik olaylara da sebep olabilmektedir.

Bu kitapta, yukarıda sözü edilen iç ve dış süreçler ile bu süreçlerin mühendislik uygulamalarındaki önemi hakkında bilgilere yer verilmiştir. Bu

konuların işlenmesinde, Şekil 1.2'deki modelde görülen sistemlere, insanın da yer aldığı biyosfer katının dinamiği merkezde tutularak değinilmektedir.

Kitabın diğer bölümlerinde bahsedilen konular şöyledir;

2. Bölüm: "Dünyanın İç Yapısı ve Levha Tektoniği, Yer Kabuğunu Oluşturan Maddeler ve Mineraller",

3. Bölüm: "Kayaçlar ve Ayrışma",

4. Bölüm: "Tabakalı Kayaçların Özellikleri, Stratigrafi, Faylar, Topoğrafik-Jeolojik Harita ve Kesitler",

5. Bölüm: "Yüzeysel Akış",

6. Bölüm: "Yeraltı Suları Jeolojisi",

7. Bölüm: "Kıyı ve Deniz Ortamları",

8. Bölüm: "Aktif Tektonik, Depremler, Sıvılaşma, Tsunamiler ve Türkiye Aktif Fayları",

9. Bölüm: "Kütle Hareketleri",

10. Bölüm: "Kayaçların ve Süreksizliklerin Mühendislikteki Önemi",

11. Bölüm: "Barajlar ve Baraj İnşaatlarında Jeolojik Kriterler",

12. Bölüm: "Tüneller ve Tünel İnşaatlarında Jeolojik Kriterler" ve

13. Bölüm'de ise "Haliç Islah Projesi Kapsamında Yapılan Jeolojik ve Geoteknik Çalışmalar"a ait konular yer almaktadır. Bu son bölümdeki mühendislik uygulamasında, Haliç Islah Projesi kapsamında, Haliç ve çevresinin jeolojik-geoteknik koşullarının belirlenmesi, taranan çamurun depolanacağı alanın mühendislik jeolojisi araştırmaları, çamur depolama sahasında inşa edilen barajların tasarımı ve depolama alanının uzun süreli davranışının analizi ile ilgili YTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerince gerçekleştirilmiş olan çalışmalar hakkında bir özet sunulmuştur.

2. BÖLÜM: DÜNYANIN (YERKÜRE) İÇ YAPISI, LEVHA TEKTONİĞİ, YER KABUĞUNU OLUŞTURAN MADDELER ve MİNERALLER

2.1. Giriş

Dünyanın gelişiminde etkili olan süreçlerden, birinci bölümde anlatılan jeodinamo ve levha tektoniği (plâka tektoniği, *plate tectonics*) sistemleri iç süreçler olarak tanımlanır. Bu sistemler temelde, sıcaklığın dünyanın merkezinden dışarı doğru göreceli olarak azalması ve buna bağlı olarak dünyanın iç çekirdeği ile üzerindeki katmanları arasında doğan sıcaklık farkından kaynaklanırlar. Söz konusu sıcaklık farkı, dünyanın dış çekirdek ve manto katmanlarında yer alan akışkan malzemelerin derinden yukarıya doğru hareket etmesine ve böylece **konveksiyon akımları** *(convection currents)* adı verilen büyük iletim sistemlerinin oluşmasına neden olurlar. Dış çekirdek, ağırlıklı olarak ergimiş demir elementinden oluştuğundan dolayı, bu alandaki konveksiyon akımları, mantodakine oranla çok daha hızlıdır. Elektrik iletkenliği yüksek olan ergimiş demir bileşenli dış çekirdekte oluşan bu hızlı konveksiyon akımları, iç ve dış çekirdeğin dönüş hızları arasındaki farklılığa da bağlı olarak katmanlar arasında doğal bir dinamonun oluşmasına neden olur. Jeodinamo sistemini oluşturan bu ilişki sonucunda, ekseni dünyanın ekseninden 11° lik bir farklılığa sahip olan doğal bir mıknatıslanma ve buna bağlı olarak da dünyanın manyetik alanı meydana gelir.

Konveksiyon akımlarının ikincisi ise daha çok silikat bileşenli mağmadan oluşan Manto tabakası içerisinde meydana gelir. Dış çekirdeğin ana bileşeni olan ergimiş demire oranla, elektriklenme ve akmaya karşı çok daha dirençli olan silikat bileşenli malzeme içerisinde gelişen konveksiyon akımları, bu bölümün temel konusu olan **levha tektoniği sistemini** oluştururlar. Levha

tektoniği sistemi çerçevesinde dünyada meydana gelen dinamik olaylar, jeolojik dönemler içerisinde kıtaların (levha parçaları) birbirlerine göre hareket etmelerine neden olur. Alman meteorolog *Alfred Wegener* (1880-1930) tarafından günümüzden yaklaşık yüz yıl kadar önce ortaya atılan "**kıtaların kayması**" teorisinin, daha sonraki çalışmalarla ortaya konulmuş olan temel hareket mekanizmasını oluşturan bu sisteme göre; litosfer ile astenosfer arasındaki ilişkiye bağlı olarak kıtalar birbirlerine göre uzaklaşmakta, yakınlaşmakta veya yanal yönde hareket etmektedirler. Bu hareketlerin sonucunda uzaklaşan kıtalar arasında yeni okyanuslar gelişirken, yakınlaşan kıtalar arasında kalan okyanuslar yok olmakta ve kıtaların çarpışma zonları boyunca büyük dağ kuşakları meydana gelmektedir. Dünyanın bu iç dinamiği sonucu, okyanuslar ve dağ kuşakları gibi jeolojik dönemler içerisinde çok yavaş olarak gelişen oluşumlar meydana gelirken, bu dinamik kendini ayrıca depremler ve volkanik faaliyetler gibi anî ve katastrofik olaylarla da göstermektedir.

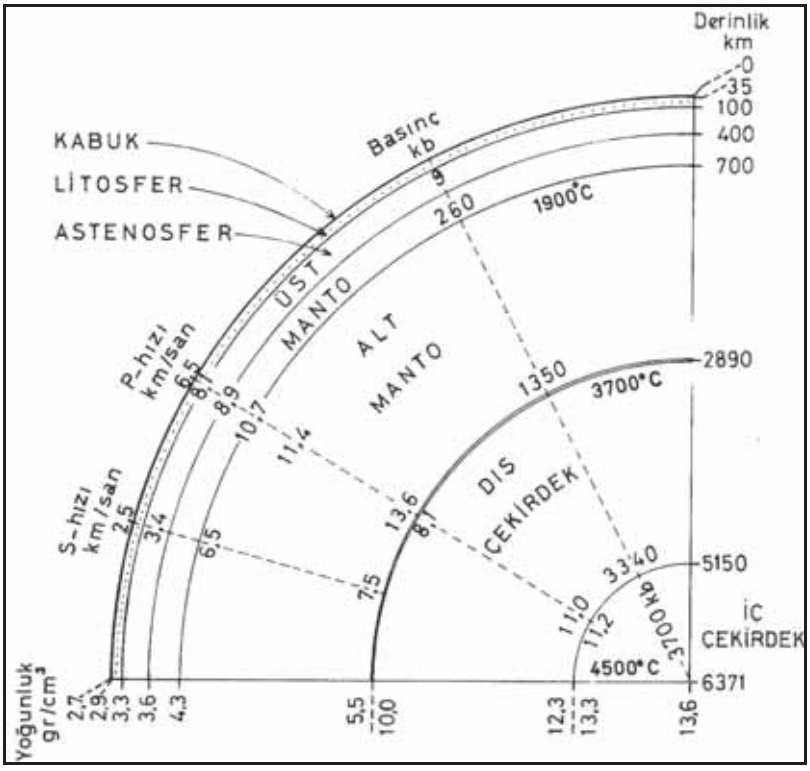
2.2. Dünyanın (Yerküre) İç Yapısı

Yerin şekli, geometrik yönden tam bir küre olmayıp, ekvator bölgesi yerin kendi ekseni etrafında dönmesi nedeniyle biraz şişkin, kutuplar bölgesi ise basıkçadır. Kutupları birleştiren eksen ile ekvatordan geçen çap arasında 42,77 km'lik bir boyut farkı vardır. Diğer bir deyimle, ekvator yarıçapı 6.378,14 km, kutuplar arası yarıçapı 6.356,75 km'dir. Ortalama olarak 6.371 km'lik bir yarıçapa sahip olan dünya, değişik fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip katmanlardan oluşur. Söz konusu katmanlar, yaklaşık yüz yıl kadar önce dünya çapında bir sismograf ağının kurulmasının ardından, bir titreşim hareketi olan depremler sırasında oluşan P ve S dalgalarının küresel anlamda kaydedilmesi sonucu belirlenebilmiştir. Hızları en yüksek, kayıt merkezlerine ilk gelen ve titreşim hareketi yayılma doğrultusunda olan P Dalgası (primer, boyuna dalgalar) ile hızları P'ye nazaran daha az, titreşim hareketleri yayılma doğrultusuna dik düzlem üzerinde aşağı-yukarıya ve sağa-sola doğru olan yıkım etkisi yüksek S Dalgası (sekonder, enine dalgalar) ve P, S dalgalarına kıyasla hızları daha az, periyotları daha büyük, boyları daha uzun ve kayıt merkezine en son gelen dalgalardan olan ve yüzeyde ciddî problemlere neden olan Yüzey Dalgaları, deprem sırasında oluşan sismik dalgalardır (bk. 8. Bölüm).

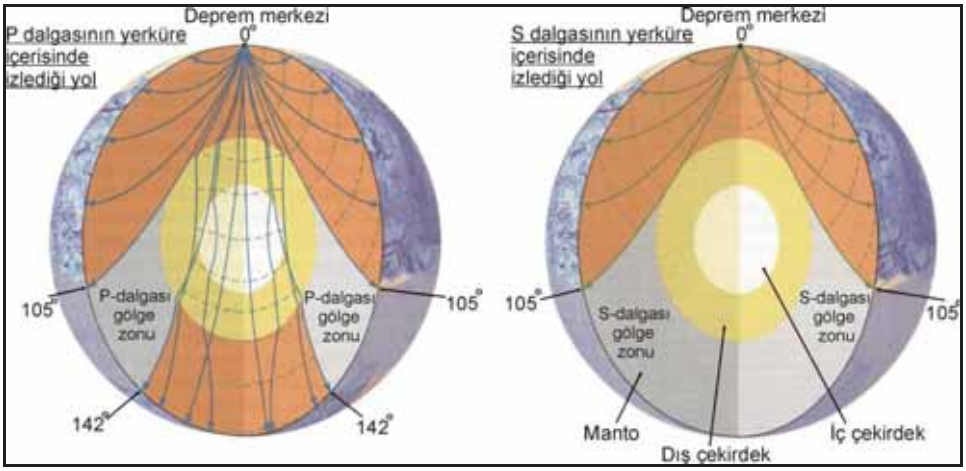
Bu dalgalara ait ilk ölçümler sırasında, P dalgasının manto ile dış çekirdek ara yüzünde kırılmasından dolayı deprem üst merkezi ile dünya küresel ölçeğinde yaklaşık 105° ile 142° açı yapan (deprem merkezinin yüzeydeki izdüşümüne 'üst merkez-episantr' yaklaşık 11.570 km ile 15.570 km arası uzaklıkta) sismograf istasyonlarında hiç kaydedilememektedir. S dalgaları da sıvı dış çekirdek içine giremediği için, 105° den itibaren tamamen yani episantrdan yaklaşık 11.570 km uzaklıktan itibaren sönümlenmektedir. Hâlbuki P dalgası >142°den itibaren kürenin her iki yarısında tekrar kaydedilmektedir (Şekil 2.2). P ve S dalgalarının kaydedilemediği ve bu nedenle "gölge zonları" *(shadow zones)* olarak adlandırılan bölgelerin oluşması nedeniyle dünyanın çekirdeği olduğu sonucuna varılmış ve S dalgaları sıvı ortamdan geçemediklerinden dolayı dünyanın dış çekirdeğinin sıvı nitelikte olduğu düşünülmüştür. Bu sonuç, söz konusu dalgaların yer altında değişikliğe uğruyor olduğunun ve dolayısıyla yer altında bu değişikliği yaratabilecek bazı katmanların bulunması gerektiği sonucunun ortaya çıkmasını sağlamıştır. Daha sonra yapılan ayrıntılı sismolojik çalışmalar sonucunda, çekirdeğin sıvı olan dış katmanı içerisinde katı bir iç çekirdeğin bulunduğu belirlenmiştir. Sismograf istasyonlarının sayılarının artması ve laboratuar ortamlarında yapılan deneysel *(experimental)* çalışmalar, dünyanın oluşturduğu katmanları ve bunların sismik (deprem veya yer titreşimine ilişkin) özelliklerinin daha da detaylı olarak anlaşılabilmesini sağlamıştır. Bu çalışmalara volkanik kayaçlar üzerinde yapılan araştırmalar ve astronomi araştırmalarından elde edilen verilerin de katılması ile katmanların fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında da bilgi edinme imkânı bulunmuştur. Söz konusu araştırmaların sonuçlarına göre; dış çekirdek yeryüzünden 2.891 km (~2.890 km) derinlikten itibaren başlamakta ve bu derinlik dış çekirdek ile üzerinde yer alan Alt Manto sınırını teşkil etmektedir. Alt Manto-Dış Çekirdek arası bu sınıra **Gutenberg Süreksizliği** denmektedir. Burada; cisimlerin fiziksel durumlarında büyük değişiklik olmakta, yoğunluk 5,5 gr/cm^3 ten 10 gr/cm^3 e yükselmekte, P-dalgalarının hızı 13,6 km/sn'den 8,1 km/sn'ye düşmekte, sismik S-dalgaları ise sıvı ortam nedeniyle bu sınır bölgesini geçememekte (ihmal edilebilir düzeyde) ve dış çekirdek içine girememektedir. Dünyanın 2.891 km derinlikten itibaren başlayan ve dünyanın jenarötürü ve kuzey-güney kutbu oluşturarak manyetik alan üretme (örn. Kutup Daireleri içinde yer alan kuzey/arktik ve güney/antarktik kutup ışıkları, *auroras*) görevini üstlenen **dış**

çekirdek, 2.891 km ilâ 5.150 km derinlikler arasında yer almakta ve sıvı (ergimiş) akışkan nitelik taşımaktadır. **İç çekirdek** ise yaklaşık 5.150 km ilâ yerin merkezini oluşturan 6.371 km derinlik arasını oluşturur. İç çekirdek, 4.500°C – 6.000°C arası yüksek sıcaklık ve yeryüzüne nazaran birkaç milyon kata ulaşan yüksek basınç etkisiyle katı özelliğindedir. Manyetizma, manto akımları, kıtalar yani dünyayı şekillendiren, onu canlı kılan mekanizmanın merkezi ya da kalbi, dünyanın çekirdeğidir.

Demir ve nikel gibi dünyanın merkezinde yer alabilecek kadar yüksek yoğunluğa sahip elementlerden oluşan çekirdeğin etrafı, yaklaşık 2.890 km kalınlığındaki ve içinde konveksiyon akımlarının gözlendiği iki kısımdan oluşan **manto** katmanı (yaklaşık 35-40 km ilâ 2.891 km arası) ile kaplanmış durumdadır (Şekil 2.1). Mağnezyum ve demir elementlerince zengin iki silikat türü olan olivin ve piroksenin ana bileşen olduğu peridot ailesi kayaçlar, mantonun temel kayaç grubunu oluştururlar. Derine doğru inildikçe söz konusu mineraller, basıncın artmasına bağlı olarak daha yoğun-sıkı bir kristal yapısına sahip olurlar. Olivin kristallerindeki bu değişim, manto içerisindeki sismik dalga yayınım hızının da artmasına neden olur. (Şekil 2.1 ve 2.2).



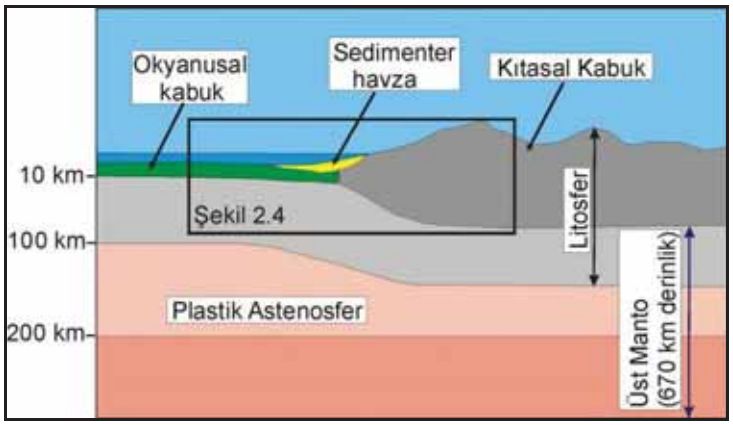
Şekil 2.1. Dünyanın kesiti (Ketin, 1998).



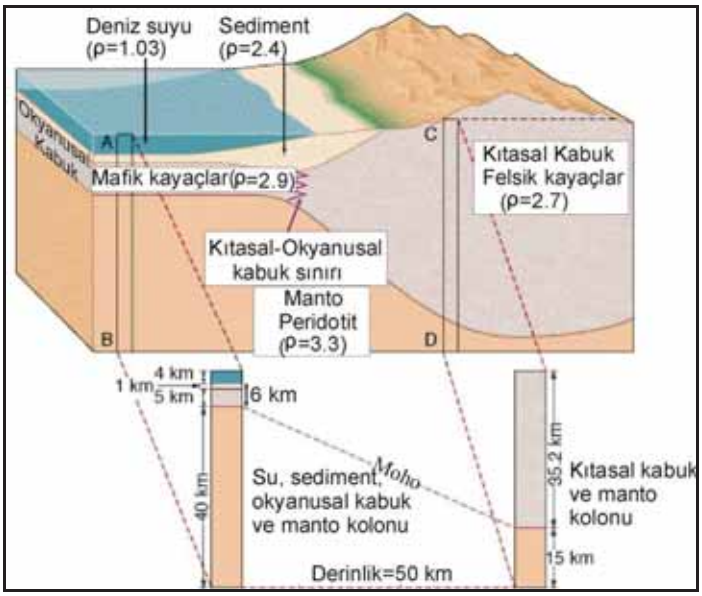
Şekil 2.2. Sismik "P" ve "S" dalgalarının dünya içerisindeki yayınımları ve gölge zonları (*Press* vd., 2004).

Alt mantoda sismik dalga hızları, alt manto ile altında yer alan sıvı nitelikli dış çekirdek arasındaki sınırda anî değişiklikler gösterir. Dış çekirdeğin üstünde, yeryüzünden 700 km ilâ 2.891 km (Gutenberg Süreksizliği) derinlikler arasında yer alan **alt manto** göreceli olarak daha homojen bir davranış gösterir ve alt manto üzerindeki kesim ise **üst mantoyu** (yaklaşık 35 km ilâ 700 km arası) oluşturur (Şekil 2.1, 2.3). Yeryüzünden 100 km ilâ 400 km derinlikler arasındaki "muhtemelen 700 km derinliğe kadar da uzanabilen" üst mantonun üst kesimlerini oluşturan oldukça plâstik zona **astenosfer** (=yumuşak küre) adı verilir. Astenosferin üzerinde, yer kabuğunun üst katmanında 100 km kalınlığındaki **litosfer** ve litosfere ait katı özellikte kıtasal ya da okyanusal kabuk bulunur. Yer kabuğunun ortalama kalınlığı kıtaların altında (asidik kökenli **kıtasal kabuk- Sial**) ortalama 40 km (maksimum 90 km), okyanusların altında (bazik kökenli **okyanusal kabuk**) 5 km ilâ 10 km arasındadır ve bazalt bileşimli bazik kayaçlardan oluşur. Okyanusal kabuğa oranla daha kalın olan kıtasal kabuk, genelde felsik kayaçlar olarak adlandırılan yüksek silikat içerikli bileşime sahip kayaçlardan oluşur (örn. granit, *granite*). Daha ince olan okyanusal kabuk (bazalt bileşimli bazik kayaçlar) ile kıtasal kabuğun derin bölümleri, mafik kayaçlar (Sima) olarak adlandırılan demir ve mağnezyum elementlerince zengin kayaçlardan oluşurlar (örn. gabro; Şekil 2.4). Litosfer içerisinde 2,7 gr/cm^3 yoğunluğundaki yer kabuğunu oluşturan kıtasal kabuk (Sial) ile litosferik manto arasındaki sınırı, sismik dalga hızlarının anîden arttığı ve **Mohorovicic Süreksizliği** (kısaca: *Moho*, *Mohorovičić discontinuity*) olarak adlandırılan bir zon oluşturur (Şekil 2.4). Kıtasal kabuğun alt sınırını belirleyen Moho

süreksizliği sınırı altında cisimlerin yoğunluğu 2,7 gr/cm^3 ten 3,2/3,3 gr/cm^3 e ve sismik P-dalgalarının hızı 7,2 km/sn'den 8,1 km/sn'ye yükselir.



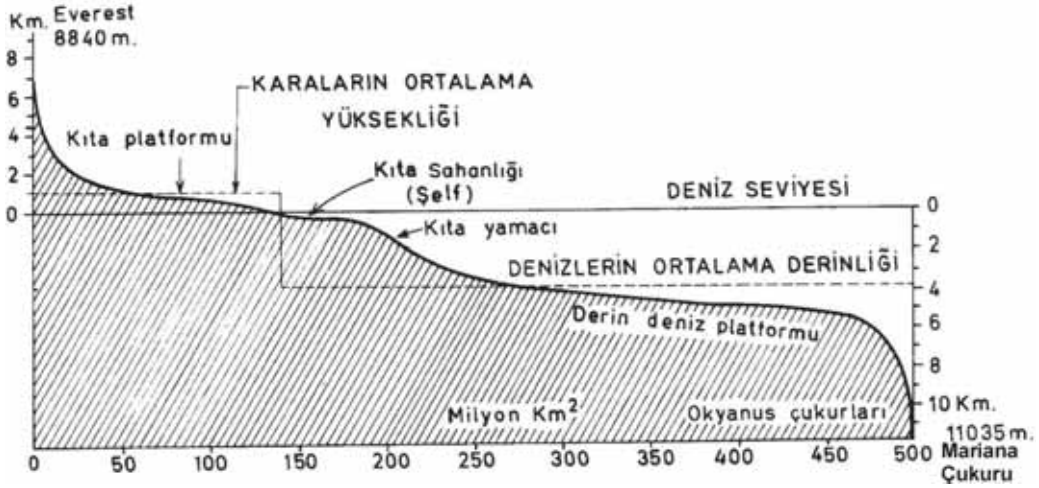
Şekil 2.3. Üst manto ile üst mantonun üst tabakalarını oluşturan astenosfer, litosfer ve litosferin en üst katını oluşturan kıtasal (~40km-70km) ve okyanusal (~5km-10km) kabuk. Okyanusal kabuk ve açık gri renkle gösterilen yaklaşık 100 km kalınlığındaki okyanusal litosfer ile kıtasal kabukla birlikte altında yer alan 150 km kalınlığındaki kıtasal litosferler, levha (plâka) olarak adlandırılırlar ve dalma-batma zonlarında hareket eden plâstik Astenosfer üzerindeki yitim zonlarını oluştururlar. Dikdörtgen içerisindeki alan ise Şekil 2.4.'ü temsilî olarak ifâde etmektedir.



Şekil 2.4. Litosferin ortalama ilk 50 km'lik bölümü içerisinde kıtasal-okyanusal kabuk ve altında yer alan litosferik manto (yoğunluklar gr/cm^3 birimindedir).

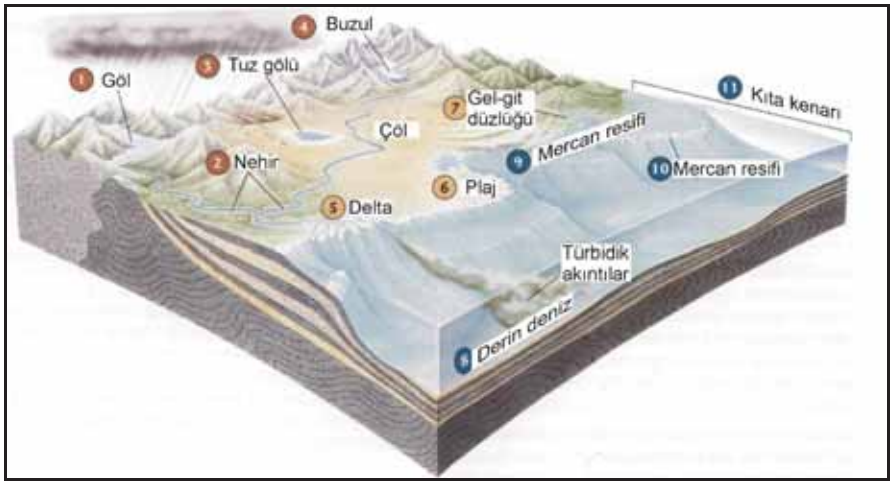
Kıtasal kabuk, okyanusal kabuğa nazaran daha az yoğundur. Zira kabuk ergimeleri ve katılaşmaları ne kadar tekrarlanırsa, bazik ortam ve yoğunluklar da o derece azalma gösterir. Bu nedenle, **asidik** (felsik) kayaçlarca zengin olan kıtasal kabuğun yoğunluğu yaklaşık 2,7 gr/cm^3 iken, demir ve mağnezyum gibi

yoğun elementlerden oluşan bazik (mafik) kayaçları daha fazla bünyesinde barındırmakta olan okyanusal litosferik kabuğun yoğunluğu yaklaşık olarak 2,9 gr/cm^3 tür. Kabuğun bu iki faklı parçası, yoğunluğu 3,3 gr/cm^3 olan ve peridotitlerden oluşan litosferik manto üzerinde yer alırlar. Daha düşük yoğunluklu olan kıtasal kabuk, genel olarak 40-45 km'lik kalınlığı ile okyanusal kabuktan çok daha büyük bir hacme sahiptir. Yoğunlukları birbirinden farklı olan bu iki farklı tür kabuk, sahip oldukları kalınlık farkının, yoğunluk farkını dengelemesi nedeniyle yan yana durabilirler. Farklı kalınlık ve yoğunluğa sahip olan okyanusal ve kıtasal kabuğun manto üzerinde bir denge hâlinde yan yana durabilmesine izostazik denge adı verilir. Bu dengenin yeryüzündeki etkisine bakılacak olursa yoğun ve ince olan okyanusal kabuk, az yoğun fakat kalın olan kıtasal kabuğa göre daha alçak alanları oluşturur. Söz konusu alçak alanlar deniz düzeyinin altında yer aldıklarından dolayı su ile kaplıdır ve coğrafik olarak okyanusları oluştururlar. Buna karşın, kalın kıtasal kabuğun yer aldığı bölgeler, yeryüzündeki dağ kuşaklarını meydana getirir. Bu iki bölgenin arasındaki geçiş zonları ise düşük yükseltideki düzlükleri veya denizleri oluşturur. Ortalama deniz yüzeyine göre arazi biçim ve yükseklikllerinin topoğrafik ölçülüp haritalanarak gösterilmesi olarak tanımlanan **Hipsografik eğri**, Şekil 2.5'de görüldüğü üzere yüzey şekli profili, en yüksek noktası **Everest Tepesi** ve en alçak noktası **Mariana Çukuru** olan yüksek dağ kuşakları, alçak düzlükler, kıyı, şelf düzlüğü (=kıta sahanlığı), kıta yamacı (kıta şevi, *continental slope*) ve derin deniz düzlüklerinden oluşan bir görünüm sunar (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Yeryüzünün hipsografya profili (*hypsography of the Earth*; Ketin, 1998).

Dünyanın en üst katmanlarını sıvı ve gaz hâllerinde bulunan hidrosfer ve atmosfer katları oluşturur. Biyosfer olarak adlandırılan ve içerisinde insanın da yer aldığı bölüm ise litosfer de dâhil olmak üzere her üç katmanı da kapsar. Atmosfer ve hidrosfer kaynaklı faktörler litosfer ve astenosfer katmanlarında meydana gelen tektonik aktivitenin oluşturduğu temel yeryüzü şekillenmesi üzerinde ayrıştırıcı, aşındırıcı, taşıyıcı ve biriktirici etkiler yaratırlar. Böylece levha tektoniği sistemi altında gelişen yüksek dağ kuşakları ve alçak okyanus tabanları, iklim sistemi tarafından kontrol edilen atmosferik ve hidrosferik ayrıştırıcılar, aşındırıcılar-taşıyıcılar (nem, sıcaklık farkı, yağmur, buzul, rüzgâr) tarafından aşındırılıp alçaltılmak veya doldurulup yükseltilmek suretiyle dengelenmeye çalışır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Yeryüzündeki taşıyıcı unsurlar ve çökelme ortamları (*Press* vd., 2004).

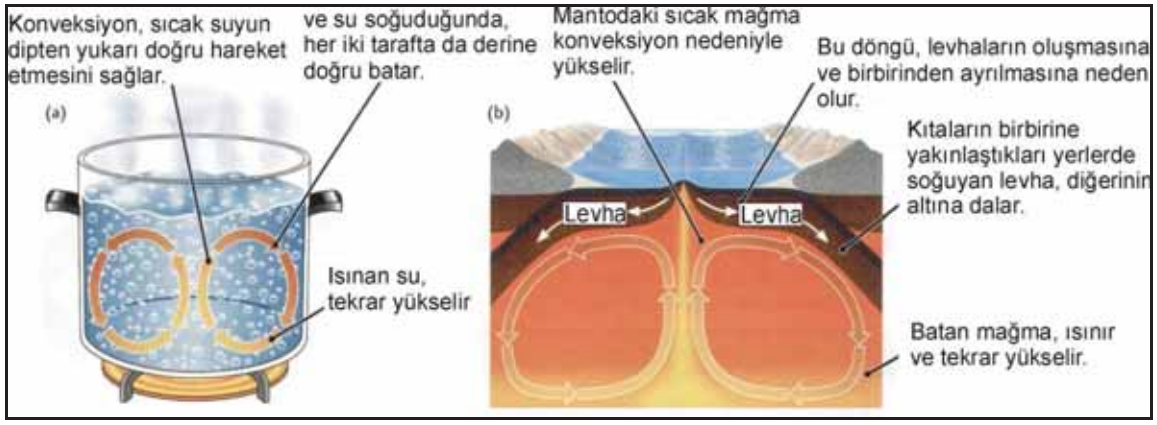
2.3. LEVHA TEKTONİĞİ (1)

(Konveksiyon Akımları ve Levha Kavramları)

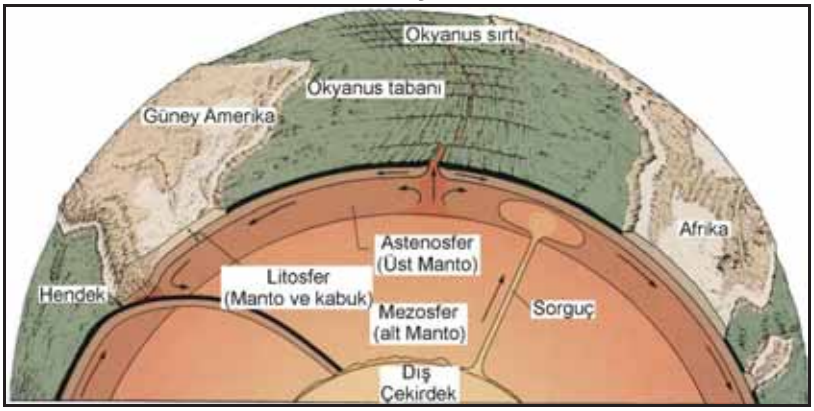
Yeryüzünde etkilerini gözlemlediğimiz litosfer ve astenosfer arasındaki levha tektoniği sisteminin kökeninde, dünyanın sıcak olan merkezi ile soğuk olan dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve suyun varlığı yatmaktadır. Yer kabuğunda derinlere doğru inildikçe, sıcaklık yükselmektedir. Tektonik plâka sınırları dışında; yerküresinde sıcaklığın 1°C yükselebilmesi için, yeryüzünden inilmesi (m olarak) gereken derinliğe **jeotermik derece** *(geothermal gradient)* denir. Kıtasal litosferdeki sıcaklık artışı yeryüzünden derinlere doğru inildikçe her 1 km'de ortalama 30°C artar, daha derinlere doğru ise bu sıcaklık artışı rijit

litosferin altında yer alan akıcı-plâstik astenosfer sınırından itibaren km başına gittikçe azalan bir artış gösterir. Yer içinde oluşan ısının yaklaşık % 50-70'i manto ve çekirdek tabakasındaki radyoaktif parçalanma (bozunma) süreçleriyle, geri kalanı ise dünyanın ilk oluşumundan arta kalan ısıdan oluşmaktadır.

Sıcaklık farkı mantonun plâstik davranış gösteren bölümünde, kaynayan bir suyun ısısını bırakmak üzere soğuk alana (yukarıya) doğru hareket etmesine benzer (Şekil 2.7.a), yukarıya doğru göçüne neden olur (Şekil 2.7.b). Bunun ardından yukarıda soğuyan malzeme aşağı doğru batar ve bu hareketler bir döngünün oluşmasına neden olur. **Konveksiyon akımı** (ısı transferi) adı verilen mantodaki bu büyük döngü litosferdeki hareketin kökenini oluşturur. Litosfer, dünya (yerküre) içerisindeki konveksiyon akımlarının etkisi ile parçalara ayrılır. Ayrılan her bir parça üzerindeki kıtasal kabuğu da birlikte taşıyarak astenosfer üzerinde birbirine göre farklı yönlere kayarak hareket eder. Bu hareketin hızı yılda yaklaşık 5 cm'yi bulmaktadır. Bunun günümüzdeki en önemli örneğini Afrika ve Güney Amerika arasında yer alan Atlantik Okyanusu oluşturmaktadır (Şekil 2.8).

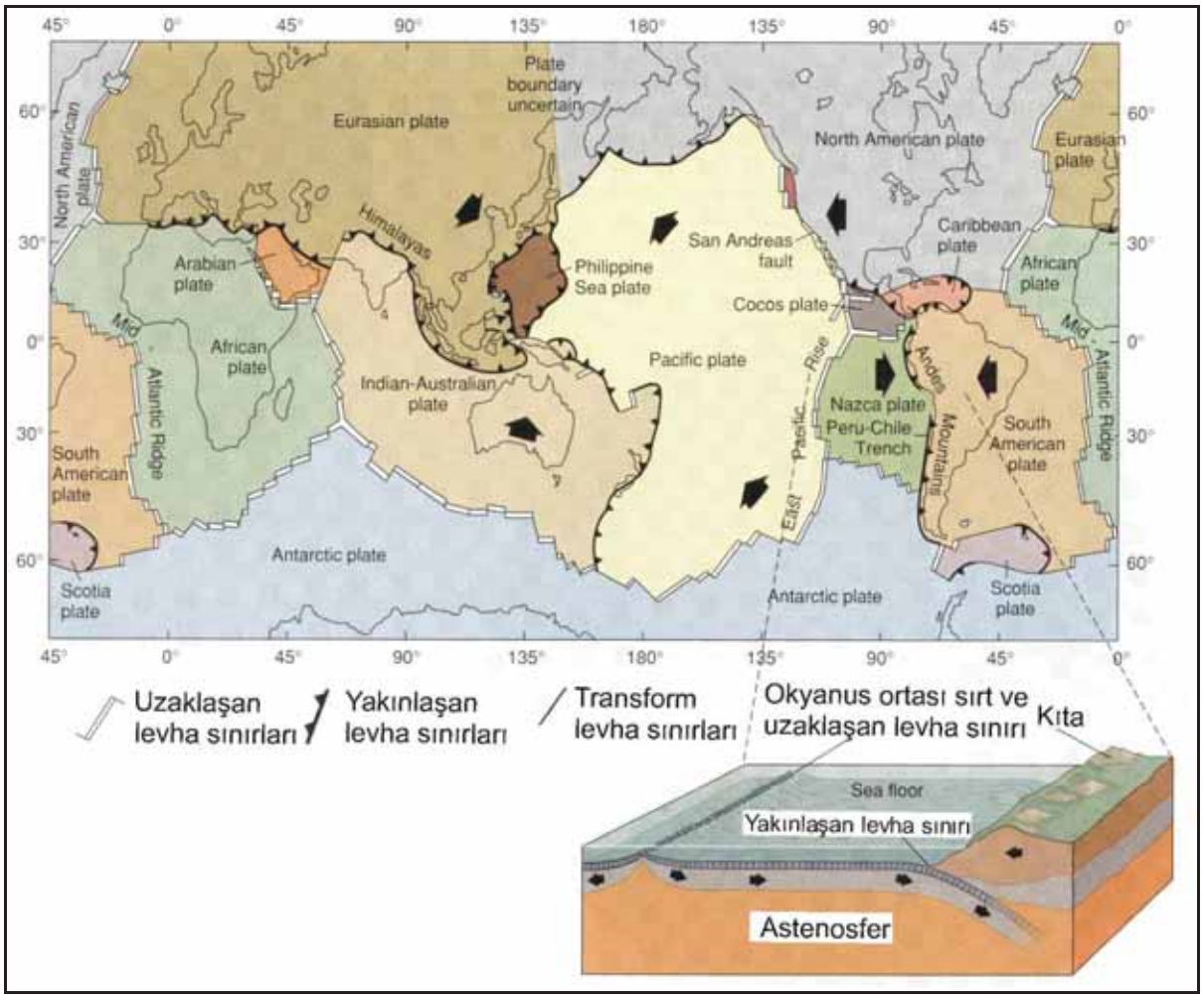


Şekil 2.7. Konveksiyon akımları ve oluşum mekanizması (*Press* vd., 2004).



Şekil 2.8. Astenosfer üzerinde kayan litosfer parçaları 'levhalar' (*Hamblin* ve *Cristiansen*, 2004).

Litosferin ve litosfere ait üst kısmında yer alan kıtasal kabuk ile birlikte, astenosfer üzerinde birbirlerinden bağımsız olarak farklı hız ve yönlerde hareketlere sahip parçaların adına **levha** adı verilir. Yerküredeki başlıca levhalar, Amerika (Kuzey Amerika ve Güney Amerika); Avrasya (*Eurasian plate*); Afrika; Antarktika; Hint-Avustralya ve sadece okyanusal kökenli kayalardan (okyanusal litosfer) oluşan Pasifik Levhası'dır. Yeryüzü toplam 13 adet büyük ve bunların dışında Nazka, Karayip, Arap ve Anadolu Levhası gibi daha küçük boyutlu pek çok levhalardan (plâkalardan) oluşan bir mozaik yapıdadır. Türkiye'nin büyük bir kısmı Anadolu Levhası içinde yer almakta, kuzey ve doğusu Avrasya, güneydoğusu Arabistan ve güneybatısı da Afrika Levhası (plâkası) ile sınırlanmaktadır (Şekil 2.9). Levha adı verilen litosfer parçalarının birbirlerine göre oluşturdukları bu hareketlerin sonucunda meydana gelen olaylar yerbilimlerinin "**levha tektoniği**" (plâka tektoniği) adı verilen bilim dalının inceleme konusu içerisinde yer almaktadır.



Şekil 2.9. Yeryüzünü oluşturan litosfer parçaları, levhalar (*McGeary* vd., 2004).

2.4. LEVHA TEKTONİĞİ (2)

(Levha Hareketleri, Sınırları, Kıta ve Okyanus Oluşumları)

Astenosfer üzerinde yerkürenin dinamiğine bağlı olarak hareket eden levhaların sınırlarında uzaklaşma, yakınlaşma ve yanal yönde (yapı değişikliği-transform) hareketler gelişir.

Uzaklaşan levha sınırlarındaki evrim, konveksiyon akımlarının yukarı ve zıt yönlerdeki hareketiyle litosfere doğru yapmış olduğu basıncın litosferde bir gerilme ve domlaşma meydana getirmesi ile başlar. Söz konusu gerilme ve domlaşma, litosferin kırılıp parçalara ayrılarak birbirlerinden uzaklaşmaya başlayan yeni levhalara bölünmesine neden olur. Litosfer, konveksiyon akımları ve levhalar arasındaki etkileşim nedeni ile kayarak birbirlerine zıt yönde iki yana doğru açılır ve açılma sınırı boyunca tabanda oluşan boşluk, yükselen mağma ile doldurulur. Levhaların birbirlerinden ayrılmaları devam ettikçe iki levha arasında gittikçe genişleyen bir çöküntü alanı (rift vâdisi) gelişmeye başlar. Okyanuslaşmanın başlangıç evresini oluşturan ve her iki yana doğru açılmaya başlayan vâdilerde oluşan kırık ve graben zonlarına **rift** denir. **Uzaklaşan** ya da **diverjan levha sınırı** *(divergent plate boundary)* adı verilen bu sınırlar boyunca levha daha küçük parçalara ayrılır ve yeni levhalar söz konusu sınırlar boyunca birbirlerinden uzaklaşırlar. Bu hareketin ileri evrelerinde, oluşan derin vâdiler okyanus suyu ile dolar ve vâdi tabanında mağma tarafından doldurulan boşluk genişleyerek, yoğun malzemeden oluşan okyanusal nitelikte bir kabuğun oluşmasına ve yeryüzünde yeni bir okyanusun oluşumuna neden olur.

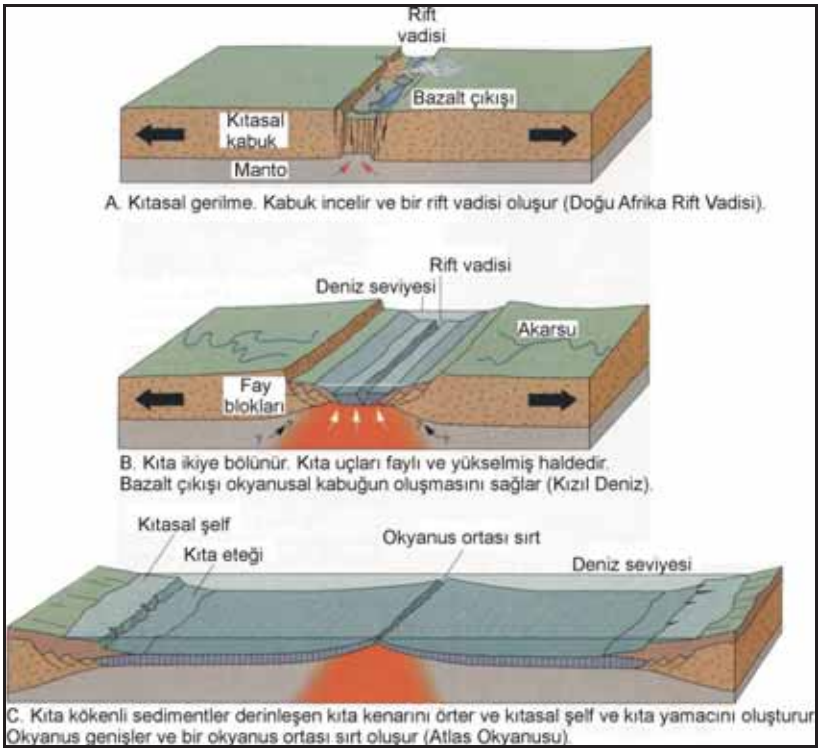
Günümüzde hâlâ açılmakta olan Kızıldeniz Rifti (açılma kuzey kesimlerde yılda 0,8 cm, güney kesimlerde yılda 1,6 cm), Aden Rifti, Afrika ve Arap Levhaları'nı birbirinden koparacak kadar gelişmiştir. Rift vâdileri Kızıldeniz ortasından güneyde Aden Körfezi'ne ve karada açılmaya devam eden Afrika Boynuzu'nu oluşturan Cibuti-Etiyopya-Kenya boyunca gelişen Doğu Afrika Rifti'nin her

üçünün kesişme noktası olan Cibuti civarında yer almaktadır. Üç yönde açılma oluşamayacağından, bu üçlü riftin bir tanesi Afrika Kıtası'nın kuzeye ilerlemesini devam ettirmesiyle milyon senelerle ifâde edilebilecek bir zaman sonrasında tekrar kapanıp körelecektir (muhtemelen Kızıldeniz Rifti). Diğer ikisi ise gelişimlerini, yani okyanus olma yolunda riftleşmelerini sürdürmeye devam edeceklerdir.

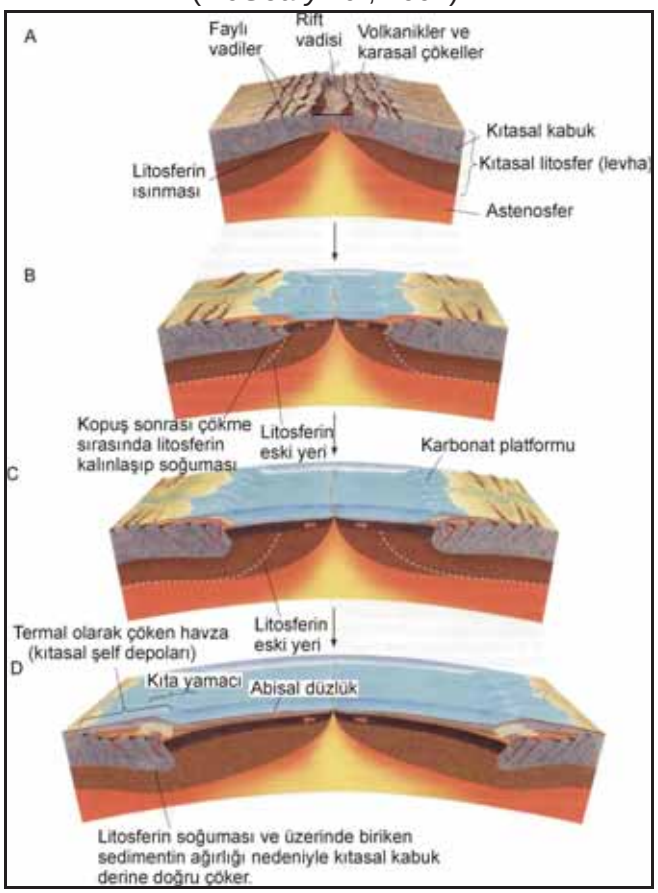
Riftleşmenin devam etmesiyle uzaklaşan levha sınırları ve okyanus gelişimi ile ilgili olarak yeryüzündeki diğer bir örnek, Afrika ile Amerika arasında bulunan gelişimine yaklaşık 200 milyonu aşkın yıldır devam eden Atlantik Okyanusu'dur.

Okyanusların oluşumu ve gelişimi uzaklaşan levha sınırları boyunca birbirinden ayrılan levhalar arasında meydana gelir. Okyanus oluşumunun başlangıç evresinde, konveksiyon akımlarının neden olduğu okyanusal ya da kıtasal litosferdeki gerilme sonucu her iki yanı normal faylarla sınırlı dar bir havza oluşur. **Rift vâdisi** olarak adlandırılan bu tektonik havza, Aden Körfezi ve kara (kıta) üzerinde gelişen eşdeğeri Afrika Rifti örneğinde olduğu gibi zamanla genişleyerek gelecekte oluşacak büyük bir okyanusun ilk aşamasıdır. Bu ilk aşamaya, Afrika boynuzunda *Cibuti*'de yer alan bazaltik nitelikli *"Asal* Gölü" krateri örnek olarak verilebilir. Riftleşme, Afrika Kıtası'nın en alçak noktasını oluşturduğu *Asal* Gölü (krater gölü) seviyesinin, deniz seviyesinden 155 m (-509 ft) aşağıda yer almasına neden olmuştur. Ortalama 7,5 m su derinliğine sahip 54 km^2 lik bir alanı kaplayan *Asal* Gölü, % 35'lik tuz oranıyla, *Don Juan* Gölü'nden sonra (% 40) dünyanın en tuzlu ikinci gölüdür. Yaz-kış sıcaklıklarının 52°C - 34°C arasında değiştiği bölgede, *Asal* Gölü'nün kuzeyinde 60 m kalınlığa ulaşan ve işletilen tuz yatakları mevcuttur.

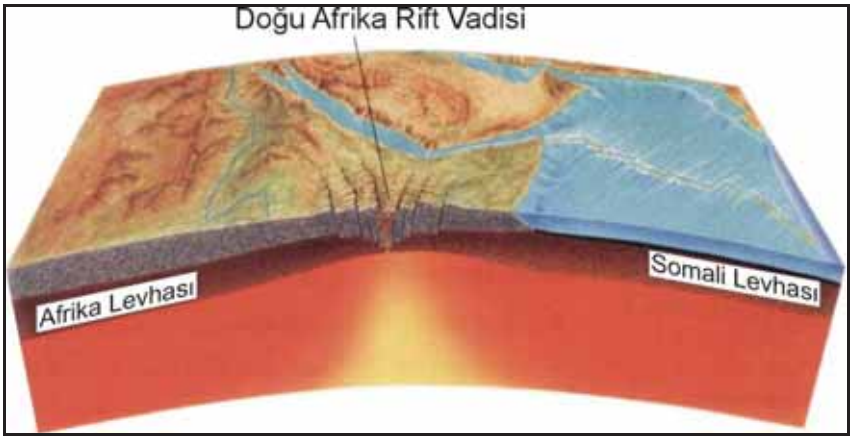
Afrika karasal nitelikli rift vâdisi içinde riftleşmenin gözlendiği bu ilk aşamalar, ayrılmanın ileri safhalarında vâdi tabanının deniz düzeyi altına inmesi ile rift vâdisi, dar bir deniz hâlini alır. Bu aşamada, incelen kıtasal litosfer kopar, vâdi tabanında arada yer alan boşluğu yukarı doğru yükselen manto malzemesi doldurarak daha yoğun olan ince bir okyanusal litosferin oluşmasını sağlar. Bu sırada kopan kıtasal kabuk litosferinin uçları, soğuma ve üzerlerine çökelen sedimentler ile giderek kalınlaşır ve ağırlığından dolayı derine doğru eğilerek çöker. Okyanus evriminin aşamaları Kızıldeniz örneğinde olduğu gibi Şekil 2.10, 2.11, 2.12 ve 2.13'te verilmektedir.



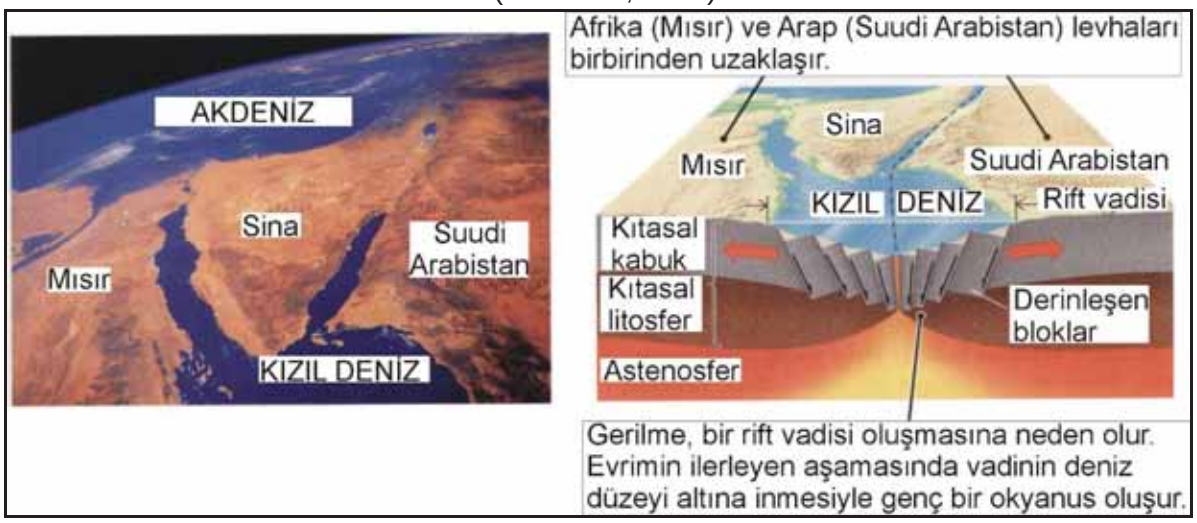
Şekil 2.10. Uzaklaşan tip levha sınırları boyunca bir okyanus gelişiminin aşamaları (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 2.11. Uzaklaşan tip levha sınırı boyunca bir okyanusun evrim aşamaları detayları (*Press* vd., 2004).

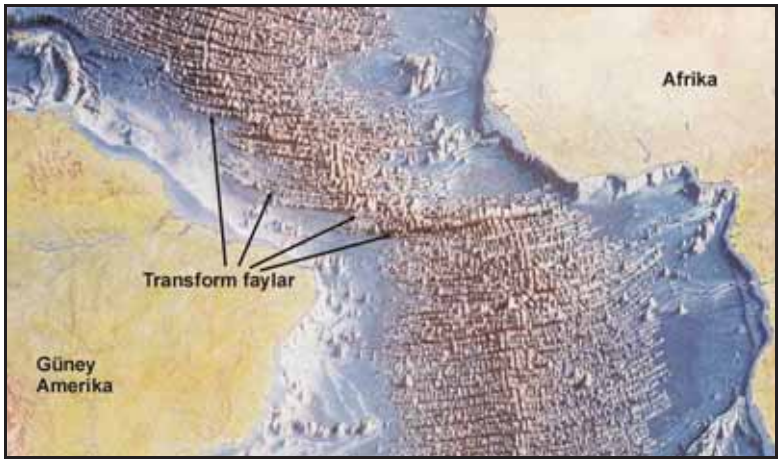


Şekil 2.12. Okyanus oluşumunun ilk aşamasında gelişen Doğu Afrika Rift Vâdisi (*Press* vd., 2004).

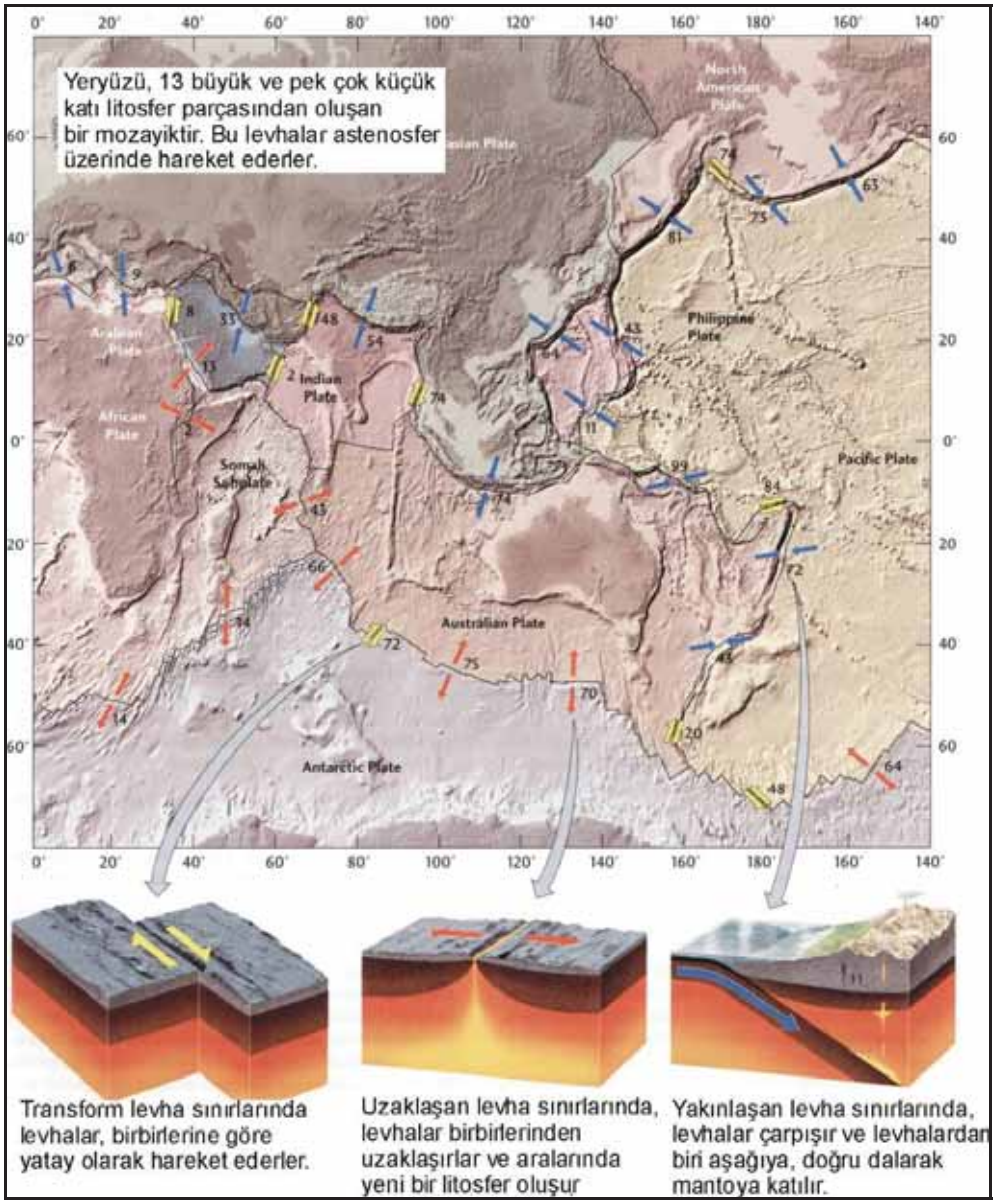


Şekil 2.13. Okyanus oluşumunda rift vâdisinin deniz düzeyi altına inmesi ile oluşan genç okyanus aşamasındaki Kızıldeniz, *"Red Sea"* (*Press* vd., 2004).

Yer kabuğunun bu dinamiği içerisinde uzaklaşan levha sınırları boyunca litosfere yeni malzeme eklenirken, yakınlaşan levha sınırları boyunca ise bunu karşılayacak nitelikte eski litosfer parçaları birbirinin altına dalarak mantoya karışır. Bu dinamik süreç içerisinde levhaların yer değiştirmeleri sırasında birbirlerine göre yaptıkları yanal hareketler de bulunmaktadır. Bu yanal hareketlerin oluşturduğu levha sınırları boyunca, mantodan herhangi bir malzeme kazanımı veya kaybı yaşanmaz. Litosferin parçaları (levhalar) arasındaki bu yanal hareketlerin oluşturduğu sınıra **transform levha sınırları** adı verilir. Bu levhaları sınırlayan hat boyunca iki levhanın birbirine göre yanal yönlü hareketleri sonucu oluşan faylar, **okyanusal transform faylar** *(transform faults)* olarak adlandırılır (Şekil 2.14, 2.15).



Şekil 2.14. Atlantik Okyanusu orta sırtını kesen okyanusal kökenli transform faylar.



Şekil 2.15. Levha sınırlarında gelişen hareket türleri. Soldan sağa sırasıyla; transform, uzaklaşan ve yakınlaşan okyanusal levha sınırları.

Okyanus oluşum aşamalarının olgunluk döneminde, okyanus orta sırtı boyunca yüzeye çıkan manto malzemesi her iki yana doğru simetrik olarak yayılarak genişler ve üzeri denizel çökellerle kaplı bir tabana sahip geniş bir okyanusun oluşmasına neden olur. Okyanusların kenarlarında, daha çok karadan gelen kırıntılılar ve kimyasal ve organik kökenli karbonat istiflenirken, okyanusun daha derinlerinde yer alan **abisal** (*abyssal*) derin denizel bölgelerde ise ağırlıklı olarak kıta yamacından kopup kayan ince taneli sedimentler ve silisyum bileşenli organik çökellerin hâkimiyeti gözlenir. Bu çökel istife, başta okyanus ortası sırt *(mid-ocean ridge)* olmak üzere okyanus tabanındaki sıcak noktalardan ve volkanik ada yaylarından çıkan volkanizma eşlik eder. Olgunluk aşamasındaki okyanuslar için diğer önemli bir örnek Atlantik Okyanusu'dur.

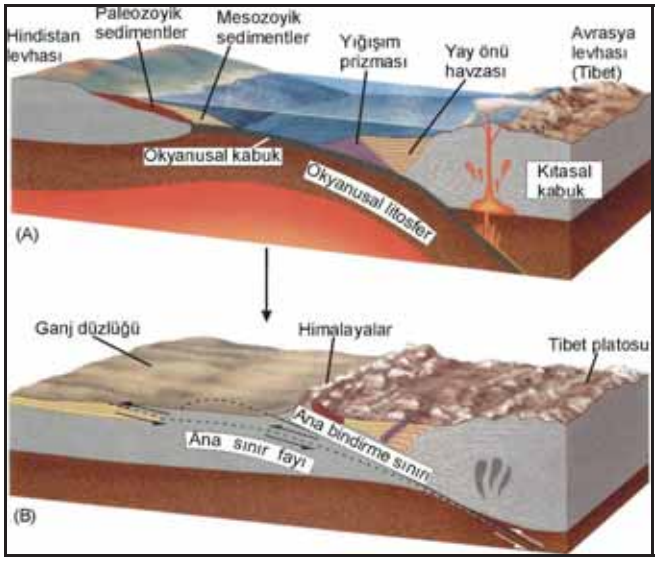
Okyanus evriminde, okyanusal litosferin kıtasal veya bir başka okyanusal litosfer altına dalarak yok olması, okyanusu sınırlayan kıtaların karşı karşıya gelmesi ve bir kıta-kıta çarpışması ile yok olmaları gibi süreçler gözlenir. Kıta kıta çarpışmasıyla büyük dağ kuşakları oluşur. Kıtasal çarpışma kökenli dağ kuşaklarına örnek olarak gelişimleri yaklaşık 500 milyon ilâ 250 milyon yıl öncesi arası oluşmuş Kuzey Amerika'nın (ABD) doğu kıyılarını oluşturan Apalaş Dağları *(Appalachians*) verilebilir. Pangea Kıtası öncesi yaklaşık günümüzden 600 milyon sene önce Kuzey Atlantik (Atlas) Okyanusu'ndan önce (Atlantik Okyanusu'nun atası) bu bölgede var olan bir okyanusun Afrika tarafından 500 milyon sene önce kapanmaya başlamasıyla günümüzde yer alan yaşlı Apalaş Dağları oluşmuştur. Apalaş Dağları'nın oluşumundan çok kısa bir süre sonra (250 milyon sene önce) yeni oluşan tek bir kıtadan oluşan "Pangea Süper Kıtası" tekrar bugünkü kıtaları ve okyanusları oluşturmak üzere büyük ve küçük parçalara bölünmeye başlamış ve günümüzde yer alan okyanus ve kıtaları oluşturmuştur [Pangea Süper Kıtası'nın önce iki büyük kıta halinde parçalanması sonucu güneyde büyük Gondvana kıtası *(Gondwana)*; kuzeyde ise Lavrasya Kıtası *(Laurasia)* oluşmuştur].

Gelişimleri daha yeni olan kıta kıta çarpışmasına diğer bir örnek ise yaklaşık 45 milyon yıl önce oluşmaya başlayan Alp-Himalaya Dağ Kuşağı'dır. Bu kuşakta bir zamanlar bu alanda var olan ve "Tetis" adı verilen eski bir okyanusun kıtasal litosfer altına dalarak yitip-bitmesi ve bunun ardından Avrasya Levhası ile Afrika-Arabistan ve Hindistan-Avustralya Levhaları'nın

çarpışması sonucu oluşmuşlardır. Günümüzde “Tetis Okyanusu’ndan” arta kalan ve henüz kapanmamış olan tek deniz ise Akdeniz’dir (Şekil 2.16, 2.17).



Şekil 2.16. Pangea Süper Kıtası’nın parçalanması ile okyanus oluşumunun olgunlaşma aşaması, Atlantik Okyanusu (*Press* vd., 2004).



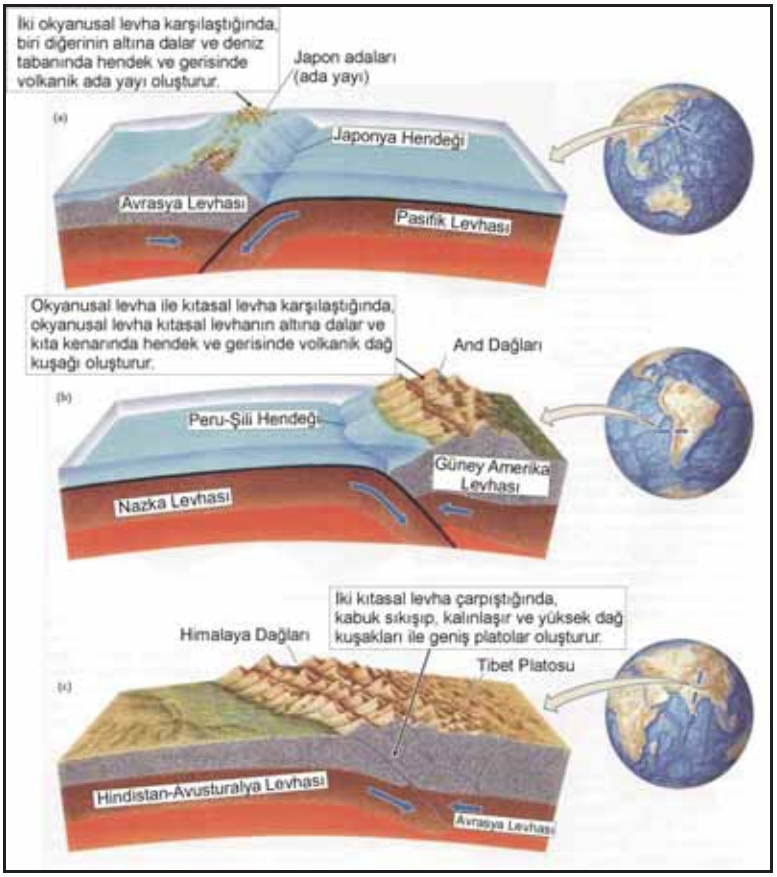
Şekil 2.17. Okyanus oluşumunun tükenme aşaması; A) Tetis Okyanusu’nun kapanması, B) Alp-Himalaya Dağ Kuşağı’nın oluşumu (*Press* vd., 2004).

Konveksiyon akımları ile litosfer tabakasının ayrılıp aradaki boşluğun da mantodan sağlanan malzeme ile sıvanarak yeni bir litosfer parçasının üretimi sonucu mantoda oluşan malzeme kaybı, litosferin başka alanlarındaki sıkışma *(compression)*, daralma ve bunların sonucunda bir bölümünün astenosfer *(asthenosphere)* içerisine dalıp, kaybolan manto malzemesinin yerine eklenmesi ile dengelenir. Levhaların (litosfer parçaları) birbirine yaklaşarak oluşturdukları bu sıkışmalı sınırlara **yakınlaşan (=konverjan) levha sınırları** *(convergent plate boundary)* adı verilir. **Dalma batma zonu** *(subduction zone)* olarak da tanımlanan bu tür sıkışmalı sınırlar boyunca yoğun olan manto malzemesinden yapılmış olan okyanus kabuğu, kıta veya bir başka okyanus

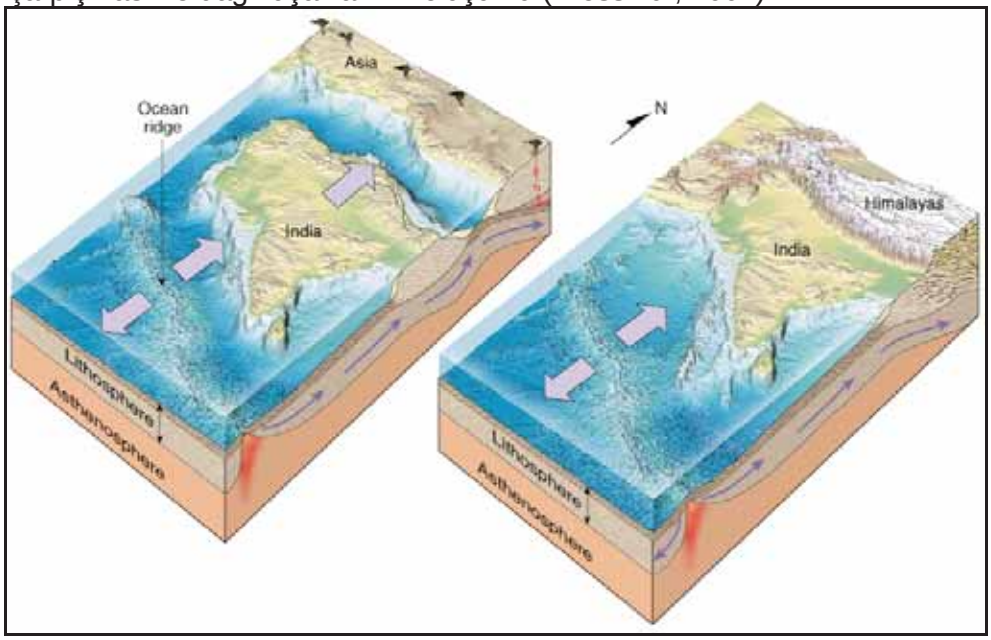
kabuğunun altına, astenosferin içerisine doğru dalıp-batar. Okyanus kabuğunun, kıtasal kabuğun altına dalarak battığı bölgelerde denizlerdeki en derin bölgeler olan **hendekler** *(trench)* oluşur. Bu tür levha sınırlarının günümüzdeki en önemli örneklerini Asya Kıtası'nın doğusundaki adaların (Japonya, Yeni Gine, Sumatra vd.) doğu sahilleri ve Güney Amerika Kıtası'nın batı kıyıları boyunca astenosferin içerisine doğru dalıp-batan Pasifik Okyanusu oluşturmaktadır. Güney Amerika Kıtası'nın batı sahil şeridi boyunca okyanus dibinde hâlen devam etmekte olan dalma batma zonunda, Güney Amerika Kıtası altına dalan okyanus levhası kabuğu, daldığı kesimlerde sıkışma nedeniyle oluşturduğu aşırı basınç, ergime sıcaklığını düşürür ve eriyik mağma hâline gelen kesimler sıkışıp yükselen ve dalma batma zonuna paralel gelişerek And Dağları'nı oluşturan güney Amerika Kıtası kabuğu içinde zeytinyağının suyun içinde yükselmesi gibi yüzeye yükselerek, sık sık aktif volkanik faaliyetlerin oluşumuna neden olurlar.

Söz konusu dalma-batma aktivitesinin ileri aşamalarda karşı karşıya gelen kıta kabukları, birbirinin altına dalıp-batamadıklarından dolayı çarpışarak büyük dağ kuşaklarının oluşmasına neden olurlar. Bu tür dağ oluşumuna en önemli örnek, Anadolu'nun da bir bölümünü oluşturduğu ve eski bir okyanusun (Tetis, *Tethys*) dalıp-batması sonucu gelişmiş olan Alp-Himalaya Dağ Kuşağı'dır. Örnek olarak günümüzden yaklaşık >200 milyon yıl önce tüm kıtaların bir ada gibi bir arada bulunduğu 4. Süper kıta olan son Pangea Kıtası'nın yaklaşık 200-250 milyon sene öncesi arası parçalanmaya başlaması ile günümüzde bildiğimiz kıtalar oluşmaya başlamış, Hindistan kuzeye Avrasya Kıtası'na doğru hareket edip, 40-45 milyon sene önce, arasındaki okyanusu kapatıp çarpışarak (kıta kıta çarpışması) Asya'nın orta güney kısmında dünyanın bugünkü en yüksek sıradağlarını oluşturan (Everest Dağı: 8.848 m) Himalaya Dağları'nın oluşmasına neden olmuştur (Şekil 2.18.1.c ve 2.18.2).

Aşırı sıcaklıktaki çekirdeğin mantoda oluşumuna neden olduğu konveksiyon akımları günümüzden tıpkı ~250 milyon sene öncesi tek bir kıtadan oluşan Pangea Kıtası'nı oluşturduğu gibi günümüzde de hareket hâlindeki levhaların farklı hızlarda açılma ve dalma batma hızlarından dolayı yaklaşık 250 milyon sene sonrası tüm kıtaları birleştirerek, eni ve boyu her biri yaklaşık 21.000 km uzunluğa ulaşan yine ada şeklinde tek bir süper kıta oluşturacağı yönündedir.



Şekil 2.18.1. Yakınlaşan tip levha sınırlarının oluşturdukları tektonik ve morfolojik yapılar; a) Okyanusal litosferin, bir başka okyanusal litosferin altına dalması ve ada yayı oluşumu; b) Okyanusal litosferin, kıtasal litosferin altına dalması ve mağmatik yay oluşumu; c) İki kıtasal litosferin çarpışması ve dağ kuşaklarının oluşumu (*Press* vd., 2004).



Şekil 2.18.2. Hindistan ve Asya Kıtaları'nın (iki kıtasal litosfer) çarpışması ve Himalaya Dağ Kuşağı'nın oluşumu. Üstteki blok diyagramda Hindistan ile Asya'yı ayıran okyanus, Tetis Okyanusu olup Anadolu üzerinden Avrupa'ya kadar uzanan bir okyanus idi. Bu okyanusun günümüzdeki mevcut henüz kapanmamış tek kalıntısı ise Akdeniz'dir.

Günümüzde, Himalaya Dağ Silsilesi hâlen sıkışmaya devam etmekte ve her sene 1 cm'den fazla yükselmektedir. Her iki kıtanın aralarında yer alan okyanusun yok oluşu sonrası çarpışarak birbirlerinin altına dalamamaları ise her ikisinin de kıtasal kabuktan oluşmalarından yani, birbirlerine yakın yoğunlukları nedeniyledir. Kıta kıta çarpışmasında, sıkışma kuvvetleri etkisi ile bölge yükselip **orojenez** olarak bilinen (dağların oluşumunu sağlayan tektonik süreçler*, orogeny*) dağ oluşumlarına neden olmaktadır. Orojenez sırasında geniş alanlar kaplayan ve deniz dibinde yer alan çökel kayaların bir kısmı da sıkışma nedeniyle yükselip karasal ortamı oluştururken, bu oluşum sırasında da faylar, bindirmeler ve kıvrımlar birlikte gelişmekte, yükselen bölgeler Himalaya Dağları yanında, And ve Alp Dağları gibi orojenez dağ kuşaklarını oluşturmaktadırlar.

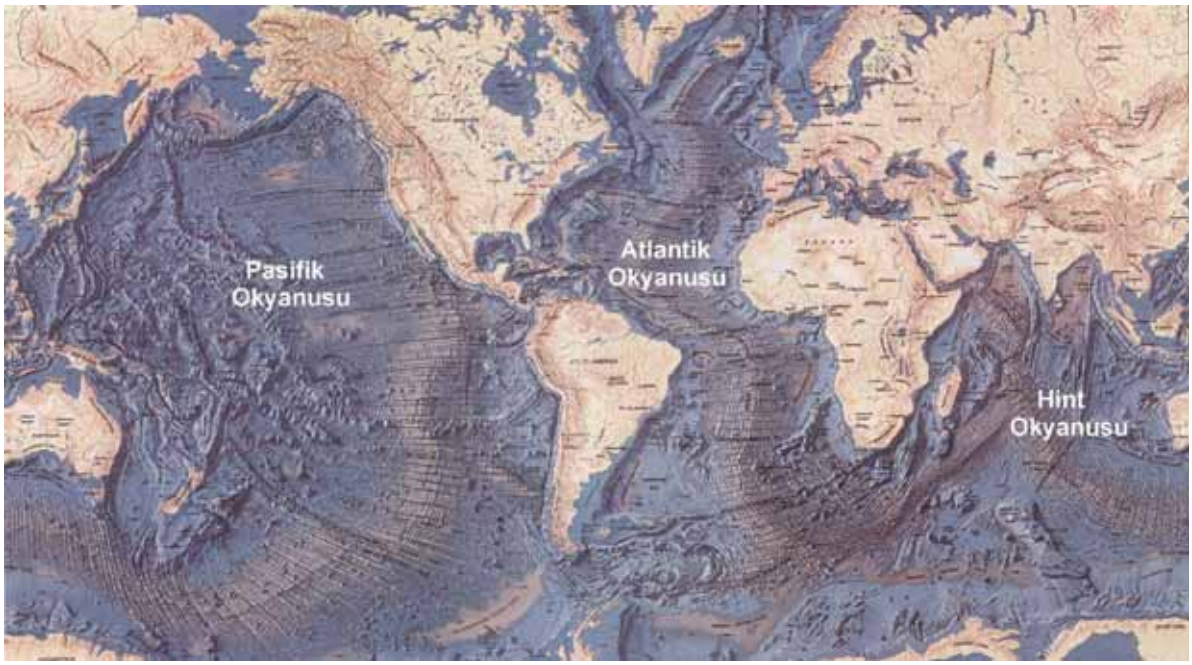
Amerika'nın And ve Kayalık Dağlar ile Akdeniz'den İran'a, Kuzey Hindistan'dan Endonezya'ya uzanan Alp-Himalaya Sıradağları ve Batı Pasifik'teki 'Japonya, Filipinler ve Sumatra Ada Yayları'nı oluşturan genç dağ kuşaklarının çoğu geçtiğimiz 100 milyon yıl içinde oluşmuştur. Bunlardan Himalayalar gibi bazıları ise yaklaşık 45 milyon sene önce gelişimlerine başlamıştır. Ülkemiz Alp-Himalaya Dağ Kuşağı içinde yer almaktadır. Örnek olarak Afrika Kıtası'nın kuzeye ilerleyip Avrasya Kıtası'na yakınlaşmasıyla, Üst Miyosen Dönemi sonunda (Messiniyen) yani; günümüzden yaklaşık 6 milyon sene önce Cebelitarık (=Tarık Dağı) Boğazı yaklaşık bir milyon senelik bir zaman süresi boyunca kapanmış ve Akdeniz Çanağı tamamen kuruyup buharlaşarak bir çöl hâlini alırken, buharlaşma nedeniyle de Akdeniz tabanında 1.000 metreyi aşkın çok kalın bir kaya tuzu birikimi (çökelimi) gerçekleşmiştir. Daha sonra levha hareketlerinin oluşturduğu tektonizma etkisiyle Cebelitarık bölgesi tekrar yırtılarak açılmış ve bugünkü 14 km genişliğinde Cebelitarık Boğazı'nı oluşturmuştur. Cebelitarık Boğazı'nın açılmasını takiben, Atlas Okyanusu suları hızla, Cebelitarık Boğazı'nın tabanında bir denizaltı kanyonu da oluşturarak Akdeniz'e doğru iri ve ince taneli malzemeleri de sürükleyerek akmış, birkaç yıl gibi kısa bir süre içinde, Amazon Nehri'nin (Amazon Nehri debisi: 200.000 m^3/sn) yaklaşık 1.000 katı büyüklüğünde bir debi ile şelâle oluşturarak, tekrar bugünkü Akdeniz'in dolup canlanmasını sağlamıştır. Ancak Afrika Levhası'nın kuzeye hareketinin hâlen devam etmesi nedeniyle günümüzde de

gittikçe sığlaşan Cebelitarık Boğazı, muhtemelen yaklaşık iki ya da üç milyon sene sonra tekrar kapanacaktır.

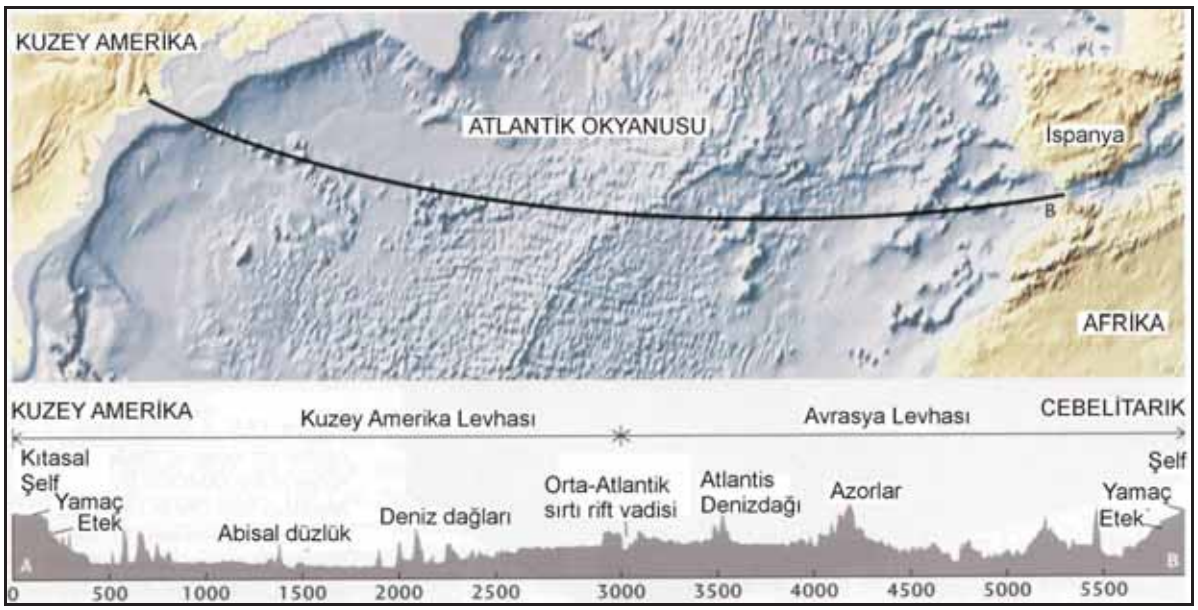
Okyanusları geliştiren bu süreçler aynı zamanda onların morfolojisinin de oldukça karmaşık bir yapıya sahip olmasına neden olur. Atlantik ve Pasifik Okyanuslarından yaklaşık D-B yönünde alınacak olan profiller bu karmaşık deniz tabanı yapısını belirgin bir şekilde gösterirler. Her iki profilde de okyanus ortası sırtlar, deniz tabanında birer yüksek alan olarak görünmektedir. Bunun dışında denizaltı dağları ve adalarının derin okyanus düzlüklerine düzensiz bir yapı kazandırmış olduğu gözlenir (Şekil 2.19, 20 ve 21). Pasifik Okyanusu tabanını, Atlantik Okyanusu tabanından ayıran en önemli farklılıklardan biri okyanus ortası sırt sistemi boyunca deniz tabanı yayılma hızlarındaki farklılıktır. Atlantik Okyanusu sırtında deniz tabanı yayılması yıllık 1,5 cm - 2 cm'dir ve hızla yayılan merkezlerde sırtın üstünde çok belirgin engebeli bir rift vâdisi bulunur. Bu çöküntü alanları, 30 km genişliğinde ve okyanus içi dağlık alanın derinliği 3.000 m olan okyanus dibi sıradağları oluşturmaktadır. Pasifik'te ise yıllık yayılma hızı çok daha fazla olup meselâ doğu Pasifik'te bu değer 9 cm'den fazladır. Pasifik'te bu hızlı yayılma nedeniyle aktif volkanizmanın ve tektonizmanın yer aldığı okyanus ortası sırtlar (*mid-oceanic ridge*), düşük eğimli yamaçlardan oluşurlar. Pasifik'te yer alan, derinliği 10.000 m'nin üzerine kadar çıkabilen (*Mariana-Challenger* çukuru: 11.022 m) ve yeryüzünün en derin bölgelerini oluşturan çukur alanlar, yakınlaşan levha kenarlarındaki dalma-batma işleminin deniz tabanındaki izidirler. Bu derin alanların kara tarafında dalma batma zonunun yer almadığı **pasif kıta kenarları**nda *(passive margin)* ise kıta eteği, kıta yamacı ve şelf düzlüğünden oluşan kıta kenarı yer alır (örn. Amerika Kıtası doğu kıyıları).

Kıyı hattı açığında yer alan ve düşük eğimlere sahip yaklaşık 0 m ile maksimum 200 m deniz derinlikleri arasındaki sığ denizel düzlüğe **kıta sahanlığı, şelf düzlüğü** veya **kıtasal şelf** *(continental shelf, shelf sea)* adı verilir. Şelf düzlüğünün eğim ve derinlik değerlerinin belirgin olarak değiştiği sınıra şelfin dış kenarı adı verilir ve bu hattın açık denize doğru olan yaklaşık 200 m ilâ 1.500 m arasında göreceli daha dik bölümü **kıta yamacı** (=kıta şevi, *continental slope*) olarak adlandırılır. Kıta yamacı şelf alanları, yamacın alt kesimlerinde yerini daha az eğimli deniz derinliği yaklaşık 1.500 m ilâ 4.000 m arasında olan **kıta eteğine** (kıta yükselimi, *continental rise*) bırakır. Kıta

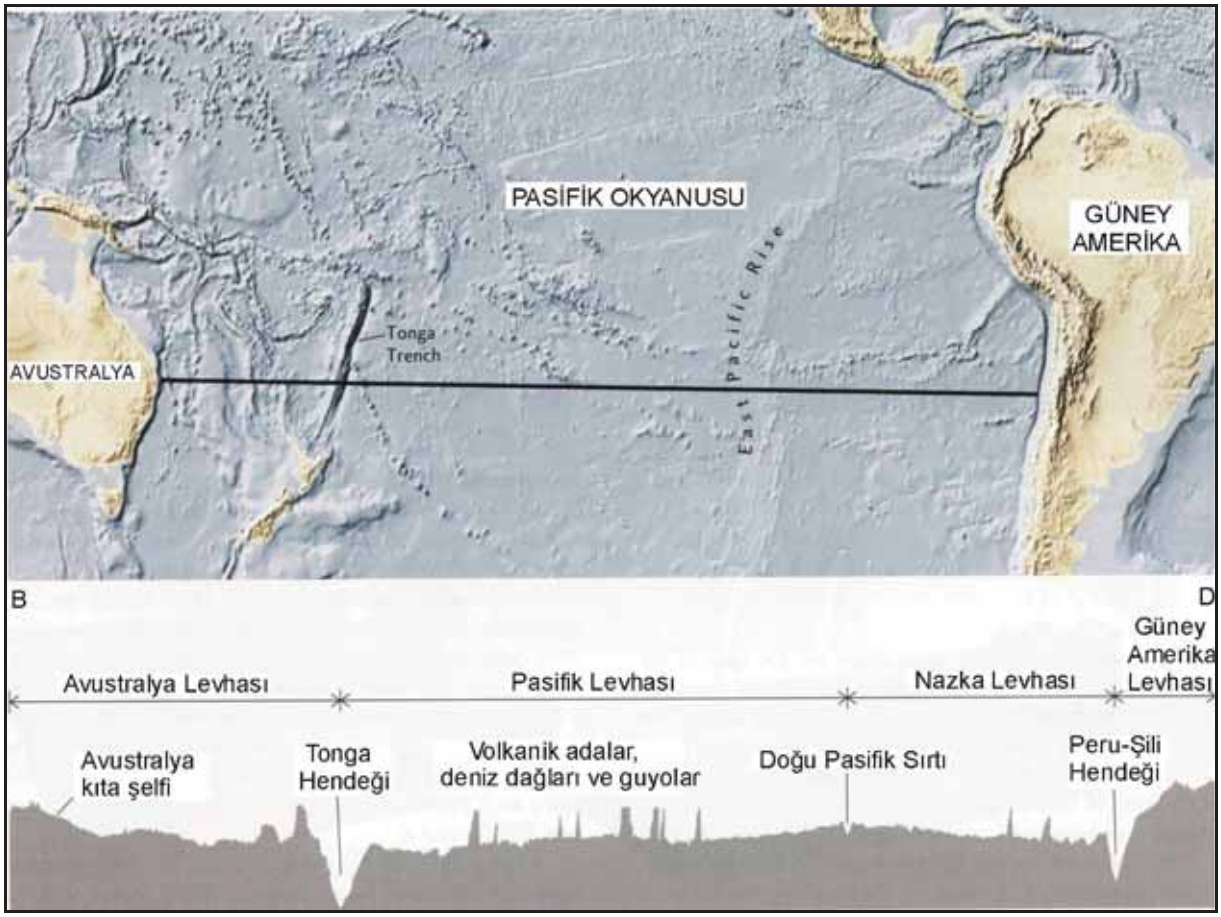
yamacının tabanında bulunan ve yamaç boyunca derine doğru kayan çökellerin oluşturduğu düşük eğime sahip bu bölge **kıta eteği** ya da **kıta yükselimi** olarak adlandırılır. Kıta yükselimi yerini 4.000 m ilâ 6.000 m arasında olan ve geniş alanlar kaplayan "**derin deniz ovaları**" *(abyssal plains)* ya da **abisal düzlük** olarak adlandırılan geniş düzlükleri oluşturan okyanus tabanlarına bırakır (Şekil 2.22).



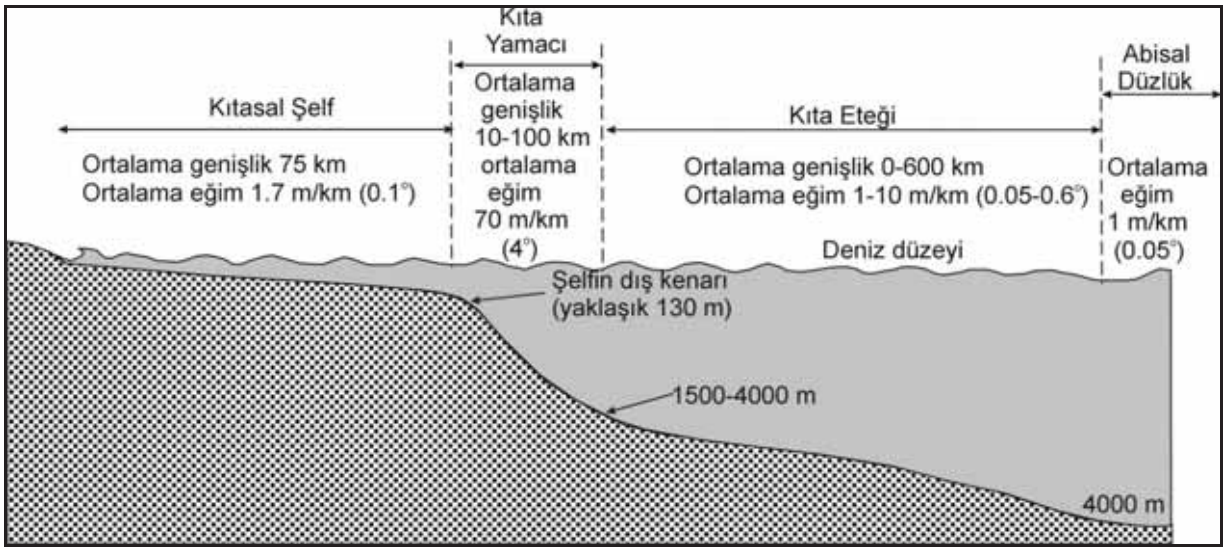
Şekil 2.19. Okyanus tabanlarının ve kıtaların yüzey morfolojisi.



Şekil 2.20. Kuzey Amerika-Cebelitarık Boğazı arasında Atlantik Okyanusu'nun deniz tabanı profili (*Press* vd., 2004).



Şekil 2.21. Avustralya-Güney Amerika arasında Pasifik Okyanusu'nun deniz tabanı profili (*Press* vd., 2004).



Şekil 2.22. Pasif Kıta Kenarı'nın şematik kesiti (*Boggs*, 2001).

Aktif ve pasif kıta kenarı deyimleri, kıta-okyanus arasında bir dalma-batma zonu olması (pasifik tipi) veya olmaması (atlantik tipi) ile belirlenmektedir. Örnek olarak kıtasal kenarların okyanusal levha sınırları ile çarpıştıkları Amerika Kıtası'nın batı sahil şeridi '**aktif kıta kenarı'**nı *(active margin)*, çarpışmayan doğu sahil şeridi ise '**pasif kıta kenarı'**nı *(passive margin)* oluşturmaktadır. Pasifik Okyanusu çevresinde okyanusal litosferin kıta kenarı altına daldığı diğer bölgeler de Aktif Kıtası kenarlarını oluştururlar ve bu kesimlerde okyanus tabanındaki sedimentler ve okyanus kabuğu parçaları, dalan okyanusal levhadan kopartılır ve üstteki kıtanın kenarına eklenir (örn. And Dağları, Japonya-*Honsu* Adası ve levha yitimi sonucu oluşmuş Güneydoğu Anadolu Kıvrım Kenet Kuşağı; Yıldırım, 1989).

2.5. Aktif Volkanizma ve Volkanik Dağ Kuşakları

Yerkürenin en üst katmanlarını oluşturan katı nitelikli litosfer (taşküre) ve plâstik özellikli astenosfer arasındaki malzeme alışverişi sırasında, astenosferden yükselen manto malzemesine **mağma** (=ergimiş hamur kütlesi) adı verilir. Mağma, litosferdeki süreksizlikler boyunca yukarı doğru yükselimini sürdürür. Bu yükselim, yer kabuğunun derin bölgelerinde, orta sığ derinliklerde veya yeryüzünde sona erebilir. Mağmanın yeryüzüne kadar ulaşarak yüzeye püskürdüğü bölgelerde **volkanik kayaçlar** *(volcanic rocks)* oluşurlar. Bu kayaçların dönemsel olarak püskürmeleri sonucunda yüzeye çıktıkları noktadaki volkanik malzeme birikimi konik bir dağın oluşmasını sağlar.

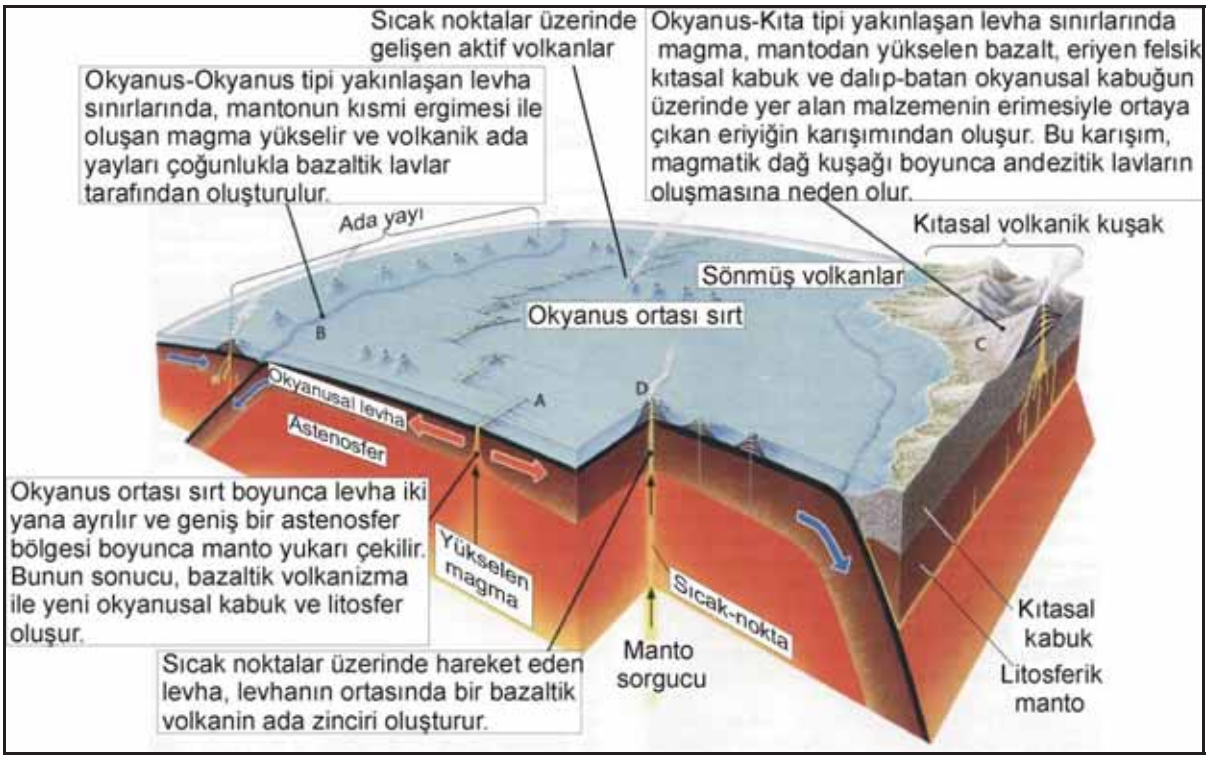
Günümüzde gerçekleşen aktif volkanizma ve buna bağlı olarak gelişen volkanik dağ kuşakları en yaygın olarak yakınlaşan levha sınırları boyunca gözlenirler. Yakınlaşan levha sınırları boyunca dalıp-batan okyanusal kabuğun, üzerindeki levhada gerçekleşen bu volkanizmanın oluşturduğu dağ kuşağı, kıtaların üzerinde ise kıta kenarı volkanik yayı, okyanusların üzerinde ise ada yayı adını alır. Diğer bir ifâde ile okyanusal litosferin yitimi bir kıtasal bloğun altına doğru olursa **"kıta kenarı volkanik yayı"** oluşur. Bu tip gelişen kıta kenarı volkanik yaylarını oluşturan levha sınırları **"And-tipi levha kenarları"** olarak adlandırılır.

And tipi levha kenarlarına, Güney Amerika Kıtası'nın batısında Pasifik Okyanusu ile sınırlandığı, ortalama 4.000 m yükseltili (maksimum +6.962 m

yüksekliğe ulaşan *Aconcagua* Dağı), kuzeyden güneye doğru Venezuela, Kolombiya, Ekvador, Peru, Bolivya, Arjantin ve Şili boyunca yaklaşık 150 km-700 km genişlikler arasında ve 7.500 km uzunluğunda, sahil şeridine paralel uzanan ve dünyanın deniz düzeyi üzerinde aktif volkanların yer aldığı en uzun sıradağlar zincirini oluşturan And Dağları örnek olarak verilebilir. And Dağları'nın bulunduğu tüm bölge (eski Gondvana Kıtası) 165 milyon sene önce tamamen düz bir ova iken Nazka ve Antarktika Levhaları'nın (plâka) yaklaşık 150 milyon sene önce başlayan yitimi nedeniyle oluşan günümüzde de yaklaşık yılda 10 cm'lik sıkışma ile (konverjans, *convergence*) ova olan yerler yavaş yavaş dağlara dönüşmüş ve son 60 milyon sene içinde de 60 km - 70 km kalınlıkta kalın bir kıtasal kabuk oluşturarak And Dağları'nın oluşumlarını sağlamıştır. And Dağları günümüzde de gelişimlerini devam ettirmekte ve her yıl yaklaşık 1 cm yükselmeye devam etmektedir. Levhaların daimi ve uzun süreli hareketleri sonucunda oluşmuş And Dağları, oluşumlarıyla birlikte doğuya Atlas Okyanusu'na kadar akan büyük akarsuların da meydana gelmelerini sağlamıştır. Buna en iyi örnek Peru'dan 5.170 m yükseklikteki bir kaynaktan doğup 6.450 km yol katederek (Nil Nehri'nden sonra dünyanın ikinci en uzun nehri), Brezilya'dan Atlas Okyanusu'na dökülen Amazon Nehri'dir. Amazon Nehri, Peru yanında, Kolombiya, Bolivya ve Brezilya topraklarından birleşen ırmaklarla büyüyerek Atlas Okyanusu'na kadar uzanmakta ve tek başına Güney Amerika Kıtası'nın ve dünyanın en büyük akarsu havzasını (6 milyon km^2) oluşturarak, bu havzanın yaşanacak verimli alanlarının oluşmasını sağlamıştır. Tüm canlılara hayat veren bu oluşumlar, varlıklarını Levha hareketlerine borçludurlar.

Ada Yayları ise iki okyanusal levhanın yakınlaştığı ve birbirinin altına daldığı alanlarda oluşur ve volkanik kökenli Japonya Adaları, Mariana, Kuril ve Tonga gibi ada yayları, bu tür oluşumların en önemli örnekleri arasındadır. Dünyadaki aktif volkanizmanın gözlendiği bir diğer bölgeyi, Okyanus ortası sırtlar oluştururlar. Aktif volkanizma okyanus tabanını oluşturan bu kesimlerde binlerce km uzunlukta sıradağların oluşumuna neden olmaktadır. Bunlardan başka, Alt Manto-Çekirdek sınırından başlayıp üste Astenosfer boyunca yeryüzüne oluşan lâv bacaları da vardır ve volkanizmanın bir başka kaynağını oluştururlar. Bunlar "**Sıcak Nokta"**lar *(hot spots)* olarak adlandırılmakta olup levha sınırlarından uzakta, bağımsız gelişen yoğun volkanik aktivitenin

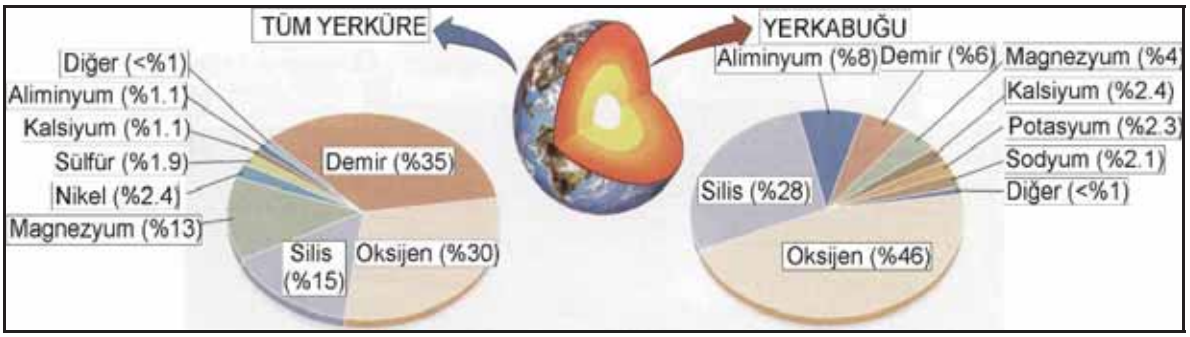
devamlı geliştiği noktasal alanlardır (örn. Şekil 2.23). Sıcaklığın göreceli olarak çevresinden yüksek olduğu bu alanlar üzerindeki litosferde bölgesel olarak volkanizma meydana gelir. Sıcak nokta volkanizması, mantonun derin kısımlarından, muhtemelen dış çekirdek-manto sınırı tarafından kontrol edilmektedir. Sıcak Nokta'lar milyonlarca yıl hareket etmediklerinden, yani sabit kaldıklarından dolayı, özellikle okyanusal levhaların hareket yönlerinin ve yıllık ortalama hareket miktarlarının ortaya çıkarılmasında yararlı olmaktadırlar. Bu tür volkanizmanın oluşturduğu yapılar için verilebilecek en önemli örnek dış çekirdek-manto sınırından yani yaklaşık 3.000 km derinlikten gelen lâvlarla oluşan *Hawaii Adaları*'dır. Pasifik Levhası ortasında yer alan sıcak nokta kaynağı Pasifik Levhası'nın her sene 11 cm - 12 cm kuzey-kuzeybatı yönlü ve 75 milyon sene öncesi başlayan hareketi, son 5 milyon sene öncesinden günümüze kadar 600 km'lik bir yol katetmiş, okyanus yüzeyine ulaşan ve *Hawaii Adaları* olarak adlandırılan bir sıra adalar dizisini oluşturmuştur.



Şekil 2.23. Yeryüzünde volkanizmanın gelişebileceği ortamlar. Uzaklaşan levha sınırları (okyanus ortası sırtlar), yakınlaşan levha sınırları (mağmatik ve ada yayları) ve alt manto-çekirdek sınırından yükselip volkanizma oluşturan "Sıcak Nokta" (*hot spots*).

2.6. YER KABUĞUNU OLUŞTURAN MADDELER ve MİNERALLER

Yer kabuğu, demir ve mağnezyumca zengin okyanusal ve alüminyumca zengin kıtasal kabuktan oluşmaktadır. Yer kabuğunda ve yerkürenin tamamında yer alan elementler ve oranları Şekil 2.24'de verilmiştir. Buna göre, gerek yerkürenin tamamında ve gerekse yer kabuğunda en yüksek oranda bulunan element oksijendir. Oksijen, minerallerin içerisinde oksit olarak yer alır. Oksijenden sonra tüm yerküre ve yer kabuğunda en yüksek oranda bulunan element silisyumdur. Silisyum, genelde oksijen ile bileşik hâlde silikat olarak bulunur. Şekil 2.24'de de kolaylıkla gözlenebileceği gibi yerküre ile yeryüzündeki element yüzde dağılımlarındaki en büyük fark demir ve mağnezyum oranlarında kendini göstermektedir. Demir, yer kabuğunda % 6'lık bir orana sahipken, yerkürenin tamamında ise bu oran % 35'e çıkmaktadır. Benzer şekilde, yer kabuğunda % 4 oranında var olan mağnezyumun tüm yerküre içerindeki oranı da % 13'e çıkmaktadır. Yer kabuğunda yer alan elementlerin oranı ile tüm yerkürenin bileşimi arasındaki bir diğer önemli farklılık alüminyum oranında meydana gelmektedir. Yer kabuğunda alüminyum oranı % 8 gibi yüksek bir değerde iken, bu oran tüm yerkürede % 1,1'e kadar düşmektedir. Yer kabuğuna göre yerküredeki elementlerin bulunma oranlarındaki benzer düşüşler kalsiyum, potasyum ve sodyum miktarlarında da gözlenmektedir.



Şekil 2.24. Yerkürede ve yer kabuğunda bulunan elementler ve yüzdeleri (*Press* vd., 2004).

Yerküredeki elementlerin birleşiminden mineraller oluşmaktadır. Kimyasal yapıya uygun dizilen atomlar önce elementleri, elementler geometrik yapı gösteren ***kristal ağına göre dizilmiş kristalleri, kristaller mineralleri ve mineraller de yer kabuğundaki kayaçları oluştururlar.

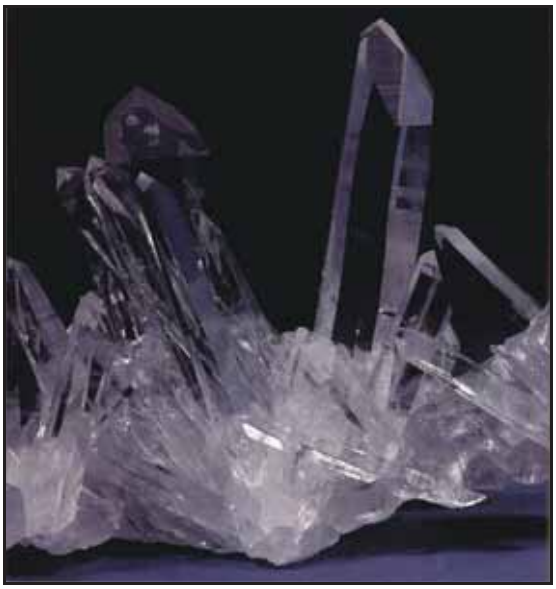
***[Kristal Sistemleri:** Kübik, Hekzagonal, Trigonal (rombohedral), Tetragonal, Rombusal (ortorombik), monoklinik ve Triklinik sistem**].**

Mineraller *(minerals)*, doğada elementlerin belirli bir kimyasal bileşimi ve atomik düzeni sonucu oluşan, homojen, belirli bir kristal yapısına sahip olan, inorganik ve katı hâlde bulunan kristalli cisimlerdir.

Minerallerden silis camı ve opal ($SiO_2n.H_2O$) gibi bazıları amorf, çoğunluğu ise kristal durumundadır. Mineraller altın, elmas gibi tek bir elementten veya kuvars (SiO_2), pirit (FeS_2), feldspat (ortoklas-$KAlSi_3O_8$) gibi birden fazla elementten oluşabilir. Bir mineral ne kadar küçük parçalara bölünürse bölünsün, parçasında bütünün özelliklerini taşır. Mineraller şayet özellikleri genel olarak düz yüzeyle çok köşeli geometrik şekillerle gösteriliyorsa bunlar için kristalli terimi kullanılır. **Kristaller** *(crystals)*, kendisini meydana getiren atom ve moleküllerin içyapı ve diziliminin bir sonucu olarak düz yüzeylerle sınırlanmış, muntazam geometrik şekil gösteren katı cisimlerdir (Şekil 2.25). Bu nedenle bir kristal atom ve molekülleri, üç boyutlu olarak belli bir tertiplenme gösteren bir madde olarak kabul edilmektedir. Diğer bir ifâdeyle, belli bir kristalin iç yapısı (belli sıcaklık ve basınç altında) daima aynı sayıda ve aynı cinslerdeki atomu karakteristik bir düzen içerisinde içeren ve birim hücre denilen bir yapı ünitesinin üç boyutlu olarak tekrarlanmasından meydana gelerek yukarıda belirtilen 7 kristal sisteminden bir tanesinde kristallenmektedir. **Amorf** (=şekilsiz, kristalleşmemiş, *amorphous = uncrystallized)* mineraller ise atom ve molekülleri gelişigüzel, belirli bir geometrik kurala uygun biçimde bağlanıp yerleşmemiş olarak ortaya çıkan düzensiz bir tertiplenme gösteren minerallerdir. Doğada minerallerin tamamına yakını kristal, çok az bir kısmı amorf mineral şeklinde bulunmaktadır.

Minerallerin büyük çoğunluğu ergimiş silikatlı madde veya eriyiklerin kristalleşmeleri ile oluşurlar. Minerallerin ergimiş silikat hamuru durumunda olan mağmadan kristalleşmesi, ortamdaki basınç ve sıcaklığın azalması sonucu oluşmaya başlar. Kristal yapısının iyi gelişebilmesi için ortamdaki basınç ve sıcaklığın dereceli olarak azalması gerekir. Yavaş olarak basınç ve sıcaklığın azaldığı ortamlarda yer alan mağmatik-derinlik kayaçlarının büyük kristalli olmalarının nedeni budur. Eğer basınç ve sıcaklık hızla azalırsa, kristal yapıları iyi gelişemez ve ufak kristaller meydana gelir. Basınç ve sıcaklıktaki düşüş çok hızlı olursa kristalleşme hiç meydana gelmez, bünyedeki su içeriğinin de etken olduğu ve çok hızlı soğuma ile kristalleşmenin oluşmadığı tüm **“camsal doku”**dan oluşan amorf volkanik cam (obsidiyen) veya opal,

kalsedon gibi amorf yapılar gelişir. Doğada kuvars (SiO_2), tuz (NaCl) ve kalsit ($CaCO_3$) ise en çok rastlanılan ve kristal yapıları görülebilen minerallerin başında gelir.



Şekil 2.25. Ametist (mor kuvars) kristalleri (*Press* vd., 2004).

Doğada bir veya birden fazla mineralin birleşmesi ile **kayaçlar** oluşur. Mağmatik kayaçların oluşumu sırasında, bu minerallerden kayaçla birlikte katılaşmış olanlarına **primer** (birincil) **mineraller** adı verilir. Primer mineraller içerisinde, kayaçları oluşturan veya kayacın ana bileşeni olan bu minerallere **esas mineraller** adı verilir. Bu mineraller kayacın içerisinde bol miktarda bulunur ve ona asıl özelliğini verirler. Silis (örn. kuvars); Feldspat (örn. ortoklas); Feldspatoid (örn. lösit); Mika [örn. beyaz mika (muskovit) ve siyah mika (biyotit)]; Piroksen (örn. ojit); Amfibol (örn. hornblend) ve Olivin grubu (örn. forsterit) mineraller mağmatik kökenli kayaçların esas mineral gruplarını oluştururlar. Primer mineral grubu içerisinde esas mineraller dışında yer alan **tâli mineraller** de mağmatik kayacın doğrudan oluşumu sırasında kayaç ile birlikte kristalleşmişlerdir. Ancak esas minerallere oranla kayacın içerisinde sıkça rastlanmalarına rağmen, miktar olarak çok azdırlar ve oksitler, sülfürler, fosfatlar, titanatlar bu grupta yer alırlar. Mağmatik kayaçlar içerisinde primer mineraller dışında, içinde bulundukları kayacın katılaşmasından sonra meydana gelmiş olan mineraller de bulunur. Bu tür minerallere **sekonder** (ikincil) **mineraller** adı verilir. Mağmatizma sonrası serizitleşme, kloritleşme, serpantinleşme, kaolinleşme gibi başlıca ayrışım olayları veya başkalaşım

(metamorfizma) nedeniyle oluşan mineraller bu gruba girerler. Başlıca sekonder mineral ve grupları; **Klorit Grubu**: pennin, klinoklor vd.; **Serpantin Grubu**: antigorit, krizotil, talk; **Karbonat Grubu**: kalsit, dolomit; **Epidot Grubu**: epidot, zoizit; **Kaolen Grubu**: kaolinit, dikit, nakrit, anoksit, halloysit, allofan; **Montmorillonit Grubu**: montmorillonit, vermikülit, nontronit, saponit; **Zeolit Grubu**: laumontit, klinoptilolit; **Mika (İllit) Grubu:**İllit (illit=hidromuskovit: muskovitin hidrotermal koşullar altında bozuşmasıyla oluşan mineral), muskovit, biyotit, filogopit olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca mağmatik kayaçlarda volkanik bacalarda mağmaya yakın olan kayaçlar ısınarak, kayaçların bazıları kısmen veya tamamen ergir (asimilasyon). Bu ergiyik içine komşu kayaçlardan, kayaca karışmış **yabancı mineraller** veya katı yabancı kayaç parçaları da **(=inklüzyon**) bulunmaktadır.

2.6.1. Minerallerin özellikleri

a. Fiziksel özellikler: Minerallerin fiziksel özellikleri: görünüm, renk, sertlik, dilinim, özgül ağırlık, çizgi rengi, parlaklık, saydamlık, kırık şekli, kırılganlık, ikizlenme, radyoaktivite, manyetik ve elektriksel özellikler olarak sayılabilir.

b. Fizyolojik özellikler: Minerallerin tad ve kokusu. Örnek: Tuz (halit) tatma duyusu ile kükürt veya arsenik kendine has kokuları ile tanınır.

c. Kristal şekli: Mineraller kübik, tetragonal, hekzagonal, rombusal, monoklinal, triklinal sistemlerde kristalleşirler veya kristalsiz (amorf) yapıda olabilirler.

d. Kimyasal özellikler: Kendilerine özgü bir kimyasal bileşimleri, farklı ergime dereceleri ve kimyasal özellikleri olan mineraller atmosfer ve çevre koşulları altında kimyasal yol ile duraylılıkları bozulup ayrışır veya ayrılan kısımlar tekrar birleşebilir, yeni minerallere dönüşebilirler. Jips *(gypsum)* mineralinin iç yapısında bulunan kristal suyunun (H_2O) düşük derecede ısıtıldığında çıkmasıyla susuz kalsiyum sülfata ($CaSO_4$) yani anhidrite dönüşmesi örnek olarak verilebilir. Ayrıca minerallerin bir kısmı suda kolayca çözünürler (halit); bazıları sadece asitler içinde çözünebilirler (örn. kalsitin HCl'de çözülmesi), diğer bir grup ise kuvvetli asitlerde dahi çözülmezler. Mineraller; kristal şekilleri aynı (izomorf), kimyasal bileşimleri birbirlerinin yerine

geçebilecek özellikte [örn. kalsit ($CaCO_3$); dolomit $CaMg(CO_3)_2$; magnezit=manyezit ($MgCO_3$)] benzer şekilli olabildikleri gibi kristal şekilleri farklı (polimorf) ve kimyasal bileşimleri aynı (örn. elmas, grafit) olabilmektedirler.

e. Optik özellikler: Minerallerin ince kesitlerde polarizan mikroskop altında tespit edilen kristolagrafik özellikleridir. Polarizan mikroskopta; minerallerin, opak olup olmadıkları, izotrop veya anizotropluğu, sönme açıları, uzanım işaretleri, tek ve çift optik eksenli minerallerin optik şekli ve işaretleri, optik eksenler açısının saptanması gibi değişik optik şekiller incelenerek, mineral tayini (adlaması), oluşum ortamı, diğer mineraller ile ilişkisi ve minerallerden oluşan kümenin doku *(fabric)* özellikleri belirlenmektedir.

Fiziksel özelliklerden "**sertlik**", minerallerin çizilmeye karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanır. Özellikle mühendislik çalışmalarında kazılabilme-kırılabilme-patlatılabilme-öğütülebilme açısından minerallerin sertliği oldukça önemlidir. Minerallerin sertlik derecesini belirleyebilmek için *Mohs, Schmidt, Knoop, Shore* gibi pek çok sertlik skalası ve tanımlaması bulunmakla birlikte bunlardan en çok kullanılanı ***Mohs* Sertlik Skalası**'dır.

Viyana'lı Mineralog *Friedrich Mohs* (1773-1839) tarafından 1812 yılında hazırlanan *Mohs* Sertlik Skalası'na göre 10 mineralin sertliği, en yumuşak mineralden sert olana doğru sıralanmış, *Rosiwal* Mutlak Sertlik değerleriyle karşılaştırılmıştır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. *Mohs* Sertlik Skalası

Mohs Göreceli Sertliği	Mineralin Adı	Formülü	Çizme-Çizilme	*Rosiwal* Mutlak Sertliği
1	Talk	$Mg_3[(OH_2)/Si_4O_{10})]$	Tırnakla çizilir	0,03
2	Jips	$CaSO_4.2H_2O$	Tırnakla çizilir	1,25
3	Kalsit	$CaCO_3$	Bakır para ile çizilir	4,5
4	Fluorit	CaF_2	Çakı ile kolay çizilir	5
5	Apatit	$Ca_5[(F, Cl, OH) / (PO_4)_3]$	Çakı ile çizilir	6,5
6	Feldspat (Ortoklas)	$K(AlSi_3O_8)$	Çelik eğe ile çizilir	37
7	Kuvars	SiO_2	Camı çizer	120
8	Topaz	$Al_2[F_2 / SiO_4]$	Kuvarsı kolay çizer	175
9	Korendon (Korund)	Al_2O_3	Topazı kolay çizer	1.000
10	Elmas	C	Çizilmez	140. 000

Kayalarda en çok kullanılan sertlik deneyi, *Schmidt* Sertlik deneyidir *(Schmidt hardness test)*. Önceleri betonun sertliğini, dolayısıyla da mukavemetini ölçmede kullanılan bu deneyde, *Schmidt* Sertlik Çekici'nin değişik tipleri geliştirilerek kayalarda uygulanmaya başlanmıştır (Şekercioğlu, 2007).

Genellikle; dayanımı sağlam/çok sağlam kayalarda *Schmidt* çekicinin "L" Tipi; dayanımı zayıf/orta sağlam kayalarda "N" Tipi kullanılmaktadır. Geri tepme sayısı sınıflandırma parametresi kabul edilerek *De Beer* (1967) tarafından yapılan sertlik sınıflaması Tablo 2.2' de verilmektedir.

Tablo 2.2. *Schmidt* Sertlik Çekici geri tepme sayısına göre kaya ve zeminlerin sınıflandırılması (*De Beer*, 1967).

Kayaç sınıfı	*Schmidt* Sertlik Çekici geri tepme değeri
Aşırı sert (aşırı sağlam) kaya	> 60
Çok sert (çok sağlam) kaya	60 - 45
Sert (sağlam) kaya	45 - 30
Yumuşak (orta sağlam) kaya	30 - 24
Çok yumuşak (zayıf-çok zayıf) kaya	24 - 20
Sert zemin	20 - 16

2.6.2. Minerallerin mühendislikteki önemi ve kullanıldıkları alanlar

Minerallerin özellikle inşaat mühendisliğinde *(civil engineering)* temel ve malzeme olma yönünden ayrı ayrı önemleri vardır. Modern beton teknolojisinde beton *****agregasının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, bunu teşkil eden minerallerin kimyasal bileşimleri ile ilgili olduğu bilinmektedir. Minerallerden, sertlik skalasında belirtilenlerin kullanıldıkları alanlar aşağıda verilmektedir.

[Agrega,** (*aggregate):** Kum, çakıl, kırma taş *(blasted rock)*, cüruf *(slag)* gibi beton *(concrete)* yapımında kullanılan tabiî veya yapay ya da her iki cinsin genellikle 10 cm'ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış taneli malzeme yığını, (kum+çakıl+kırmataştan oluşan doğal kaya materyali)**]**.

Talk - *talc*, $Mg_3[(OH_2)/Si_4O_{10})]$; *Mohs* sertliği 1 olup yüksek ısıya ve asitlere karşı dirençli olup düşük elektrik iletkenliğine sahiptir. Talk, geçmiş yıllarda sabun taşı olarak kullanılırken, bugün talk pudrası imalinde, kâğıt, çökme

hızını düşürmesi ve stabil ve düzgün akışı sağlamasıyla boya dağıtıcısı olarak, seramik eşya yapımında, elektrik fincanları, lâstik ve plâstikte, döküm kalıplarında, elektronik yalıtkanların yapımında dolgu ve ara madde olarak kullanılır. Talk, kısaca; seramik, boya, kauçuk, kâğıt sanayiinde, çatı kaplaması, haşerelere karşı ilaç yapımında, kozmetik ve eczacılıkta kullanılmaktadır.

Jips - *gypsum*, ($CaSO_4.2H_2O$ - *Mohs* sertliği 2); renksiz ya da beyaz renkli olup 120°C'de suyunun bir kısmını kaybederek alçıya dönüşür. Alçı bina içi ve dışı uygulamalarda, kimya endüstrisinde, her türlü döküm kalıplarında, Portland çimentosunda sertleşmeyi geciktirmede, kâğıt ve pamuklu tekstil maddelerinde dolgu maddesi olarak kullanılır. Jipsin öğütülüp, pişirilip ve suyunun uçurularak (dezitratasyon) yapılan ayrıştırma işlemi ile oluşturulan yapı alçıları sıva işlerinde (katkısız alçı sıvası, kumlu alçı sıvası, alçı kireç sıvası) kartonpiyer işlerinin ilk kaba şekillendirilmesinde, ince sıva (perdah sıvası) kalıp yapma, süsleme işlerinde, duvar blokları, duvar kaplamaları, alçı duvar levhaları ve yapı elemanlarının yapılmasında kullanılır. Alçı, değişik katkı maddeleri ile binalarda prefabrik inşaat malzemesi olarak çeşitli hazır yapı elemanları üretiminde hazır bina duvarları, bölme elemanı, duvar, baca, döşeme, kaplama malzemeleri, panolar, ısı yalıtım maddesi, seramik endüstrisinde, cerrahî ve dişçilikte, kabartma ve süslemede, rölyef, model yapımının yanı sıra kiremit ve heykel kalıpları yapımında kullanılmaktadır. Ateşe dayanıklı yapı elemanı olarak da tercih edilen alçı, çok küçük boşluklar içermesi nedeniyle üzerine gelen ses dalgalarını azaltarak yansıtır. Ses düzeni ve hacim arasında akustik ses geçişini iyi bir şekilde kontrol eder. Bu özelliği dolayısıyla ses izolatörü olarak kullanılır (Karaman; Kibici, 2008).

Kalsit – *calcite*, ($CaCO_3$ - *Mohs* sertliği 3); çimento ve kireç yapımında, saf kalsit boya, plâstik ve kâğıt endüstrisinde dolgu olarak, 'izlanda spatı' türü optik cihazlarda kullanılır. Özel fırınlarda 900°C ısıtılırsa $CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$ reaksiyonuna göre sönmemiş kireç (CaO) meydana gelir. Kireçler CaO hâlinde kullanılamadıklarından su ile karıştırılırsa şişerek ısı verir ve sertleşip sönmüş kireç yani bağlayıcı özelliği olan kalsiyum hidroksit, $Ca(OH)_2$ meydana gelir ($CaO+H_2O \leftrightarrow Ca(OH)_2$ +Isı. Sönmüş kireç kum ile karıştırılarak **harç** elde edilir. Oluşturduğu kireçtaşı *(limestone)* ise yapı taşı, dekoratif amaçlı dış kaplamalarda, ince öğütülerek zeminin iyileştirilmesi, ağartma, betonda agrega

ve yol malzemesi ve metal cevherlerinin izabesinde (ergitme) kullanılmaktadır. Kalsit HCl'de çözülür.

Fluorit – *fluorite*, (CaF_2 - *Mohs* sertliği 4); toplam fluorit üretiminin % 50'si kimya endüstrisinde başlıca hidrojen florür (HF) ve diğer bazı florlu bileşiklerin yapımı için demir-çelik üretiminde eritken olarak, ayrıca cam, fiberglas, mine kaplamalarında da yararlanılır. Az miktarda fluorit çeşitli optik sistemlerde mercek ve prizma yapımında (Yeniyol, 2004), ayrıca mobilya ve çimento sanayiinde, soba, buz dolabı ve pişirme araçlarının çelik kısımlarının kaplanmasında ve sunî kauçuk vb. üretiminde kullanılır.

Apatit – *apatite*, Ca_5 [(F, $_{Cl, OH}$) / $(PO_4)_3$]; *Mohs* Sertlik Skalası'nda yer alan bir mineral olup sertliği 5'tir. Apatit; fosforik asit üretiminde, plâstik maddelerin yapımında, deterjanlarda, diş macunlarında, bazı böcek ilaçlarında kullanılır. Apatit sertliğine yakın ve *Mohs* Sertlik Skalası'na göre sertliği 5 ilâ 6 arasında değişen ve **Firuze**=**Turkuaz (Türk Taşı)**, mavi ile bilhassa mavimsi yeşil renkli, parlak, saydam olmayan ve benekler içeren bir mineral olup rengini içerdiği bakır ve demirden almaktadır. Sekonder gelişen Turkuaz, mücevher taşı olarak kullanılmakta ve zemin *(ground)* yüzeyine yakın çatlak ve boşluklarda bakır içeren alüminyumca zengin kayaların ayrışmasıyla oluşmaktadır. Turkuaz renk olarak yeşile çalan açık mavi renk tonu olarak da bilinmektedir ve Fransızca'da 'Türk' anlamına gelmektedir. Bu renk Türkiye'nin Akdeniz sahillerinin maviden yeşile değişen çeşitli tonlardaki renkliliğinden esinlenilerek türetilmiştir.

Feldspat – *feldspar*, [$K(AlSi_3O_8)$ - *Mohs* sertliği 6)]; toplam feldspat tüketiminin % 40'ı seramik yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca cam, boya ve plâstik sanayiinde, kâğıt endüstrisinde katkı maddesi olarak, yer ve duvar karolarında, kaynak elektrotları üretimi, sertliği 6,5-7 arası olan yüksek ergime derecesine sahip olan olivin minerali gibi ateşe dayanıklı (refrakter) mamul üretiminde kullanılır. Diş porselenlerinin temel ham maddesini ana seramik ham maddelerinden feldspat oluşturmaktadır [Diş porseleni bileşimi: Feldspat (% 81)+Kuvars (%15)+Saf Kaolen (%4)+Metalik pigmentler (%1)]. Pembe renkli feldspatın (ortoklas) bir çeşidi olan ve açık mavimsi parıldayan yüzeyiyle mehtabı anımsatan ve sertliği 6-6,5 olan **Ay Taşı** (feldspat grubu→ortoklas çeşidi, *moonstone;* Almanca–Alm.: Mondstein) çok değerli mücevher taşı olup parlak ya da yarı parlaklıkta görünür ve yuvarlaklaştırıldığında mavimsi ışıklı bir parıltı verir.

Kuvars - *quartz*, (SiO_2 - *Mohs* sertliği 7, yoğunluğu 2,65 g/cm^3, ergime sıcaklığı 1.710ºC). Kuvars, çok dayanıklı ve doğada çok miktarda ve çakıl *(gravel)* ve kum *(sand)* boyutunda yaygın olarak bulunur. Saf olanları daima renksiz ve saydam olup cam sanayiinin temel maddesidir. Camsı ve süt kuvars öğütülerek ve hazırlama işlemlerinden geçirilerek cam, deterjan, boya, seramik, zımpara, dolgu ve metalurji sanayiilerinde, refrakter silis tuğlası, kristal eşya, seramik sanayiinde sır yapımında, yer ve duvar karosunda, sofra eşyası, vitrifiye seramik yapımında, piezoelektrik özelliğe (kristale mekanik basınç uygulanmasıyla malzemede oluşan elektrik alan yaratma yeteneği) sahip olduğundan kuvars kristallerinin saf olanları saatlerde, cep telefonlarında, bilgisayarlarda, dijital teknoloji ve kablosuz teknoloji cihazlarında kullanılır. Ancak optik ve elektronik sanayiinde kullanılan kuvars kristallerinin % 99,99 saflıkta, metalurji endüstrisinde kullanılan kuvarsların ise % 99,5 saflıkta olması istenir. Kuvars minerali aşınması ve bozunması diğer minerallere göre çok az olduğu için iyi bir yapı malzemesidir ve kilden ve organik malzemeden arınmış kuvars kumu gerek sıva, gerekse beton malzemesi olarak aranır, ayrıca hafif gazbeton yapı elemanları *(ytong)* üretiminde kullanılır. Süs taşı, porselen, boya, sabun ve ahşapta dolgu olarak kullanılan kuvars kumu anî sıcaklık değişikliklerinden etkilenmesi istenmeyen malzemelerin yapımında ve sinterleşme sıcaklığı 1.500ºC'nin üzerinde olması durumunda demir-çelik endüstrisinde döküm kumu olarak kullanılır. Dökümcülükte zirkon ve olivin gibi kullanılan kum çeşitleri yanında, kuvarsın döküm kumu olarak tercih edilişinin başlıca nedenleri, kolay bulunuşu, ucuz oluşu ve yüksek refrakterliğidir.

Kuvars kumları, kireç ile karıştırılarak harç yapımında, çimento ile karıştırılarak ince ve kalın sıvalarda, kuvars minerallerinin oluşturduğu kumtaşı kayaları ise taş malzeme veya kaplama taşı olarak kullanılmaktadır. Kuvars, dilinimsiz olup yalnız HF'de uzun bir zamanda çözülür. Demir, mangan, titan ve gama ışınlarından rengini alan menekşe renkli mor kuvarsa **ametist** (**necef**), sarı-turuncu kahverengi limon sarısı kuvarsa **Sitrin,** siyah-beyaz çizgili kuvarsa **oniks**, donuk süt beyazımsı renkli şeffaf olmayan kuvarsa **süt kuvars**, pembe renkli kuvarsa **gül kuvars**, sarımsı ve kahverengi elyaf şeklinde kahverengi demir parçacıklarını içeren ve birbirine çizgisel paralel dizilmiş çok ufak kuvars kırıntılarından oluşan kedi veya kaplan gözü gibi parlak yansımalar yapabilen kuvarsa **kaplan gözü** *(tiger's eye)* adı verilir.

Kalsedon, agat (akik), ve **opal** mikrometre –mikron- (1/1.000 mm) mertebesinde ince mikrokristalli ya da kristalsiz oluşan "kuvars grupları" içinde yer alır. Bunlardan **kalsedon**; ince kuvars liflerinden oluşur ve yarı saydamdır. **Agat (akik-jaspis)** kan kırmızısı renkli kuvarstır ve elyaf şeklinde kuvars taneciklerinden oluşur ve radiyal ışık yayılımlı ve merkezli iç içe geçmiş halkalardan oluşan bir görüntü verir. **Opal** ise hiç kristalleşmemiş (amorf) olup silisçe bol asidik sulardan çökelmiştir ve süt beyazımsı, kahverengi kırmızımsı veya alacalı, benekli renkli olanları değerlidir.

Topaz – *topaz*, (Al_2 [F_2 / SiO_4] - *Mohs* sertliği 8); mücevher taşı olarak kullanılır. Saydam, yarı saydam veya saydam olmayabilir. Renkleri; sarı, pembe, mavi olabilir ve bu renkleri veren madde demir ve kromdur.

Mohs Sertlik Skalası'na göre **Beril** grubu içinde yer alan ve sertliği 7,5-8 arasında değişen koyu yeşil ya da çimen yeşili renkli **zümrüt** ($Al_2B_3[Si_6O_8]$) – **(smaragd)** minerali ise değerli bir mücevher taşıdır ve yeşil rengi krom ve vanadyum iyonları sağlar.

Korendon - *corundum* (=korund, Al_2O_3); elmas parlaklığından cam parlaklığına kadar değişen çeşitli renkleri içeren, aşındırıcı özellikte (zımpara), 9 sertliğinde, dayanıklı bir mineral olup bu kalitedeki taşlar saatlerde ve bilimsel cihazların dayanıklı olması istenen kısımlarında kullanılırlar. Tüm korund çeşitleri asitlerden etkilenmez ve 2.050°C'de ergirler. Renkli korendonlar mücevher taşı olarak kullanılmakta, kırmızı renkli korendona **yakut** (=**rubin**) denmektedir. Yakut'a kırmızı rengini veren içindeki krom (Cr^{3+} iyonları) elementidir. Çizgi rengi beyazdır. Korund'un bir çeşidi olan **safir** (**gökyakut**), genellikle mavi renklidir. Safir; kırmızı renkli yakut hariç, renksiz ve alacalı tüm renkleri içeren bir korund çeşididir. **Zımpara taşı** da, korendonun bir çeşidi olup manyetit, hematit ve kuvars ile karışık olarak bulunur, aşındırıcı özelliğinden dolayı, öğütülmüş ve saf masif korund zımpara taşı olarak kullanılır.

Elmas – *diamond*, (C - *Mohs* sertliği 10); en sert ve en değerli mineral olup sertliğinden dolayı endüstriyel aletlerde kullanılır. Karbon elementinin modifikasyonlarından biri grafit, diğeri ise elmastır. Elmas, dayanıklılığı ve ışığı çok iyi kırmasından dolayı en kıymetli bir mücevherdir (Şekil 2.26). Renksiz veya mavi, beyaz tonlu olanları (asıl elmas) çok değerli olup özel kesilip, işlenerek (**pırlanta**) mücevher taşı olarak kullanılır. Elmasçılarca makbul

olmayan ufak, işe yaramayan yarı saydam (bort) ve siyahımsı saf olmayan (karbonado) elmaslar asıl elmastan daha sert olup elması tıraşlamada ve sondaj kronlarında, sert taşları delmeye mahsus burguların uçlarında, maden kuyuları ve tünel inşaatı için yapılan sondajlarda; ayrıca piyasaya elmas kumu olarak sürülen kalitesiz elmaslar, cam kesmede, makina parçalarının tornalanmasında, mücevher taşlarının aşındırılması ve parlatılmasında kullanılır. Yoğunluğu 3,5 gr/cm^3 olan elmas diğer tüm mineraller arasında en geç ergiyen bir mineraldir ve 3.550°C'de ergir. 720°C' lik saf oksijen ya da 800°C sıcaklıktaki hava akımında oksitlenerek direkt CO_2'ye dönüşür. Manto'da oluşan Peridotit türü kayaçlar, yeryüzünden yaklaşık 150 km derinlikte ve 1.200°C ile 1.400°C'de içlerinde elması oluşturabilir. Derinlerde 'peridotit grubu'na ait kimberlit kayacı içinde oluşan elmas kırıntıları, gazlarca zengin katı volkanik kayaçların anîden püskürmesi ile huni biçimli **kimberlit bacaları** ile yeryüzüne veya yeryüzüne birkaç km gibi yakın kesimlere taşınır.



Şekil 2.26. *Mohs* Sertlik Skalası mineralleri.

2. Bölümün Özeti

Yerküre (dünya), iç çekirdek, dış çekirdek, manto ve litosfer katmanlarından oluşur ve ortalama yarıçapı yaklaşık 6.371 km'dir. Yerkürenin en dış katını oluşturan litosferin üst bölümünde bir kabuk yer alır. Yeryüzünden derinlere inildikçe sıcaklık artar. Yerkürede sıcaklığın 1°C yükselebilmesi için yeryüzünden inilmesi gereken derinlik jeotermik derece olarak adlandırılır. Litosfer içerisinde 2,7 gr/cm^3 yoğunluğundaki yer kabuğunu oluşturan kıtasal kabuk (Sial) ile litosferik manto arasındaki sınır, sismik dalga hızlarının anîden arttığı ve *Mohorovicic Süreksizliği* olarak adlandırılan zonu oluşturur. Litosfer altında yer alan manto ile manto altında yer alan dış çekirdek sınırını oluşturan ve yeryüzünden 2.891 km derinlikteki sınıra Gutenberg Süreksizliği *(Gutenberg discontinuity)* denir. Burada; cisimlerin fiziksel durumlarında büyük değişiklik olmakta, yoğunluk 5,5 gr/cm^3 ten 10 gr/cm^3 e yükselmekte, P-dalgalarının hızı 13,6 km/sn'den 8,1 km/sn'ye düşmekte, sismik S-dalgaları ise dış çekirdeğin sıvı ortamı oluşturması nedeniyle bu sınır bölgesini geçememekte (ihmal edilebilir düzeyde) ve dış çekirdek içine girememektedir.

Yer kabuğunu oluşturan farklı kalınlık ve yoğunluğa sahip malzemeler, manto üzerinde bir denge durumunda yan yana yer alırlar. Bu denge durumuna izostazik denge adı verilir. Yerküredeki tektonik sistem, yerkürenin en dış ve kırılgan katmanı olan litosfer ile onun altında yer alan mantonun (özellikle astenosfer katı) arasındaki ilişkiden kaynaklanır. Isınan manto malzemesinin yarattığı konveksiyon akımlarının, kıtasal ve okyanusal litosfer kökenli katmanı kırıp parçalara ayırarak birbirlerine göre farklı yönlerde sürüklemesi, yerkürenin tektonik sisteminin temel işletici kaynağını oluşturur. Litosfer bu etki ile parçalara ayrılır ve her bir litosfer parçasına levha adı verilir. Levhaların arasındaki sınırlar levhaların birbirlerine göre olan hareketlerine bağlı olarak "uzaklaşan", "yakınlaşan" ve "transform" olmak üzere, üç ana grupta toplanır. Bu sınırlardan uzaklaşan okyanusal levha sınırlarında mantodan, doğrudan yukarıya çıkan malzeme litosfere eklenir. Yakınlaşan levha sınırlarında ise litosfere eklenerek soğuyup bu katmanla bütünleşen manto malzemesi, üzerinde biriken sedimentlerle birlikte bir diğer litosfer parçasının yani levhanın altına dalarak mantoya geri katılır ve böylece uzaklaşan levha sınırlarında başlayan döngü tamamlanır. Yerkürenin dinamik

olayları, aynı zamanda yeryüzü şekillerinin oluşmasındaki en önemli faktörlerin başında gelmektedirler. Uzaklaşan ve yakınlaşan sınırlarda yaygın bir volkanizma gelişir. Ancak bu volkanizmanın kimyası, uzaklaşan levha sınırlarında daha çok manto malzemesinin mağnezyum, demir ve silisyumca zengin kimyası ile benzerlik gösterirken, yakınlaşan levha sınırlarında dalma batma zonunda ikincil erime ile kıtalarınkine benzer bir şekilde, daha çok alüminyum ve silisyumca zengin ve yoğunluğu biraz daha azalmış bir bileşik içerir.

Doğada elementlerin belirli bir kimyasal bileşimi ve atomik düzeni sonucu oluşan, homojen, belirli bir kristal yapısına sahip inorganik ve katı hâlde bulunan cisimler, mineral olarak tanımlanmaktadır. Minerallerden silis camı ve opal gibi bazıları amorf, çoğunluğu ise kristal durumundadır. Mineraller tek bir elementten veya birden fazla elementten oluşabilir. Bir mineral ne kadar küçük parçalara bölünürse bölünsün, her bir parçasında bütünün özelliklerini taşır.

Mağmatik kayaçlar oluşurken, onlarla birlikte katılaşmış olan mineraller primer mineraller olup kayacın ana bileşenini oluşturan esas minerallerdir. Az miktarda, ancak sık sık rastlanılan kayaçla beraber katılaşan primer mineraller ise tâli minerallerdir. Kayacın katılaşması sonrası gelişen minerallere sekonder mineraller adı verilir. Mağmatizma sonrası serizitleşme, kloritleşme, serpantinleşme, kaolinleşme gibi başlıca ayrışım olayları veya başkalaşım (metamorfizma) nedeniyle oluşan mineraller bu gruba girerler. Başlıca sekonder mineral ve grupları, kayaca yeşil rengin muhtelif tonlarını veren klorit grubu; serpantin grubu; karbonat grubu; epidot grubu; kaolen grubu; montmorillonit grubu; zeolit grubu ve mika *(mica)* grubu olarak sınıflandırılabilir.

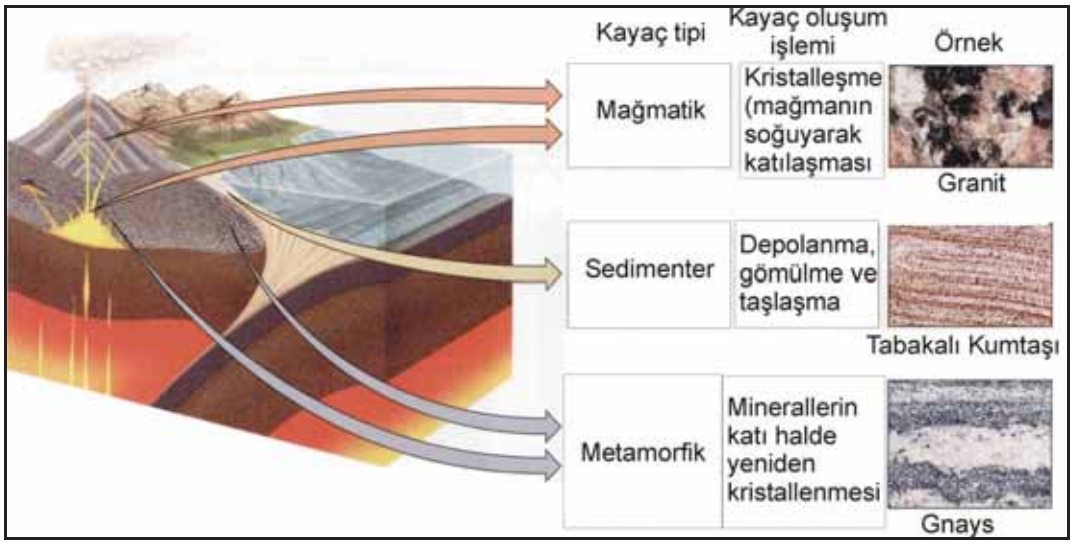
Kayaçlar; fiziksel, fizyolojik, kimyasal ve optik özellikleri ve kristal şekilleri ile tanınırlar. Fiziksel özelliklerden sertlik, minerallerin çizilmeye karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanır. Minerallerin sertlik derecesini belirleyebilmek için pek çok sertlik skalası ve tanımlaması bulunmakla birlikte bunlardan en çok kullanılanı *Mohs* Sertlik Skalası'dır. Özellikle mühendislik çalışmalarında kazılabilme-kırılabilme-patlatılabilme-öğütülebilme açısından minerallerin sertliği önemlidir. Mineraller, inşaat mühendisliğinde de malzeme olma yönünden ayrı bir öneme sahiptirler. Çoğu mineral, inşaat malzemesi olarak ya da değişik sanayi dallarında kullanılmaktadır.

3. BÖLÜM: KAYAÇLAR ve AYRIŞMA

3.1. Giriş

Kayaçlar (kayalar ve zeminler), tek bir mineralin çok sayıda birikmesinden ya da çeşitli minerallerin bir araya gelmesinden meydana gelirler. Mineral toplulukları olarak tanımlanan kayaçlar, oluşum şartlarına ve kökenlerine göre üç gruba ayrılırlar (Şekil 3.1).

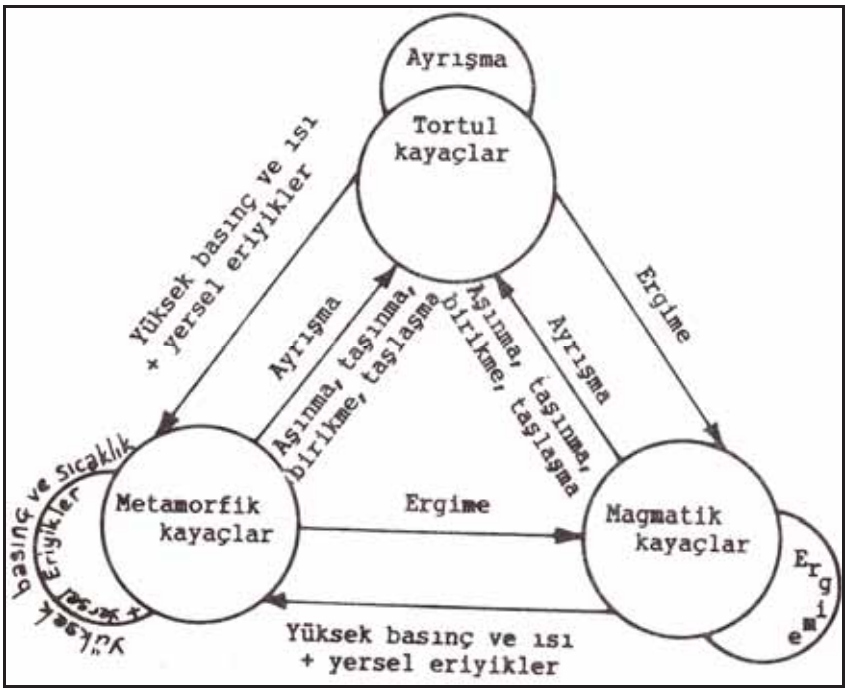
1. Mağmatik Kayaçlar
2. Metamorfik Kayaçlar
3. Sedimenter Kayaçlar



Şekil 3.1. Kayaç türleri ve litosfer içerisinde bulundukları alanlar (*Press* vd., 2004).

Yukarıda sınıflanan kayaç türlerinden sadece mağmatik kayaçlar çoğunlukla manto kökenli kayaç eriyiklerinin katılaşması sonucu oluşur. Sedimenter (sedimanter, çökelik, tortul) kayaçlar ise var olan herhangi bir kayaç

grubunun ayrışıp su, rüzgâr, dalga, buzul vb. dış etkilerle taşınıp bir başka yerde biriktirilmesi ile metamorfik kayaçlar ise herhangi bir kayaç grubunun yüksek sıcaklık ve basınç altında yerin derinliklerinde katı hâlde başkalaşmaları (metamorfizma) sonucu oluşurlar. Her üç gruptaki kayalar, değişik faktörlerin etkisi altında birbirlerine dönüşebilirler (Şekil 3.2).

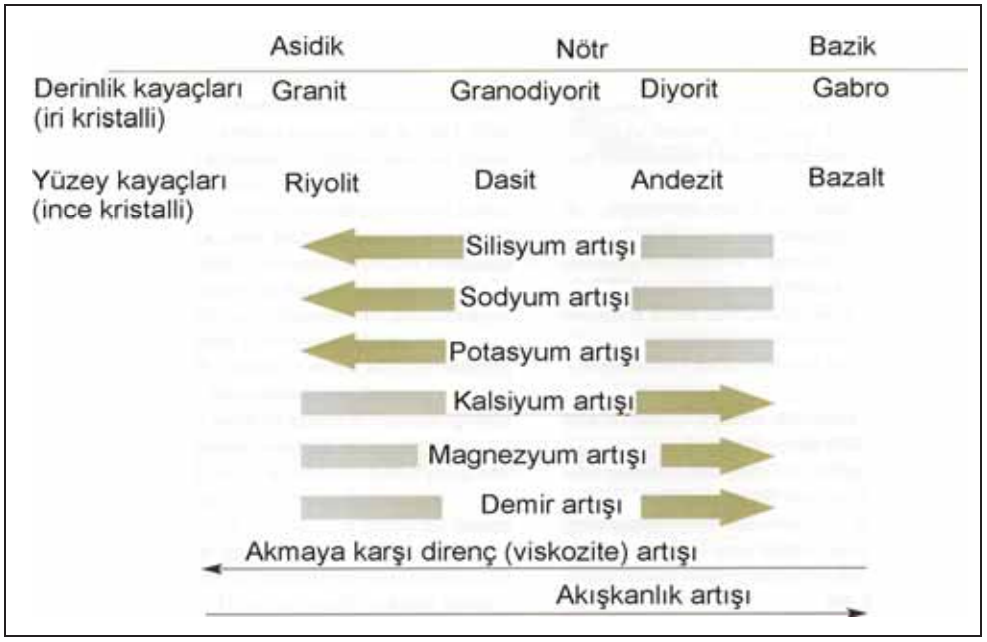


Şekil 3.2. Yeryüzündeki kayaç grupları ve aralarındaki ilişki.

3.2. Mağmatik Kayaçlar *(Igneous Rocks)*

Yeryüzü altında bulunan ergimiş kayaç malzemesine **mağma,** ergimiş hâlde bir silikat hamuru durumunda olan bu mağmanın (=akkor), litosferin farklı derinliklerine veya yeryüzüne kadar yükselip soğuyarak katılaşması sonucunda meydana getirdiği kayaçlara da **mağmatik kayaçlar** adı verilir. Granit, siyenit, gabro, riyolit, bazalt, andezit (*granite, syenite, gabro, rhyolite, basalt, andesite*) en çok bilinen mağmatik kayaç türleridir. Mağmadaki SiO_2 miktarı, ağırlık bakımından % 30 ilâ % 80 arasında yer alır. Mağma içerisinde silikat miktarının değişmesi, oluşan kayacın fiziko-kimyasal özelliklerini de belirler. Meselâ, asidik bir mağmadan oluşan riyolit kayası silisyum oksit ve alüminyum oksitçe (Al_2O_3) zengin açık renkli bir kaya olup bileşiminde silis oranı % 70 (SiO_2) ve üzerinde; bazik mağmadan oluşan ve koyu renkli kayacı oluşturan bazalt kayasının bileşiminde silis oranı % 50, andezit bileşiminde silis

oranı ise % 60 olarak bulunur. Diğer bir ifâdeyle, bu mağma türleri sırasıyla ≥ % 65 silis ve bol miktarda alüminyum, sodyum, potasyum ve az miktarda kalsiyum, demir ve mağnezyum içeriyorsa **asidik (felsik)**; % 52-65 oranında silis içeriyorsa **nötr (ortaç)**; % 45-52 oranında silis ile daha fazla miktarda kalsiyum, demir ve mağnezyum içeriyorsa **bazik (mafik)** bileşenli mağma olarak da adlandırmak mümkündür (Şekil 3.3). Bazik mağma, çoğunlukla manto kaynak alanının bileşimini yansıtır. Okyanusal kabuk bazik bileşimlidir ve Fe ve Mg elementleri bakımından daha zengindir. Bu nedenle, okyanusal kabuk, kıtasal kabuğa oranla daha yoğundur ve astenosfere ait özellikleri doğrudan bünyesinde barındırır. Buna karşın kıtasal kabuk silisyum ve alüminyum elementlerince zengin minerallerden oluşur. Bu malzemenin içerisinden geçen mağma, geçtiği bölgede kıtasal kabuğu eritip bünyesine kabuktan malzeme alarak, bileşimini bazikten, nötr ve asidik bileşime döndürür. Bu nedenle, kıtasal kabukta yer alan mağmatik kayaçlar SiO_2 minerali (kuvars) bakımından daha zengin ve daha az yoğundur.

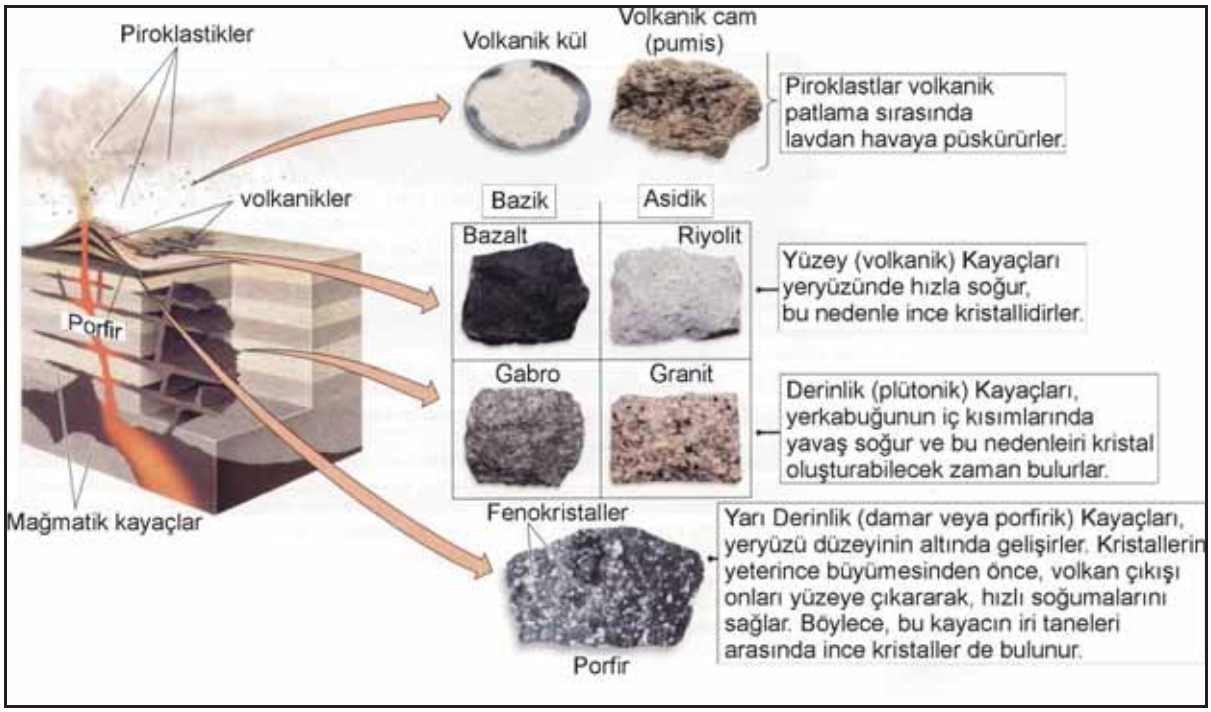


Şekil 3.3. Mağmatik kayaçlardaki kimyasal bileşimin değişimine göre kayaçta izlenen farklılaşma (*Press* vd., 2004).

Bileşimindeki kimyasal farklılıktan dolayı bazik karakterli mağma (% 50 SiO_2 içerir) oldukça akıcı (viskozitesi düşük) ve daha sıcak bir özelliğe sahiptir. Buna karşın, nötr karakterli andezitik mağma (% 60 SiO_2) veya asidik yani

riyolitik mağma (% 70 SiO_2) ağdalı, akmaya karşı daha dirençli (viskozitesi yüksek) ve sıcaklıkları daha azdır.

Mağmatik kayaçların bünyelerindeki SiO_2 miktarındaki değişim, kayaçların renginde de önemli değişimlerin olmasına neden olur. Bazik karakterli demir ve nikel elementlerince zengin mineral ve kayaçlar daha koyu renkli, bunun tersine asidik karakterli SiO_2'ce zengin mineral ve kayaçlar ise daha açık renklidir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Derinlik, yarı derinlik ve yüzey kayaçlarının yer kabuğunda oluştukları bölgeler ile asidik ve bazik karakterli kayaçlara ait örnekler (*Press* vd., 2004).

Mağmatik kayaçlar, oluşup soğudukları farklı derinliklere göre üç gruba ayrılırlar:

a. Derinlik Kayaçları (plutonik-intrüzif kayaçlar)
b. Damar Kayaçları (yarı derinlik-porfirik kayaçlar)
c. Yüzey Kayaçları (volkanik-ekstrüzif-kayaçlar)

Bu her üç kayaç türü birbirlerinden farklıdırlar. Volkanizma ile oluşan kayaçlar doğrudan yüzeyde gözlenebildikleri hâlde, Pluton olarak adlandırılan **intrüzif** (yeryüzünün altında derinlerde katılaşmış, *intrusive*) mağmatik kayaç kütleleri, mağmanın yer kabuğu içinde soğuması ve katılaşması sonucunda oluşurlar ve bunlar, ancak erozyondan sonra yüzeyde gözlemlenebilirler.

Plutonların tümü geometrik özelliklerine ve komşu kayaçlarla olan ilişkilerine göre adlandırılmıştır. Yan kayaç tabakalanmasını kesenler **diskordan plutonlar** (batolit, stok, dayk), yan kayaç tabakalanmasına paralel olanlar **konkordan plutonlar** (lakolit, sill) olarak da adlandırılırlar.

3.2.1. Derinlik kayaçları

Mantodan litosfer içerisine doğru yükselen mağmanın, litosferin farklı derinliklerinde soğuması sonucu oluşan yerin derinliklerinde katılaşmış kayaç türüne **derinlik (plutonik) kayaçları** adı verilir (Tablo 3.1, Şekil 3.5). Mağmanın yavaş soğuması nedeniyle derinlik kayaçlarındaki kristaller yavaş yavaş oluşur ve büyür. O nedenle, bu tür kayaçlar tam kristalli, taneli ve yalnız kristallerden oluşmuşlardır (Şekil 3.6, 3.7). Granit, granodiyorit, diyorit *(diorite)*, siyenit, gabro, peridotit vb. kayaçlar mağmatik kayaçların derinlik kayaçlarını oluştururlar. Oluşup katılaşmalarından sonra onlarca hattâ yüzlerce milyonlara varan seneler boyunca kıta yükselimi sonucu üzerlerindeki kilometrelerce kalınlığa ulaşabilen çökellerin erozyonu sonucu aşınmaları ile bu tür kayaçlar güncel topoğrafyada, zemin yüzeyinde günümüzde de görülmektedirler (örn. İstanbul, Anadolu Yakasında Çavuşbaşı granodiyorit plutonu ve Gebze-Sancaktepe granit plutonu vb.)

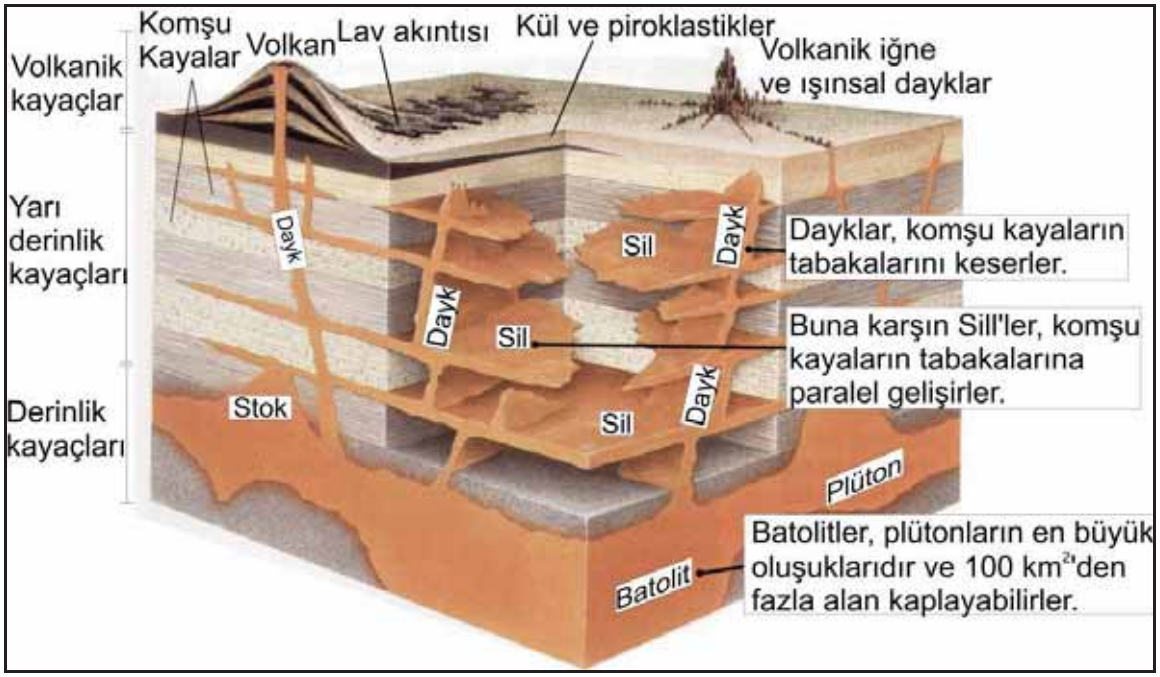
Bulunuş şekillerine göre, derinlere doğru genişleyen ve görülen yüzey alanı 100 km^2 den daha geniş alanlar kaplayan mağmatik intrüzif kütlelere **batolit** *(batholit)*, batolite benzer, ancak daha küçük alanları kaplayan intrüzif mağmatik kütlelere ise **stok** *(stock)* adı verilir.

3.2.2. Damar kayaçları (yarı derinlik kayaçları)

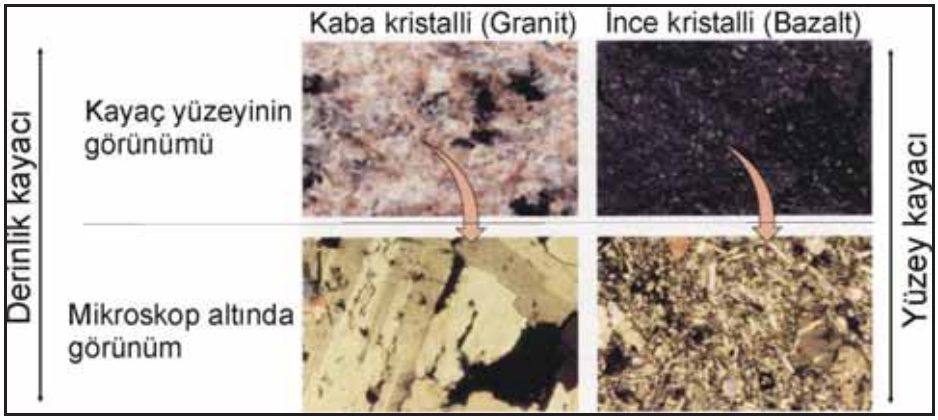
Mağmanın, litosferin üst bölümü olan kabuk içerisindeki yarık ve çatlak gibi süreksizlikleri izleyerek yukarı doğru ilerlemesi sırasında yeryüzüne daha yakın derinliklerde katılaşması sonucu oluşan mağmatik kayaçlara **yarı derinlik kayaçları** (konkordan/uyumlu Pluton; *concordant pluton*, *sheet intrusion*) denir. Yarı derinlik kayaçları, kabuk içerisindeki çatlaklarda damarlar gibi göründüklerinden **damar kayaçları** olarak da adlandırılırlar. Damar kayaçları yeryüzüne yakın derinliklerde boşluk ve çatlaklarda yavaş soğuma ve daha az basınç nedeniyle gelişen iri, çok iri taneli kristallerden oluşurlar (Şekil 3.5). Kayacın bileşimine göre granit pegmatiti, gabro pegmatiti vb. adlandırılırlar.

Tablo 3.1. Mağmatik kayaçların sınıflaması ve başlıca örnekleri (Ketin, 1998).

	Bileşimlerine giren mineraller ve bunların hacım olarak % katılma oranları		PLÜTONİK KAYAÇLAR	Damar Kayaçları	VOLKANİK KAYAÇLAR, X, XX
Kuvarslı - Feldispatlı ve koyu renkli mineralli (SiO_2 : % 75 – 60)	Kuvars Alkali feldispat Asit plajioklas Koyu mineraller	: 10 – 40 : 30 – 60 : 0 – 35 : 10 – 35	GRANİT	Granit - Porfir, Kuvarslı Porfir	RİYOLİT LİPARİT
	Kuvars Alkali feldispat Oligoklas - Andezin: Koyu mineraller	: 10 – 30 : 20 – 50 40 – 85 : 10 – 20	GRANO - DİYORİT	Granodiyorit porfirit Kuvarslı porfirit	RİYODASİT
	Kuvars Andezin - Oligoklas: Koyu mineraller	: 10 – 35 50 – 80 : 10 – 35	KUVARSLI DİYORİT	Kuvarslı diyorit - Porfirit	DASİT
Kuvarssız veya çok az Kuvarslı, Feldispatlı ve koyu renkli mineralli (SiO_2 : % 60 – 46)	Alkali feldispat Asit plojioklas Koyu mineraller	: 30 – 80 : 2 – 25 : 10 – 40	SİYENİT	Siyenitporfir, Ortofir	TRAKİT
	" + Nefelin	: 10 – 32	NEFELİN - SİYENİT	Nefelinit	FONOLİT
	Alkali feldispat Plajioklas Koyu mineraller	: 40 – 50 : 40 – 60 : 10 – 20	MONZONİT	Monzonit - Porfirit	TRAKİANDEZİT, LATİT
	Alkali feldispat Oligoklas - Andezin: Koyu mineraller	: 0 – 10 50 – 60 : 30 – 40	DİYORİT	Diyorit - Porfirit	ANDEZİT
	Labrador (Plajioklas) Piroksen ± Olivin	: 45 – 70 : 25 – 50	GABRO, NORİT	Gabro - Porfirit, melafir	BAZALT DİYABAZ DOLERİT
Kuvarssız ve Feldispatsız veya çok az feldispatlı, koyu renkli - tek mineralli (SiO_2 : % 46 - 30)	Olivin + Piroksen Kromit + Mğnetit	: 85 – 95 : 3 – 10	PERİDOTİT DUNİT (Yalnız olivin)	Kimberlit	PİKRİT
	Esaslı minerali Piroksen		PİROKSENİT	X : Camsı olanlar, obsidiyen, süngertaşı; XX : Taneli, parçalı olanlar, Tüfler, Aglomeralar.	
	Esaslı minerali Hornblent		HORNBLENDİT		
	Hemen - hemen yalnız plajioklaslı		ANORTOZİT		



Şekil 3.5. Derinlik, yarı derinlik ve yüzey (volkanik) kayaçlarının yer kabuğunda bulundukları ortamlar (*Press* vd., 2004).

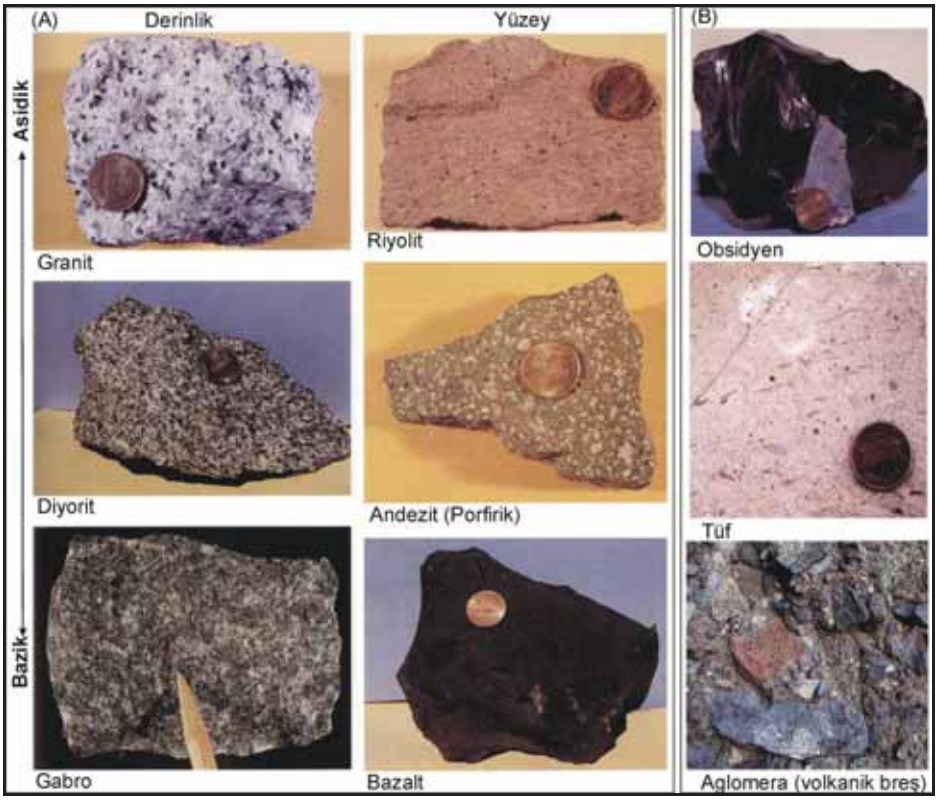


Şekil 3.6. Derinlik kayaçlarından granit ile diğer bir derinlik kayacı olan gabronun yüzeyde oluşmuş kayacı bazalt arasındaki kristal büyüklükleri arasındaki dokusal farkın kayaç örneği üzerindeki (üstte) ve mikroskop altındaki (altta) görüntüleri (*Press* vd., 2004).

Damar kayaçlarında, bulunuş şekillerine göre, yerin derinliklerinden üzerlerinde yer alan çökelik kayaç tabakaları arasına paralel şeklinde sokulup, bu kayaçları kesmemiş, ancak alt kesiminde yer alan dayktan beslenmeye devam ederek üstündeki çökel kayaları tıpkı mantar gibi kabartarak bu şekilde soğuyup şekil almış kayaçlara **lakolit** *(laccolith)* denir. Şayet, içerisinde ilerledikleri kayaçların tabakaları ya da diğer tür kayaçların akma düzlemlerine onları kabartmadan ince katman kalınlığında ve paralel gelişmiş iseler bu tür

mağmatik kayaçlara **sill** *(sill)* adı verilir. Lakolit ve Sill'lere konkordan plutonlar adı da verilir. Diskordan plutonlar ise yan kayaç tabakalanmasını keser. Damar sisteminde de görüldüğü gibi tabakaları dik veya eğik bir açıyla kesmesi sonucu oluşan kayaçlara **dayk** *(dike)* adı verilir ve dayk benzeri yapılar, tektonik etkenlerle de çökelik kayaçlarda (örn. kum ya da çamur daykları, tuz domları) görülebilir.

Damar kayaçları, derinlik ve yüzey kayaçları arasında bir geçiş safhası teşkil ederler ve genellikle porfir veya porfirit şeklinde adlandırılırlar (örn. granitporfir). İri kristalli gelişen damar kayaçlarına **pegmatit** adı verilir.



Şekil 3.7. Kimyasal bileşimlerine ve oluşum derinliklerine göre kayaç örnekleri (*Press* vd., 2004).

3.2.3. Yüzey kayaçları (volkanik kayaçlar)

Yüzey kayaçları (ekstürizif; *extrusive igneous rocks*), mağma lâvlarının bir baca ile yeryüzeyine yakın yerlerine veya yüzeye taşınarak soğumaları ile oluşan kayaçlardır. Çabuk soğudukları için kristalleri ufaktır. Genellikle büyük kristalleri çevreleyen küçük kristalli bir matriksten (**porfirik doku**) oluşurlar. Özel şartlar dışında genel olarak kristalleri iri taneli derinlik kayaçları ile farkları ince

taneli ya da camsı dokulu oluşlarıdır. Örnek olarak derinlik kayaçlarından granit, yüzeye çatlaklar boyunca ulaştığında→ **riyolit**; diyorit→**andezit-dasit**; siyenit→**trakit**; gabro→ **bazalt**; peridotit ise **pikrit** adını alır. Lâvlar, yüzeyde çok hızla soğuduklarında, kristalleşme olmaz ve oluşan doku camsıdır.

Yerin derinliklerinden gelen mağma malzemesinin volkanik etkinlikle yeryüzüne katı, sıvı ve gaz ürünleri çıkarması ile oluşan olaylara **volkanizma,** mağma malzemesinin yüzeye iletildiği süreksizliklere **baca** denir. Burada, mağma malzemesi, >100 km derinliklerden damlalar şeklinde oluşup yükselerek 2 km ile 50 km derinlikler arasına yerleşerek birikir ve gittikçe büyüyen, şişen, akıcı derinlik kayaçlarının meydana geldikleri mağma haznesini oluşturur. Yükselen mağma haznesinin artan basınç nedeniyle yeryüzüne doğru oluşturduğu zayıflık zonları ya da tektonik kırıklar boyunca (baca) lâvlarını yüzeye taşır ve yeryüzünde baca etrafında soğuyarak yığılan lâv ve piroklastik malzemeler birikip tümsek, tepe veya dağ boyutunda morfolojik yapıları oluşturur ki bunlara **volkan (yanardağ)** denir. Lâvların yüzeye çıktığı andaki çıkış sıcaklığı asidik (felsik, riyolitik) lâvlarda 650°C - 950°C, bazik (mafik, bazaltik) lâvlarda genellikle 1.200°C - 1.300°C civarındadır ve soğuyan sertleşmiş lâv, volkanik kayacı oluşturur. Ağdalı asidik lâvlar yeryüzünde en çok birkaç onlarca km içinde etrafa yayılarak soğurlar (örn. koni biçimde strato tip volkanları oluşturan Erciyes, Nemrut, Hasan ve Ağrı Dağları). Yüksek demir ve mağnezyum içeren bazik lâvlar daha çok akıcıdır ve yüzeye çıktığı andaki sıcaklığı >950°C dir. Yüksek mağnezyum-demiroksit ve mafik mineraller içeren (piroksen, amfibol ve olivin) yeryüzünün ilk kabuğunu oluşturan Ultramafik (ultrabazik, silikat katılımı ≤%45) lâvlar ise 1.600°C sıcaklıklarda ve viskozitesi su gibi çok düşük dolayısıyla çok akışkandırlar.

Volkan bacasının yeryüzüne açılan ağız kısmına **krater**, oluşan kayaçlara da **volkanik kayaçlar** ya da **yüzey kayaçları** denir. **Kaldera** ise volkan konisinin tepe kısmının çökmesiyle oluşan dairesel-kazan biçimli, çapı 1 km - 250 km arasında değişen çöküntüdür (örn. Nemrut Kalderası/Türkiye; ***Yellowstone Süper Volkanı*, *Wyoming*-ABD).

Mağma içinde, yüksek basınç altında sıvı hâlde bulunan çeşitli gazlar, mağmanın yeryüzüne yakınlaşması ile mağmadaki çok yüksek basıncın azalması nedeni ile sıvı hâlden gaz hâline dönüşürler. Lâv içindeki gaz artışı da süreksizlikler (çatlaklar) boyunca lâvların yeryüzüne taşınarak püskürmelere

neden olur. Bu gazlar, volkanik faaliyetin oluşmasının en önemli nedenidir. Bu tıpkı bir gazoz şişesinin kapağının açıldığında sıkışan karbonat gazının sıvıyı da taşıyarak fışkırması gibidir. Bu tip mağmatik kayaçlar, mağmanın 600°C ile 1.300°C sıcaklıkta yeryüzüne kadar ulaşıp yüzeye püskürmesi sonucu oluşurlar. Bazik karakterli mağma (% 50 SiO_2 içerir) oldukça akıcı (viskozitesi düşük) ve daha sıcak bir özelliğe sahiptir ve yeryüzüne lâv olarak yayıldığı püskürme döneminde tüm alanı halı benzeri bir biçimde örterek **taşkın veya plâto bazaltları**nı oluşturur (*Mauna Loa/Hawaii*). Buna karşın nötr karakterli andezitik mağma (% 60 SiO_2) veya asidik yani riyolitik mağma (% 70 SiO_2) ağdalı, akmaya karşı daha dirençli (viskozitesi yüksek) ve sıcaklıkları daha azdır. Bu nedenle, asidik tip mağmanın; yeryüzüne püskürme işleminde şiddetli patlamalar meydana gelir. Bu ağdalı asidik volkanizma oldukça dik bir koni biçimli (**strato volkan**) topoğrafyayı oluşturur ve daha sınırlı bir alana yayılır. Ayrıca bu tip volkanların sivri bir tepe noktaları olup yamaç eğimleri 35° veya daha yüksektir (**strato tipi volkanlar: Ağrı, Nemrut, Süphan, Erciyes ve Hasandağı/Türkiye,** *Vezüv* ve *Stromboli*/İtalya, *Fuji*/Japonya, *St. Helens*/ABD). Püskürmeler sonucu oluşan volkanlar dışında volkanların bir sıra hâlinde dizilmesi ile de volkanik dağ kuşakları oluşur (örn. And Dağları, Japonya Adaları).

[Yellowstone* Ulusal Parkı *(Yellowstone National Park)* içinde bulunan *Yellowstone* Süper Volkanı; ABD kuzey batısında *Wyoming* eyaletinde yer alır ve en son 640.000 yıl önce patlayan *Yellowstone* Kalderası dış çekirdek-alt manto sınırı derinliklerinden beslenen (sıcak nokta-*hot spot*) Amerika Kıtası'nın en büyük aktif süper volkanıdır ve günümüzden yaklaşık 11.000 yıl öncesinden itibaren Yerli Amerikalıların (Kızılderili) yaşadığı bu bölge, yüzlerce ******gayzer, binlerce çamur volkanları ve sıcak su kaynaklarını içerir. Yaklaşık 9.000 km^2 lik (kuzey-güney: 102 km, doğu-batı: 87 km) bir alanı kaplayan süper volkanın oluşturduğu platonun ortalama yüksekliği 2.440 m'dir. Zemin yüzünden >8 km derinliğinde yer alan mağma odası 60 km x 40 km gibi çok büyük boyutlarda olup kalınlığı 10 km'dir. Mağma odası alttan bir baca vasıtasıyla daha derinde yer alan alt manto-dış çekirdek sınırından devamlı beslenmesi ve gaz oranının da gittikçe artması nedeniyle hızla büyümekte ve zemin yüzeyini şişirerek her ay yaklaşık 1 cm yükseltmektedir. Bu süper volkanın aktifliği 15 milyon sene önce ABD-*Idaho* güney batısında iken sıcak noktanın sabit, üzerindeki Amerika Kıtası'nın hareket hâlinde olması sonucu süper volkan yerleri 15 milyon sene içinde yaklaşık 600 km doğu-kuzeydoğu yönünde yer değiştirmiş son 2 milyon sene içinde bugünkü yeri olan Yellowstone Ulusal Parkı'nda aktifliğine devam etmiş ve etmektedir. Süper volkanların her bir patlaması ve sonuçları günümüzde aktif olan normal bir volkandan 1.000 kat daha büyük olmaktadır.

Dünyada patlamanın şiddeti volkan patlama indeksindeki (*Volcanic Explosivity Index-VEI)* değeri en yüksek, yani sekiz (VEI-8) ve daha büyük olan oldukça güncel aktif süper volkanlar 5 değişik ülkede (Endonezya/*Sumatra*, ABD, Şili, Yeni Zelanda, Arjantin) yer almakta VEI şiddet değeri 8 olan bir volkanın patlaması durumunda ise binlerce km^3 lâv, ses hızının üstünde bir hızla stratosferin 50 km yüksekliğine kadar fırlamakta ve patladığı andaki malzemesini her türlü yaşamın son bulduğu 100 km uzaklığa kadar yaymaktadır. Oluşturduğu volkan tozu ise tüm dünyayı sararak "volkanik kış"ın başlamasına neden olmaktadır. Günümüze en yakın zamanda patlamış olan VEI-8 şiddetinde iki adet süper volkan bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi 74.000 yıl önce patlayan ve patlamasını periyodik olarak 380.000 yılda bir tekrarlayan Endonezya'nın *Sumatra* Adası'ndaki Toba (Toba Gölü, *Lake Toba*) süper volkanı, diğeri ise bir milyon sene önce ve son olarak da 640.000 sene önce patlamış *Yellowstone* (*Yellowstone* kalderası) süper volkanıdır. Periyodik olarak yaklaşık 600.000 yılda bir patlayan *Yellowstone* süper volkanı son patlamasında tüm Kuzey Amerika'da yaşayan canlıları yok etmiştir. Yapılan tahminlere göre günümüzde de her an tehlike arz eden *Yellowstone* süper volkanı ± 50.000 yıl içinde tekrar patlayacaktır.

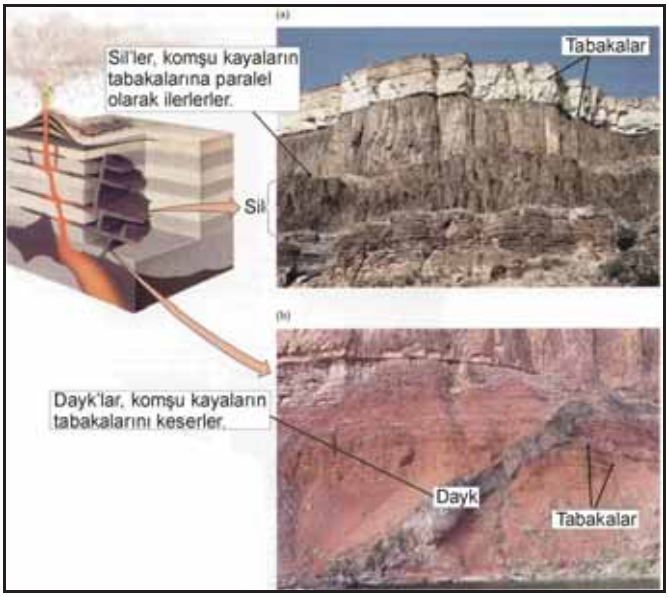
****(Gayzer,** *(geyser)*: Mağmanın yüzeye yakın olduğu volkanikçe aktif bölgelerde yerin yaklaşık 2.000 m derinliklere kadar uzanan kızgın kayaların arasında yer alan çatlaklara yüzeyden sızan sızıntı suların bu kesimlerde aşırı ısınarak (>100°C) yüzeyde düzenli veya düzensiz aralıklarla, basınç artışı nedeniyle bir hidrotermal patlama yaparak zemin yüzeyinden havaya 20 m – 80 m gibi yüksekliklere fışkırmasıyla oluşan sıcak su kaynağı)**]**.

Volkanik kayaç oluşumu sırasında mağmanın yeryüzünde anîden soğuması nedeniyle oluşabilecek kristalleşme miktarı çok sınırlı ve oluşan kristaller ise çok küçüktür. Bu kristaller genelde camsı bir hamur içerisinde serpilmiş bir durumda yer alır. Volkanik mağma, zemin yüzeyinde lâvın çok hızlı soğuması durumunda hemen katılaşır ve kristalleşemez (camsı doku) ve volkan camı oluşur (örn. obsidiyen; *obsidian,* Şekil 3.7). Doğal cam olarak da adlandırılan ve genellikle granit/riyolitik kökenli asidik (felsik) lâv akıntılarının soğumanın hızlı olduğu kenar bölümlerinde oluşan obsidiyen, bileşimindeki % ≥70 silis (SiO_2) ve çok hızlı soğumaya bağlı olarak mineralleşmeye fırsat bulamadan oluşmasına rağmen mağmatik kayaç olarak kabul edilir. Obsidiyen kristal yapıda olmadığından, keskin kenarları moleküler inceliğe ulaşır ve bu özelliğinden dolayı, eski çağlarda ok ve mızrak ucu olarak kullanılmıştır. Volkanik camların tamamı amorf ve asidik olup bünyelerinde bir miktar su (kristal suyu) içerirler ve buna göre adlandırılırlar. Genellikle siyah ve kahverengi görünen **obsidiyen'**de su miktarı % 1 ilâ % 2 (ağırlıkça) arasındadır. Diğer bir volkanik kayaç **perlit** *(perlite)* ise; beyaz, incimsi görünüşlü, bezelye

büyüklüğünde camsı küreciklerden oluşan, bünyesindeki su miktarı % 3 ilâ % 4 (ağırlıkça) arasında değişen ve obsidiyenin hidratlaşması sonucu sonradan oluşan kristalsiz (amorf) bir volkanik kayaçtır.

Dünya perlit rezervlerinin yarısından fazlası Türkiye'de bulunmaktadır. Bilhassa Ege bölgesinde bol miktarda bulunan perlit, yaklaşık 800°C ilâ 1.000°C arasında hızlı bir şekilde ısıtıldığı zaman, doğal bir cam olduğu için amorf yapısından dolayı önce yumuşar, bünyesindeki suyu kaybederek mısır gibi patlayarak genleşip (genleşmiş perlit), orijinal hacmi yaklaşık 20 kat kadar artar ve 2,2 gr/cm^3 - 2,4 gr/cm^3 olan orijinal yoğunluğu azalarak 0,03 gr/cm^3 - 0,3 gr/cm^3 arası bir değere düşer. Hafif, bol gözenekli bir yapıya sahip olan perlit; inşaat, tarım, sanayi, metalurji seramik ve cam sanayiinde katkı maddesi, ilaç ve kimya sanayiinde dolgu maddesi, sondajlarda, çimentolama işlemini kolaylaştırıcı katkı maddesi, gemi dipleri kaplama ve yalıtımında, petrol artıklarından veya diğer yağlı atıklardan gelen su kirliliğini gidermede, baraj göllerinde, kentlerde, açık su rezervuarlarında buharlaşmayla oluşan su kaybını önlemede, ambalajlama için dolgu maddesi, plâstik köpüklere ve plâkalara katkı dolgu maddesi, ucuz ve hafif plâstik mobilya yapımında dolgu maddesi, yangına karşı özellikle çelik konstrüksiyonlarda yalıtımlarda bahçecilik, tarım gübreleme havalandırma nem kontrolü, izolasyon, konut yapımında ısı yalıtım ve yangından korunma vb. ticarî bir ürün olarak kullanılır. Perlit bilhassa inşaat sektöründe; perlitli sıvalar, perlit agregalı hafif yalıtım betonu ve hafif yapı elemanları, ısı ve ses yalıtıcı gevşek dolgu maddesi, yüzey döşemelerde ısı-ses yalıtıcı ve özel amaçlı perlit beton yapımında kullanılır (MTA, http://www.mta.gov.tr).

Volkanik camın bünyesindeki su % 4 - 10 (ağır.) arasında ise mat, siyah, camsı **pekştayn** *(pitchstone)* adını alır. Lâvlar, şayet yüksek su miktarı yanında bol miktarda da gaz (CO_2) içerip, gazlar da lâvlardan ayrılmaya fırsat bulamadan hızla soğumuş iseler bu durumda **sünger taşları'**nı *(pumice)* oluştururlar. Yanardağların püskürmesi sırasında atmosfere değişik boyutlarda piroklastik malzeme (ateş kalıntıları) yayılır. Bunlar havada katılaşır ve tane büyüklüklerine göre çakıl-blok boyutundan tüf boyutuna kadar püskürme merkezinden farklı uzaklıklarda yeryüzüne düşerler (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Yarı derinlik (damar) kayaçlarının doğada görünümleri. A) Tabakalara paralel olarak sokulmuş mağma kayacı (sill); b) Tabakaları kesen süreksizlikler boyunca gelişen mağma kayacı, dayk (*Press* vd., 2004).

Volkanlardan yeryüzüne ulaşan akıcı nitelikteki lâvların bazik olanları daha sıcak ve çok akıcı, asit olanları ise ağdalı ve sıcaklıkları daha azdır. Kırıntılı malzeme ve lâv dışında, püskürme sırasında kraterden gaz-buhar boşalması da meydana gelir. Atmosfere, gaz ve buhar boşalması ile birlikte, volkandan fırlayan lâv parçaları, havada kısmen veya tümüyle hızla soğuyarak değişik şekillerde ve boyutlarda cisimler meydana getirirler. Bir kül bulutu hâlinde çok geniş alanlara yayılabilen irili ufaklı taneler ve lâv zerrelerinden oluşan kırıntılı volkanik malzeme, oldukça kısa bir zamanda soğuyarak yeryüzüne geniş alanlara çökelip katılaşırlar. Çökelen bu volkanik kayalar; tane boyutları 0,06 mm'den küçük ise **toz**, 0,06 mm ilâ 2 mm arasında ise **kül**, 2 mm ilâ 64 mm arasında iseler **lapilli taş** adını alırlar. Toz+kil boyutunda çökelip katılaşan volkanik malzemeye **tüf** *(tuff)* adı verilir. Eğer, ince ve ufak tanelerden oluşan tüfler, çevrede bulunan yüzey ya da yeraltı suları altında, göllerde veya sığ denizlerde ince taneli tortul maddelerle birlikte çökelmiş ise **tüfit** *(tuffite)* adını alırlar.

Püskürtülmüş iri lâv parçacıklarının havada dönerek dönme izleri de oluşturarak soğumayla oluşan, elips şekilli ve tüfler içinde rastlanan mağma kökenli iri kaya parçalarına **bomba (volkan bombası)** denir. Volkan bombaları, iri lâv parçalarının volkanın patlaması esnasında, havada hareket hâlinde iken soğuyarak katılaşması ile oluşmaktadırlar.

Karasal volkanların yamaçlarında aşırı yağmur yağması veya kar erimesi sonucu oluşan sellenme ile sıkışıp duraylı hâle gelmemiş volkanik kül ve tozların eğim aşağı su+çamur hâlinde hareketi ile oluşan minimum % 5 su içerikli bulamaç çamurun eğim aşağı akması sonucu oluşan çökellere **volkanik çamur akıntısı** ya da **lahar** (çamur akması) adı verilir. Birçok lahar oluşumu volkanik püskürmeden sonra oluşan aşırı yağış ile birlikte duraysız yamaçlarda başlamaktadır. Diğer bir kısmı da volkanik olmayan yığın akmaları şeklinde de oluşabilmektedir (bk. Bölüm 9. Kütle Hareketleri). Akış hızları saatte 5 km/h ilâ 80 km/h arasında değişen yığın-moloz akması, ıslak betona benzer şekilde plâstik bir malzeme gibi davranmaktadır. Günümüzde de batı USA, Kanada, Avrupa Alpleri, Kazakistan gibi ülkelerde sık sık rastlanılan **laharlar**/çamur akmaları yüksek yoğunluğa (2 gr/cm^3 - 2,5 gr/cm^3) sahiptirler ve bünyelerinde kil boyu tanelerin fazlaca bulunması, çok kötü boylanmaları, tabakalanmasız olmaları, içlerinde bitki, odun parçaları ve büyük kaya blokları içermeleriyle tanınırlar.

Türkiye'de Erciyes, Hasandağ gibi volkanların püskürttüğü lâv ve tüfler, çok geniş bir alana yayılmış Kapadokya bölgesini (Aksaray-Nevşehir-Kırşehir, Niğde, Kayseri illerini kapsayan bölgeler) ve bu bölgedeki ***peri bacalarını** oluşturmuşlardır (Şekil 3.9. A, B ve C).

***[Peri bacası** *(fairy chimney)*: Vâdi yamaçları boyunca, soğuyarak çatlaklı düzlemler içeren bazalt gibi sertleşmiş lâv katmanları veya volkan bombası adı verilen soğumuş iri lâv blok veya kaya parçalarının, altlarında yer alan yumuşak tüf katmanlarını çevrelerine nazaran yağmur, rüzgâr gibi etkenlerin aşındırmasından (erozyon) kısmen koruyup şapka görevi görerek, birlikte oluşturdukları arı kovanı veya koni biçimli yapılardır**]**.

Asidik lâvların veya silisçe zenginleşmiş sıvı mağma artıklarının katılaşmaları ve bezelye tanesinden, iri yumrulara kadar değişen farklı büyüklükte, camsı kristallerden oluşan, şekilsiz, delikli dokulu ve poroz yapılı, yoğunlukça sudan hafif kayalar **sünger taşları** (=**pomza taşı, topuk taşı**, *pumice,* Alm.: Bimsstein) olarak adlandırılır. Sünger taşı kısaca, açık renkli, silisik asitli, amorf, çok hafif ve köpüksü, suda yüzen bir süngersi lâv ya da volkanik köpük olarak da tanımlanabilir. Sünger taşlarının oluşabilmesi için lâvların volkandan çok yüksek sıcaklık ve basınç altında yüzeye ve havaya püskürtülmesi (gazlı bir içeceğin kapağının açıldığında dışarı hızla püskürmesi benzeri gibi) ve aynı anda hemen soğumaları, suyun ve karbondioksitin çözünürlülüğü azalarak soğuyan

malzeme içinde kalıp kaçamayarak, bol boşluk oluşturması gerekmektedir. Günümüzde dünya rezervlerinin yaklaşık % 45'inin Türkiye'de, İç Anadolu'da bulunduğu sünger taşı; diş macunu, tarım, tekstil, kimya, savunma sanayi ile en yaygın olarak da hafif tuğla yapımında kullanılmaktadır.

Volkan konisi üzerine, krater kenarına veya yakın çevreye düşen iri volkanik kaya parçaları buralarda aglomeraları meydana getirirler. **Aglomera**; volkanizma ile oluşan, volkanik hamurla tutturulmuş, irili ufaklı kayaç kırıntılardan oluşan katılaşmış mağmatik bir kayadır ve volkanik (lâv) hamur içinde daha önce oluşup katılaşmış volkanik çakılların yanı sıra sedimenter kayaç çakılları da bulunabilir (volkan çakılları+volkan külü±sedimenter kayaç çakılları). **Konglomera** (çakıltaşı) ise değişik kökenli çakılların, sığ deniz veya göl dibinde suyun da etkisiyle çamur, karbonat ya da silis benzeri bir hamur ile tutturulmuş sedimenter (çökelik) bir kayadır. Diğer bir ifâde ile çakılları bir arada tutan hamur konglomerada çökelik kökenli, aglomerada ise volkanik kökenlidir.



Şekil 3.9.A) Aksaray İli civarında henüz yeni gelişme aşamasında olan "peri bacaları". Alt kesimler yumuşak tüfler, üst kesimler ise yine volkanik kökenli sert, çatlak takımları içeren lâv kayalarından oluşmakta. Yumuşak tüfler ile üzerlerinde yer alan şapka görevini üstlenen sert çatlaklı volkanik kayalar farklı dayanımları nedeniyle yağışlarla ve rüzgârlarla oluşan erozyonda peri bacalarının oluşumlarını sağlamaktadır *** (11.05.2007).**

***[Kitapta yer alan tüm "Şekil"lerde, atıflı tarihler haricinde parantez içinde yer alan tarihler, birinci yazar tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalara ait tarihlerdir].**



Şekil 3.9.B) Aksaray İli, Kapadokya bölgesinde oluşmuş peri bacaları *(fairy chimneys in Cappadocia)*. Bir peri bacasının üstünde yer alan sert volkanik kaya, şapka görevi görür ve peri bacasının ömrünü belirler (11.05.2007).



Şekil 3.9.C) Aksaray İli, Kapadokya bölgesi. Volkanik lâv kaya ve bloklarının (volkan bombası) olmadığı ve sadece tüften oluşan kesimlerinde, peri bacaları oluşmamaktadır. Fotoğrafta; tüflerin oluşturduğu yamaçlarda incelemelerde bulunan; Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı Öğretim Üyeleri ile tepe düzlüğünde Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı Öğretim Üyeleri görülmektedir (11.05.2007).

3.2.4. Mağmatik kayaçların yapı ve dokuları

Yapı, *(structure)*; bir kaya kütlesinin arazide büyük ölçekte görülen doğal mimarî özellikleridir. Burada kaya kütlesinin fiziksel görünümünü, kayayı oluşturan mineral topluluklarının birlikte oluşturdukları fiziksel görünüm ve karakterleri belirler ve kaya kütlesi yapısının şekillenmesinde önemli rol oynarlar. Ayrıca değişik kaya türlerinde mostralarda görülen fay, eklem, kıvrım, akma veya tortul kayaçlarda tabakalanmaların oluşturduğu arazi görünümleri de yapı anlamındadır **[**örn. bazaltların soğumaları ile meydana gelen çatlak sistemlerinin oluşturdukları sütunsal yapı (Şekil 3.10), çatlaklı yapı, sünger yapısı, yastık yapısı *(pillow lava)* ya da mineralleri belirli yönlerde paralellik göstermeyen çatlaksız ya da sık çatlak *****düzlemleri içermeyen mağmatik kayaların oluşturduğu masif/som yapı**]**. Kayaların yeryüzünde görünen, yüzeylenen kısmına **mostra** *(outcrop)* denmektedir.

*****[Düzlem: En az iki çizgiyi içinde barındıran, iki boyutlu sınırsız düz geniş alan]**.**



Şekil 3.10- Bazaltlarda (Üst Kretase döneminde oluşmuş) görülen prizmatik sütunsal yapılar. Genellikle volkan bacalarının bulunduğu yerlerde lavların yavaş soğumaları ile gelişen düzenli çatlak sistemleri, bazaltları biçimlendirerek prizmatik sütunsal yapıları meydana getirmiştir. Üst Kretase döneminin farklı zamanlarında (dağın alt ve üst yarısı) volkanın püskürmesiyle volkanın baca kesiminde lav akıntıları yavaş yavaş soğuyarak bu tür yapılar oluşmuştur. İstanbul Asya Yakası Riva, Paşamandıra Kavşağı'nda yer alan terk edilmiş bu taş ocağı, korunması gerekli bir jeopark alanı olarak dikkate alınmalıdır (22.01.2013).

Doku, *(texture)***;** kayaların minerallerinin, bir el numunesi veya mikroskop altında, boy, şekil ve dizilimleri olmak üzere, kayacı oluşturan tanelerin görünüm, boyut, biçim ve düzenlerini (üç boyutlu) içeren geometrik dizilişi ve görünüşüdür. Mağmatik kayaçların dokusu, mağmanın veya lâvın soğuma hızına, basınç ve sıcaklık gibi bulunduğu ortamdaki şartlara bağlıdır ve genellikle yerin derinliklerinde yavaş soğuma, iri kristallerin oluşmasına neden olur ve bu dokuya **faneretik doku** adı verilir. Minerallerinin gözle görülebildiği bu doku tüm plutonik kayaçlarda görülür. Yüzey kayaçlarında ise yüzey veya yüzeye yakın lâvlarda hızlı soğuma ile oluşan ve ancak büyütme ile görülebilen çok ince taneli doku **afanatik doku**, büyük boyutlu kristaller ile onları çevreleyen küçük tanelerin oluşturduğu doku da **porfirik doku** adını alır.

Genel olarak mağmatik kayaç dokuları, kayaç tanelerinin kristalleşme derecelerine (tüm veya yarı kristalli, tüm camsal), kristal büyüklüklerine (faneritik, afanatik dokulu), tane boyutlarının birbirlerine nispetlerine (taneli, porfirik doku), şekillerine ve birbirleri ile olan ilişkilerine göre de (panidiomorfik, panksenomorfik, hipidiomorfik doku) sınıflandırılırlar.

Mağmatik kayaçların dokuları, mineral cinsleri, mineral büyüklükleri, kenetlenme dereceleri, ayrışma durumları, mağmatik kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemede başlıca rolü oynarlar. Bu nitelikler, mağmatik kayaçların inşaat veya yapı malzemesi olarak kullanımlarında önemli rol oynarlar.

Mağmatik kayaçların kullanım alanları, oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Yapı malzemesi olarak kullanılmak istenen mağmatik kayaların öncelikle alkali-silis reaksiyonu sonucu oluşan genleşmeler açısından zararsız, yoğunlukları 2,55 gr/cm^3 den büyük ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir. Ayrıca bu tür kayalar, ayrışmamış ve sağlam kaya olmaları kaydıyla gerek binalar, gerekse barajlar için çoğunlukla iyi bir temel zemini oluştururlar.

Yüksek dayanımlı beton imalâtında granit ve özellikle bazalt gibi sert mağmatik kökenli agregalar kullanılmaktadır. Çatlaksız, som yapılı ve ayrışmamış *(unweathered)* granit, siyenit, gabro gibi mağmatik kayaçların derinlik kayaları ile bazalt, diyabaz, riyolit, trakit gibi volkanik kökenli kayalar, yapılarda taşıyıcı sütun olarak, bina temellerinde *(structure foundations)*, dış duvar, döşeme, merdiven, mutfak tezgâhı kaplamalarında, anıt

merdivenlerinde, duvar panelleri, taş oymacılığı, mezar anıtları, lahitlerde ve sıkça sürtünmeye mâruz kalan dalgakıranlar, rıhtım duvarları, yollarda ve kaldırım/bordür (kenar taşı) taşları olarak kullanılırlar. Bilhassa granitik kayaçlar, iyi cila alma, renk çekiciliği ve sağlamlığı ile tercih edilmektedirler. Sağlam, ancak aşırı sert bazaltik kayaçlar, çok kırılgan yapıya sahip olduklarından, başta karayolları ve demiryolu hatları altyapılarında pek tercih edilmezler.

Mağmatik kayaçların yüzey kayaçlarını oluşturan volkanik kayaçlardan tüfler; inşaat sektöründe hafif tuğla yapımında; yoğunluğu 0,5-1 gr/cm^3 arasında olan sünger taşları (pomza taşı, *pumice*); inşaat sektöründe hafif beton blok üretiminde, ısı yalıtımında, aşındırıcı özelliğinden dolayı abrazif (aşındırıcı) sanayiinde, yüksek su depolama kapasitesi nedeniyle tarımda, su arıtma malzemesi olarak ve boya, kimya, cam, mobilya, elektronik sanayiilerinde, seramikte vb. kullanılmaktadır.

3.3. Metamorfik (Başkalaşım) Kayaçlar *(Metamorphic Rocks)*

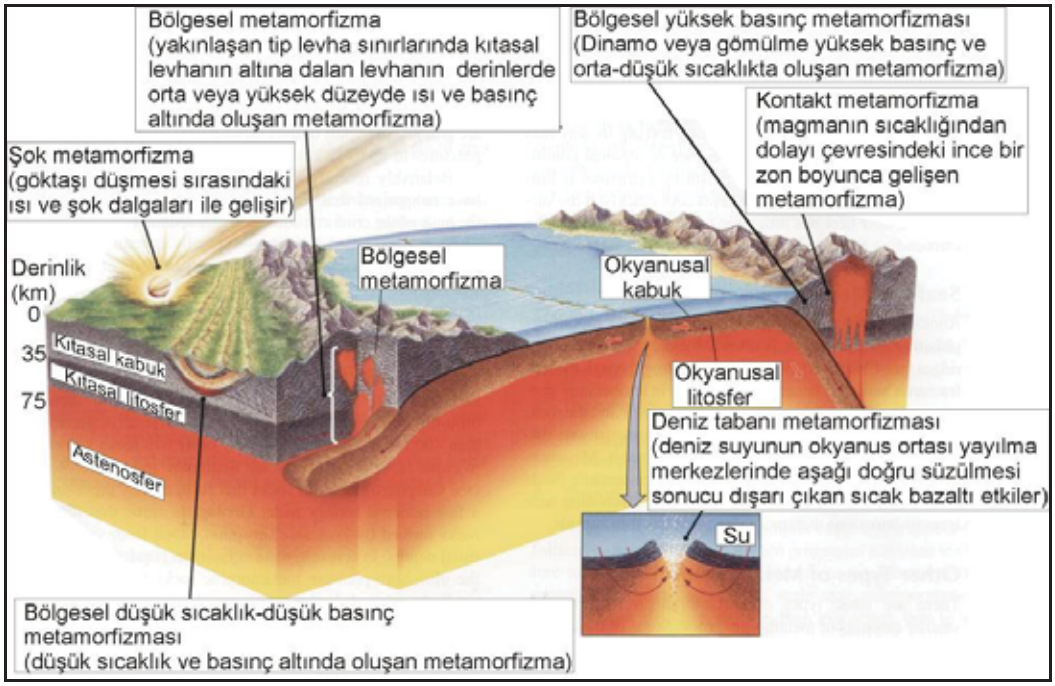
Metamorfik kayaçlar, yeryüzü derinliklerinde daha önce var olan her tür kayacın sıcaklık, basınç ve kimyasal aktiviteye sahip sıvı ve gazların akışkan etkisi altında zamanla katı hâldeki değişime (başkalaşım) uğramaları sonucu meydana gelen ve kristallerden oluşmuş, genellikle paralel veya som yapılı kayaçlardır. Kayaçların, yer kabuğu derinliklerinde sıcaklık, basınç ve kimyasal aktif akışkanlar etkisi altında uğradıkları katı hâldeki mineralojik ve yapısal değişikliğe **metamorfizma**, metamorfizmaya uğrayan kayaçlara da **metamorfik kayaçlar** denir.

Metamorfik değişimlerin çoğu yeryüzünün birkaç kilometre derinliğinde başlar, yükselen sıcaklık ve basınç ile üst manto derinliklerine kadar devam eder. Önem sırasına göre; sıcaklık, basınç ve kimyasal akışkanlar (öncelikle su ve karbondioksit bileşimli akışkanlar) metamorfizmayı kontrol eden başlıca fiziksel faktörlerdir. Metamorfizma genellikle düzenli bir artışla hafif şiddetli değişimlerden (düşük derece metamorfizması) önemli değişimlere (yüksek derece metamorfizması) doğru yol alır. Meselâ, kil taşı, düşük derecede metamorfizmaya uğradığında **sleyt (arduvaz, kayrak taşı)** adı verilen metamorfik kayaya dönüşür. Bu tür kayaçlar dünyada ve ülkemizde oldukça yaygındır.

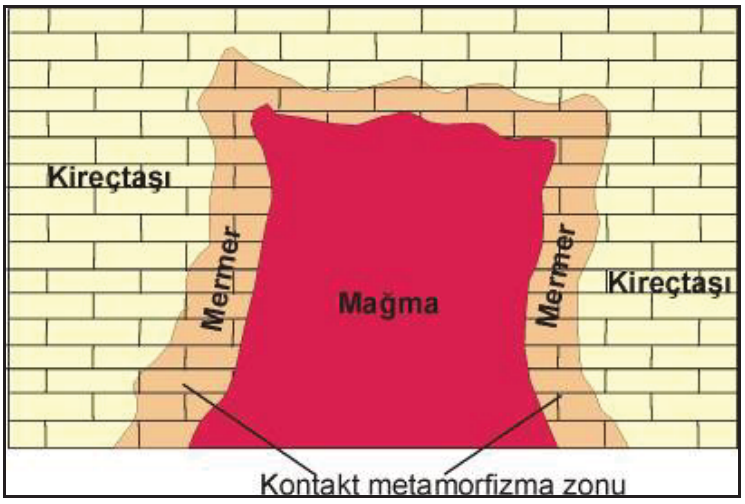
Şist, gnays, mermer ve **kuvarsit**, sık rastlanılan metamorfik kayaç türleri arasında yer alır. Bu başkalaşım sırasında genellikle minerallerin kayaç

içerisinde paralel dizilimiyle (yönlü doku) oluşan **paralel yapılı kayaçlar** gelişir. Ancak tüm metamorfik kayaçlarda yönlenme görülmez. **Yönsüz** (masif) **metamorfik dokular**, öncelikle deformasyon etkisinin en alt düzeyde olduğu koşullarda ve kaya mineral bileşiminde eş boyutlu tanelerin (kuvars, kalsit gibi) egemen olduğu durumlarda ortaya çıkar. Örnek olarak ufak taneli kalsit kristallerinden oluşan çökelik kayaçlardan kireçtaşı sıcak mağmanın sokulumu ile metamorfizmaya uğradığında ufak kalsit kristalleri, iri kalsit kristalleri şeklinde büyür ve kaya **mermere** dönüşür. Mermerde eş boyutlu kalsit kristalleri, iri taneli mağmatik kayaya benzer şekilde yönsüz olarak dağılmıştır. Bu tür yükselen bir mağma kütlesinin, çevresindeki kayaçlarla olan sınırı boyunca, sıcaklıkları etkisiyle komşu kayaçlarda oluşturduğu metamorfizma türüne **kontakt metamorfizma** adı verilir (Şekil 3.11.A ve 11.B). Şeyl, kontakt metamorfizma etkisi ile hornfelse, kuvarslı kumtaşı kuvarsite (yönsüz doku), kireçtaşı ise mermere (yönsüz doku) dönüşür.

Yüksek hızla yeryüzüne çarpan meteoritler ile oluşan metamorfizma türüne **şok** veya **impakt metamorfizma** denir. Meteoritin süratle dünyaya çarpması anında enerji, ısı enerjisine dönüşür ve çarptığı alanda yerel olarak kısmen ergimiş kaya oluşur ve bu kaya volkanik bombaya benzer.



Şekil 3.11.A) Metamorfizma türleri (*Press* vd., 2004).



Şekil 3.11.B) Kontakt metamorfizma oluşumu.

Metamorfik olayların geliştiği başka ortamlar da bulunmaktadır. Örnek olarak büyük fay ve bindirmelerdeki makaslama zonları boyunca oluşan metamorfizma türü **kataklastik metamorfizma** (dislokasyon metamorfizması) olarak adlandırılır ve bu metamorfizmada sıcaklığın etkisi çok az olup etkili faktör kayma gerilmesidir. Bu sırada iki kaya bloğu arasında kayaç dokusunda mekanik olarak ezilme ve parçalanma oluşurak breş (**breş:** köşeli, taneli çakıltaşı-b*reccia*) ve **milonit (unkaya)** gibi kayaç türleri meydana gelir. **Hidrotermal metamorfizma** ise kırık zonlarda çatlak ve yarıklar boyunca dolaşan sıcak gaz-eriyiklerinin dokundukları komşu kayaçlarda oluşturdukları mineralojik değişikliklerdir. Litosferdeki yakınlaşan levha sınırları boyunca okyanusal litosferin, kıtasal litosfer altına dalıp batması sırasında bu alanda yer alan kayaçlar, yüksek basınç ve sıcaklık etkisi altında başkalaşıma uğrarlar ve orojenik sıradağlara bağlı olarak geniş alanları etkileyen bir metamorfizma türü olan **bölgesel (rejyonal) metamorfizma** gelişir. Bölgesel metamorfizma, levha kenarlarında, okyanus litosferinin dalması ile ada yayı volkanizması ve aktif kıta kenarlarında gelişmektedirler.

Kontakt ve hidrotermal metamorfizma türleri belirli zonlar boyunca daha dar alanlarda gerçekleştiğinden **yerel metamorfizma** çeşitleri olarak sınıflandırılır. **Bölgesel metamorfizma** ise onbinlerce km^2 lik daha geniş alanlarda derinlerde termal enerji, yüksek basınç veya gömülme etkisiyle meydana gelen bir metamorfizma türü olduğu için **gömülme metamorfizması**

ve büyük ölçekteki dağ oluşumları **(orojenez)** ile ilgili olarak meydana gelen **dinamo metamorfizma** olmak üzere iki alt tipe ayrılır. Metamorfizma sonucu oluşan kayalara bazı örnekler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Metamorfik kaya türleri.

Sınıflama	Kaya Türü	Özellik	İçindeki Bazı Mineraller
Foliasyonlu (=Yapraklanmış) Metamorfik Kayalar	Sleyt	Çok ince taneli	Kil mineralleri (klorit), muskovit, kuvars, feldspat
	Fillit	İnce taneli	Klorit, muskovit, biyotit, kuvars, feldspat
	Şist	Orta-İri taneli	Mika, hornblend, feldspat, granat, kuvars, feldspat, sillimanit
	Gnays		Biyotit, feldspat, amfibol, kuvars
	Migmatit		
Foliasyonsuz (=Masif veya yönsüz) Metamorfik Kayalar	Mermer	İnce ve iri taneli	Kalsit, dolomit
	Kuvarsit		Kuvars
	Hornfels		Kuvars, andalusit, plajioklas, biyotit
	Amfibolit		Hornblend, plajioklas

3.3.1. Metamorfik kayaçların yapı ve dokuları

Metamorfik kayaçların yapısındaki en belirgin özellik yönlü dokudur. Bu kayaçların çoğunun başlıca özelliği, bunların birbirine paralel düzlemler boyunca ve de kolaylıkla yaprak-yaprak ayrılmaları, bölünmeleridir. Yüksek basınç ve sıcaklık altında, o zamana kadar kayaç içerisinde gelişigüzel dağılmış olan mineraller rotasyona uğrayarak yönlenir ve birbirlerine paralel düzlemler oluşturur.

Metamorfik kayacı oluşturan belirli minerallerin birbirine paralel düzlemler, mercekler veya bantlar teşkil edecek şekilde, toplanmaları, sıralanmaları ile meydana getirdikleri düzlemsel yapılara **foliasyon** *(foliation)* adı verilir. Foliasyonlar, her türlü düzlemsel doku için kullanılan genel bir terimdir. Çökelik kayaçlardaki tabakalanma, laminasyon benzeri çökelmeye bağlı gelişen foliasyon dokuları, metamorfik kayalarda; tektonik olaylar sonucu yüksek basınç ve ısı altında gelişmektedir ve hem levhamsı hem de uzamış yassılaşmış mineral taneleri ile ortaya çıkan ve de bir kayayı boydan boya katedip tekrarlanan düzlemsel yapılardır.

Şistozite (yapraklanma, *schistosity*), yüksek sıcaklık-basınç koşullarında değişik boyutta gelişen levhamsı minerallerin tam paralel veya yarı paralel biçimde dizilmeleri, sıralanmaları sonucu meydana gelen foliasyondur. Bu dokuda, yassı mika kristallerinin paralel dizilişleri ile "düzlemsel şistozite" amfibol gibi ince-uzun kristallerin paralel sıralanışları ile de "çizgisel şistozite" oluşur.

Lineasyon *(lineation),* kökenine bakılmaksızın, kayayı boydan boya geçen, tekrarlanan, gözle görülebilen her türlü çizgisel yapılardır.

***İyi gelişmiş foliasyon içeren kayaç dokuları*:** Sedimenter kökenli '**şeyl**'ler (şeyl; laminalı siltli kiltaşı), metamorfizmanın derecesinin artışına bağlı olarak önce metamorfik kayaçlardan sleyte sonra fillite, fillit→şiste ve şistler de →gnaysa dönüşürler. Kil minerallerince zengin şeyller ile ince taneli volkanik tüfler de çok hafif metamorfizma geçirerek ince yapraklar hâlinde belirgin foliasyonu olan (sleyt klivajı), mika ve kuvarstan oluşan mükemmel yapraklanmalı bir '**sleyt**'e (=**kayrak, arduvaz**) dönüşür. Diğer bir ifâdeyle **sleyt** *(slate)*; çökel kökenli şeyl veya mağmatik kökenli tüf gibi kayaçların hafif metamorfizma geçirerek, gelişen mika minerallerinin gözle görülemeyecek kadar ufak boyutta (kil boyutu) ve çok iyi gelişmiş düzlemsel yüzeyler boyunca foliasyon yani dilimlenme göstermesidir.

Fillit *(phylitte)*, sleyte benzeyen, fakat metamorfizmanın artmasıyla ondan biraz daha fazla değişikliğe uğramış ince taneli (silt boyutu), kolaylıkla şistozite düzlemlerine ayrıldığı görülebilen metamorfik bir kayaçtır. Bileşiminde en çok parlak serizit pulları (**serizit**; tane büyüklüğü 0,1 mm altında olan küçük taneli muskovit) ve biraz klorit ve kuvars bulunur. Normal olarak serizit+klorit toplamı % 50'nin üzerindedir (Ketin, 1977).

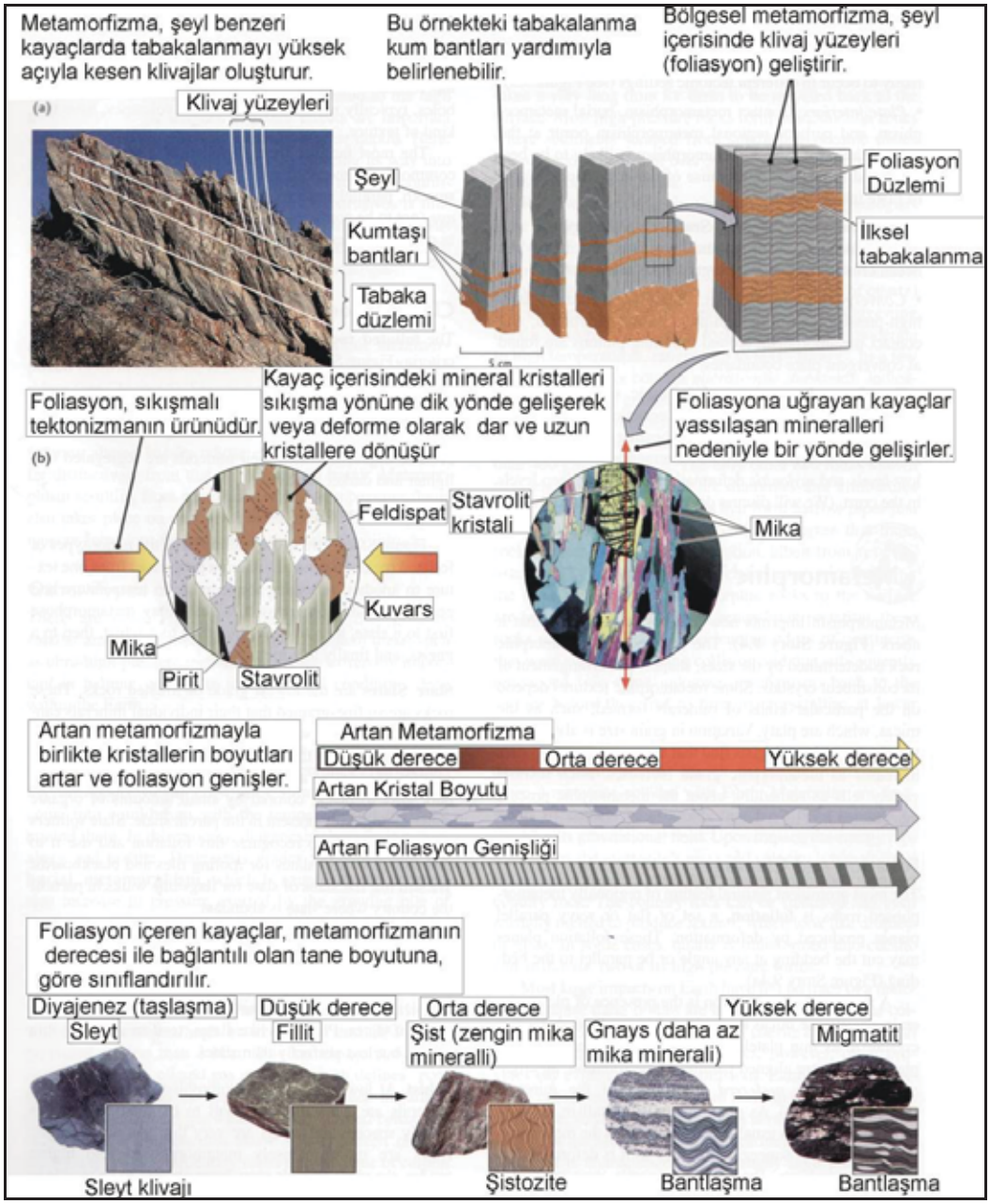
Killi kayaçların, metamorfizması sırasında büyüyen ve kayaç içerisinde paralel düzlemler oluşturan mika mineralleri de, söz konusu düzlemler boyunca da kolayca kırılır ve kopar. Yönlü basınca bağlı, katmanlanma düzlemleriyle belirli bir açı ile kesişerek gelişen birbirlerine çok yakın, paralel ve birden fazla yönde de gelişebilen bu tür deformasyona uğramış kırışmış

düzlemlere **klivaj** *(cleavage)* adı verilir. Klivaj, bir kayacın düzlem boyunca ayrılmasını sağlayan ikincil bir dokudur.

Eğer klivaj düzlemlerindeki mika mineralleri veya diğer metamorfik mineraller gözle görülebilecek kadar iri iseler o durumda belirgin iyi yapraklanmalı bu tür metamorfik kayaca **şist** adı verilir. Şistler (mikaşist, amfibolşist) düzlemsel ve çizgisel paralelliği çok iyi gelişmiş (foliasyonu belirgin) oldukça ileri derecede değişikliğe uğramış orta taneli (kum boyutu) bir kayaçtır. Bileşimlerinde % 50'den fazla mika (biyotit, muskovit), klorit ve talk (tremolit) yer alır ayrıca gözle görülebilecek boyutta kristaller hâlinde bulunurlar [örn. mikaşistler, kloritşist, talkşist, yeşilşist (serizit + epidot + klorit + albit)]. Eğer kayaçta % 50'den az mika varsa ve kuvars ikinci esas mineral ise o zaman kayaç, kuvars mika şist adını alır. Mikaşistlerin başlangıç kayaçları; şeyl, tüf, riyolit; Amfibolşistlerin ise bazalt, andezit ve gabrolardır.

Gnays *(gneiss)*, belirgin bir mineralojik bantlaşma gösteren orta ve daha iri taneli, iri kristalli, çoğunlukla açık renkli kuvars ve feldspatlar ile koyu renkli (biyotit ve amfibol vb.) minerallerin farklı seviyelerde yoğunlaşmasıyla bantlı yapılar oluşturan, ileri derecede metamorfizmaya uğramış metamorfik kayaçlardır. Gnays'lar birkaç mm veya birkaç cm kalınlıkta levhalara veya prizmalara bölünürler. Bölünme, mika yüzeyleri boyunca meydana gelir. Şistler ile gnayslar arasındaki en belirgin farklılığı doku oluşturur ve şistler, gnayslara nazaran daha ince taneli ve ince dilimler halindedirler. Gnayslarda ise koyu renkli biyotit kristalleri ile açık renkli silikat mineralleri (kuvars, feldspat) ayrı ayrı yerleşerek kayaya bantlı bir görünüm (**gnays dokusu**) kazandırır (Şekil 3.12). Bazı kayaçlarda, kayaç içerisinde daha önceden var olan ilk klivaj düzlemleri, zamanla ve deformasyon şiddetinin artmasıyla meydana gelen ikinci klivaj düzlemleri tarafından kesilerek kaya üzerinde birden fazla yönde klivaj gelişebilir.

Mağmatik kayaçlardan (örn. granit, diyorit, siyenit) türeyen gnayslara **ortognays**, sediment kökenli kayaçlardan (örn. grovak/*greywacke*, şeyl/*shale*, kiltaşı/*claystone*) meydana gelen ve kuvars-biyotit mineralleri bakımından daha zengin olan türüne ise **paragnays** adı verilir.



Şekil 3.12. Metamorfik kayaçlarda yapı ve doku (*Press* vd., 2004).

Büyük fay ve bindirme zonlarında, şiddetli deformasyon sonucu sadece mekanik etkiler ile gelişmiş makaslama zonları boyunca ince taneli, ezik *(crushed*) ve çizgili görünümlü **milonit** kayacı oluşur (kataklastik metamorfizma). Kırılmalar ve mekanik ezilmeler nedeniyle milonitik kayaçların yapıları değişmiştir. Bu metamorfizmada sıcaklığın etkisi çok az olup etkili faktör kayma gerilmesidir. Fay zonunda oluşan deformasyon sırasında kayanın ilksel taneleri kırılıp, ezilerek milonitik zon oluşur ve bu zon, çapı 0,5 mm'den daha küçük, daha ince taneler hâlinde tekrar taşlaşarak miloniti oluşturur.

Hornfels, kuvarsit, mermer, amfibolit, granülit ve eklojit gibi metamorfik kayaçlar **taneli** (yönlenmesiz) **kayaçları** oluştururlar. Mermer, kuvarsit, eş boylu taneli felsler ile kontakt metamorfizma ile gelişen hornfelsler; yapraksal yapıya sahip olmayan, masif yapıda taneli ve yönlenmesiz metamorfik kayaçlardır. Metamorfizma ile kuvarslı kumtaşları→ 'Kuvarsit'e (minerali: >% 80 kuvars); kalker ve dolomit(it) → 'Mermer'e (minerali: Kalsit); bazalt, gabro ve tüf→'Amfibolit'e (mineralleri: hornblend, plajioklas, granat); şeyl, grovak veya mağmatik kayaçlar→tipik minerali ortopiroksen olan 'Granülit'e; bazalt, gabro+olivin (çok yüksek basınçlarda)→bazik mağma kökenli 'Eklojit'e [mineralleri: omfasit (klinopiroksen) + granat ± disten] dönüşürler. Bunlardan; % 80'den fazla kuvars tanelerinden oluşan kuvarsit'te; kuvars taneleri birbiri içine girmiş durumda yani kenetlenmiş olup kayaca yüksek bir dayanıklılık verirler. Metamorfik olan bu tür kuvarsitleri metamorfik olmayan, diyajenez sonucu meydana gelen sedimenter kökenli kuvarsitten (=kuvarslı kumtaşı) ayırmak gerekir. Metamorfizmaya uğramamış kuvarsitlerde; çimento maddesi genellikle kristalin değildir ve taneler birbirleriyle kenetlenmiş bir durum göstermezler.

"Metamorfik Kayaçların Mühendislikte Kullanım Alanları"na bakıldığında; öncelikle yapraklanma gösteren kayaçlar, dayanım açısından inşaat işlerinde malzeme olarak tercih edilmemektedirler. Zira yapraklanmalı metamorfik kayaçların, dokuları ve metamorfizma sonucu gelişen yapraklanma ve yapraklanmalar arasında da ilâve gelişen klorit, epidot gibi su ile temasında şişebilen kil mineralleri nedeniyle dayanımları, yapraklanma düzlemleri boyunca azalmaktadır. Metamorfik kayaçların yapraklanma göstermeyen, som yapılı türleri hariç; gnays, fillat gibi yapraklanması belirgin kayalar ne granüler (ayrık dâneli, *granular*) malzeme, ne yapı veya beton malzemesi, ne demiryollarında traverslerin altına **balast** [balast, (*balast)* **:** 40 mm - 110 mm çapında kırmataş, taş kırığı] malzemesi, ne de rıhtımlarda dalga kıran olarak kullanılabilirler. Ancak bir kayacın düzlem boyunca ayrılmasını sağlayan tektonik etkenlerle ikincil gelişen bir doku olan klivaj, sleytte mükemmel gelişmiştir. Bu yüzden; sleyt-killişist-fillit gibi kil minerallerinin az metamorfizma geçirmesiyle oluşmuş düzgün yapraklanma gösteren kayalar, yüzeylerde veya çatılarda kaplama taşı olarak kullanılabilirler. Yeşilimsi, mavimsi, daha çok siyah renkleri içeren çok ince taneli, az miktarda mika, klorit ve kuvars içeren **sleyt'**ler (=**arduvaz**, *slate,* tonschifer); ince paralel levhalara ayrılabildikleri için

kullanım sahaları geniştir. Avusturya Alpleri'nde eski evlerde; Norveç'te de *Alta* yöresinde taş ocağından *(quarry)* alınan sleyt levhaları, ev damlarında kiremit yerine kullanılmaktadır. Çatı kaplama malzemesi olarak kullanılan sleytler geçirimsiz ve bilhassa siyah renkli oldukları için güneş enerjisini topladıklarından ısınmada soğuk yerleşim bölgeleri için fayda sağlamaktadır.

Metamorfik kayaçlar cevher mineralleri içerebilmeleri açısından madencilik sektöründe büyük önem taşırlar. Ege bölgesinde, Büyük Menderes grabeni güney yükseltilerini oluşturan horstlarda Bafa Gölü'nün yaklaşık 20 km doğusunda Karpuzlu, Çine (Aydın) civarında yer alan açık işletmeler örnek olarak verilebilir. Bu işletmelerde; Menderes Masifi (güney alt masif) olarak adlandırılan metamorfik Prekambriyen-Kambriyen yaşlı ortognayslar (gözlü gnays/çekirdek serisi) içinde düşük basınç ortamında tektonik zonlar içinde ve bu zonlar boyunca ergiyerek metasomatizmaya uğrayıp sodyumca zenginleşerek oluşmuş feldspat yataklarından üretim yapılmaktadır. Metamorfik kayaçlardan **mermerler**; kalkerlerin metamorfizmasıyla, som yapıda ve çoğunluğu kalsit kristalinden oluşmuş, boşluksuz, iyi kenetlenmiş, sık dokulu, aşınmaya karşı dayanıklı bir karbonat kayasıdır. Mermerin başlıca kullanım alanları; inşaat sektörü, güzel sanatlar alanı ve dekorasyondur. En geniş kullanım alanını inşaat sektörü teşkil etmektedir. Mermerler; bilhassa bina içlerinde yer döşemesi, duvar kaplamaları, merdiven basamakları, şömine, mutfak ve banyolarda, bina dışlarında kaplama taşı olarak ve taşıyıcı kolon, granüler malzeme, dekorasyon işleri, anıtlar, heykeller, süs ve hediyelik eşya imalâtında yaygınca kullanılmaktadır. Ancak mermerler rekristalize olduklarından dolayı çökelik kayaçlardan olan kalkerlere göre, sönmemiş kireç hâline gelmeleri daha zor olduğu için kireç üretiminde kullanıma elverişli değildirler.

3.4. Sedimenter Kayaçlar *(Sedimentary Rocks)*

Tortul veya çökelik kayaçlar olarak da adlandırılan **sedimenter kayaçlar**, daha evvel var olan değişik türde kayaçların ayrışma olayı sonucunda ufak parçacıklara bölünerek, su, rüzgâr, dalga, buzul gibi taşıyıcı unsurlar tarafından aşındırılıp taşınarak, karada ya da suda (göl, deniz, okyanus) istiflenmesi veya suya doygun eriyiklerin kimyasal ve biyolojik işlemlerle çökelmesi sonucu oluşan, doğal bir hamurla tutturulmuş (taşlaşmış) veya tutturulmamış kayaçlardır. Taşınan her türlü iri ve ince taneli malzemeye

sediment (çökel, tortu), taşınan malzemenin çökelme işlemine **sedimentasyon** (çökelme, *sedimentation*), farklı sedimenter kayaçların kökeninin tanımlanması, sınıflandırılması, depolanma ortamlarının belirlenmesi; diğer bir ifâde ile tortular ve tortul kayaçların nasıl oluştuğunu ve ayrışma, parçalanma, taşınma, çökelme ve yeniden taşlaşma süreçlerini ve ürünlerini inceleyen bilim dalına **Sedimentoloji** *(sedimentology)* denir. Çökelme sonucu meydana gelen sedimenter kayaçlar genellikle tabakalı ve çoğu kez fosil içerirler. Oluşum biçimlerine göre **kırıntılı** (=taneli=detritik=klastik), **organik** ve **kimyasal** sedimenter kayaçlar olmak üzere üçe ayrılırlar.

3.4.1. Kırıntılı sedimenter kayaçlar

Kırıntılı sedimenter kayaçlar; kara ve denizlerdeki çökelme ortamlarında, çeşitli büyüklükteki kayaç ve mineral parçalarının birikmesi sonucu oluşan taneli-parçacıklı kayaçlardır. Tabiî çimento ile tutturulduklarında çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı gibi kayaları, tutturulmadıklarında veya sonradan ayrıştıklarında ise çakıl, kum, silt, kil gibi zemin olarak adlandırılan kayaçları oluştururlar. Kırıntılı sedimenter kayaçların oluşumları başlangıçta; kayaçlardan kopan parçaların, akarsu, buzul, rüzgâr, kıyı ve deniz akıntıları gibi taşıyıcı unsurlar tarafından erozyona uğratılıp sürüklenerek, vâdi, ova, göl, plâj, kıyı, şelf düzlüğü ve açık deniz düzlükleri gibi değişik ortamlarda çökeltilmesi işleminin sonucunda gerçekleşir. Çökelme havzasında birikmiş olan bu yumuşak ve gevşek tortular depolanmalarından itibaren suyun etken olduğu fiziksel ve kimyasal süreçler sonucu 150°C'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda (metamorfizma olmaksızın) normal hidrostatik basınç, sıkışma ve organizmalarla eriyiklerin de etkisiyle çimentolanıp taşlaşma olayı (**diyajenez,** *diagenesis*) gelişir. Bu oluşumda, değişik boyuttaki tanelerin kalker, kil, silis veya hematit, limonit gibi demirli bir çimento maddesi ile birleşmeleri, birbirlerine kenetlenmeleri sonucu kaya olarak adlandırılan ***çimentolu (tutturulmuş) sedimenter kayaçlar*** oluşur. Çamur gibi ince taneli malzemenin taşlaşması için genellikle sıkışma tek başına yeterli olabilirken, kum ve çakıl gibi sedimentlerin, sedimenter kayaca dönüşebilmesi için çimentolanma *(cementation)* olayı gerekli bir süreçtir. İri taneli sedimentlerin çimentolanmasını sağlayan bağlayıcı malzeme, deniz suyundan etkilenerek çökelme havzası içinde kimyasal yolla oluşan **hamur=çimento** *(cement)* malzemesi ve havzaya taşınmış silt boyutundaki çeşitli kristallerden (**matriks,**

matrix) oluşmaktadır. Çakıltaşı (konglomera-*conglomerate*), kumtaşı *(sandstone)*, silttaşı *(siltstone)*, kiltaşı *(claystone)*, çamurtaşı *(mudstone)* tutturulmuş kırıntılı sedimenter kayaçlardandır. Bunlardan silttaşı, kiltaşı ve çamurtaşları mevcut tüm sedimenter kökenli kayaçların % 65'ini oluştururlar. Kum boyutundaki tanelerin tutturulması ile oluşan kayaca **kumtaşı** denir ve bileşenleri çok değişik türdendir. Kumtaşlarının adlandırılmasında, kayanın içinde bulunan elemanların cinsi ve bağlayıcısı önemlidir. Kumtaşlarının bileşenleri: kuvars + feldspat + kaya kırıntısı + matriks ve çimentodur. Taneleri birbirine bağlayacak, birleştirecek bir madde bulunmadığı hâllerde taneler serbest kalır ve zemin olarak adlandırılan ***çimentosuz*** yani tutturulmamış, kırıntılı ***sedimenter kayaçlar*** oluşur. Bu tür kayaçlara çakıl, kum, silt ve kil örnek olarak verilebilir. Kırıntılı sedimenter kayaçların sınıflandırılması ve adlandırılması, tanelerin cinsi, boyutu, dokusu, biçimi, yuvarlaklık ve boylanma derecesi, homojen ve heterojen oluşu ile taneleri birleştiren çimento malzemesinin bileşimi gibi fiziksel özellikleri dikkate alınarak yapılır (Şekil 3.13, 3.14, 3.15, Tablo 3.3, 3.4).



Şekil 3.13. Kaynaktan kopan malzemenin akarsu tarafından taşınıp, ufalanıp biriktirilme işlemi (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 3.14. Kırıntılı sedimenter kayaçların taşlaşmış olanlarına bazı örnekler.



Şekil 3.15. Küresellik ve yuvarlaklığın taşınma mesafesi ile olan ilişkisi.

Tablo 3.3. Sedimenter kayaç türleri.

	ÖZELLİK Dâne çapı (mm)	ÇİMENTOSUZ (Tutturulmamış)	ÇİMENTOLU (Tutturulmuş)
İri Dâneli	> 2,0	Çakıl	Konglomera ve Breş
	2,0 – 0,075	Kum	Kumtaşı: Grovak (mikalı), Arkoz (>%25 feldspatlı), Kuvarsit (Kuvarslı kumtaşı, %85-90 SiO_2). Çimento: Killi-kalkerli, demirli, silisli
İnce Dâneli	0,075 – 0,002	Silt	Silttaşı
	<0,002	Kil	Kiltaşı
ORGANİK	Kalkerli	Kavkı Mercan Alg Globijerin	Kireçtaşı: Kavkılı Mercanlı Algli Foraminiferli
	Silisli	Radyolarya Diyatome	Radyolarit Diyatomit
	Karbonlu	Bitkiler	Turba, Linyit, Maden Kömürü
	Demirli	Bataklık kili	
	Fosfatlı	Guana,	Fosforit
KİMYASAL	Kalkerli	Eriyikten çökelmiş $CaCO_3$ (Kalker=kireçtaşı). Çökelme veya yerini alma ile oluşan $CaMg(CO_3)_2$ (Dolomit-it)	Kireçtaşları: Oolitik, dolomitik. Tebeşir, traverten. İçeriğe göre sınıflandırma (Folk, 1959): Kireçtaşı: Kalsit oranı % 95'den fazla; dolomit oranı %5'den az. Mağnezyumlu Kireçtaşı: Kalsit oranı %95-90; dolomit oranı % 5-10. Dolomitik Kireçtaşı: Kalsit oranı % 90-50 kalsit; dolomit oranı % 10-50. Kalkerli Dolomit: Kalsit oranı % 50-10 kalsit; dolomit oranı % 50-90. Dolomit(it): Kalsit oranı % 10'dan az; dolomit oranı % 90'dan fazla.
	Silisli	Silis Jeli	Çakmaktaşı, Jasp, Çört
	Demirli	Fe_2O_3 Hidrozol	Demirli Killer
	Tuzlu	Tuz Gölü birikintileri	Alçıtaşı, Anhidrit, Na ve Ka'lı tuzlar, Nitratlar

Tablo 3.4. Çimentosuz kırıntılı sedimentlerde (birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi-USC) zeminlerin dane boyutlarına göre zemin grupları ve bunlar için kullanılan semboller.

Esas Zemin türü	Harf
İri Taneli Zeminler:	
Çakıl	G
Kum	S
İnce Taneli Zeminler:	
Silt	M
Kil	C
Organik zeminler	O
Turba, Humus, (fazla organik)	Pt

3.4.1.1. Kırıntılı (çimentosuz-tutturulmamış) sedimenter kayaçların fiziksel özellikleri

Tane boyu (*grain size*), kırıntılı sedimenter kayaçlardaki en belirgin ayırtman özelliği oluşturur. Tablo 3.3'de de görüldüğü üzere, kırıntılıların tane boyuna göre sınıflandırılmasında, tane boyu 2,0 mm'den büyük olan kırıntılara **çakıl** *(gravel)* adı verilir. Çakıl tanelerinden oluşan tutturulmuş kayacın genel adı çakıltaşı veya konglomeradır (*conglomerate*).

Tane=dâne *(grain, particle)* boyu 2,0 mm – 0,075 mm arasında olan tutturulmamış kırıntılar **kum** *(sand)* olarak adlandırılır. Kum boyutlu malzemeden oluşan tutturulmuş kayaçlara da **kumtaşı** *(sandstone)* adı verilir.

Tane boyu 0,075 mm – 0,002 mm arasında olan tutturulmamış kırıntılara **silt** *(silt)*, silt boyutlu malzemeden oluşan tutturulmuş kayaçlara ise **silttaşı** *(siltstone)* denir.

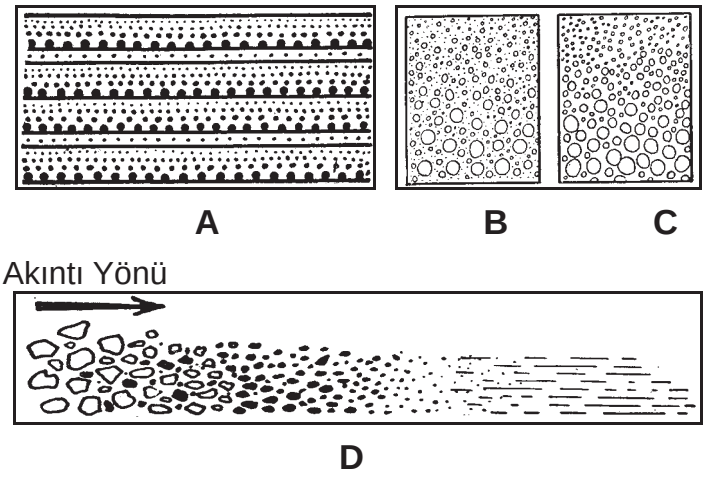
Kil boyutlu malzeme dışında kalan ve yukarıda kısaca tanıtılan Tablo 3.3 ve 3.4'teki tutturulmamış kırıntılı sedimentlerin tamamı ağırlıklı olarak fiziksel ayrışım sonucu Şekil 3.13'deki işleme benzer şekilde ufalanırlar. Yine bu grupta yer alan **kil** *(clay)* ise tane boyu açısından 0,002 mm'den daha küçük tanelerin oluşturduğu gruba verilen addır. Kil boyutlu malzemeden oluşan tutturulmuş kayaçlara **kiltaşı** *(claystone)* adı verilir. Kimyasal bileşim yerine, sadece tane boyu esas alındığında; sekonder gelişen esas kil mineralleri yanında kil boyutuna kadar ufalanmış kuvars, kalsit, pirit ve diğer maddeler de

“**kil**” kavramı içerisine girer. Kimyasal bileşim esasına göre oluşan ve mühendislik açısından önem taşıyan killer ise kimyasal ayrışmaya uğramış gerçek kil mineralleri olup genelde sulu alüminyum silikatlardır. Bunlar; a) İçerisinde feldspat minerali bulunan kayaçların kimyasal olarak ayrışmaları sonucu, b) Volkan tüflerinin su altında ayrışmaları sonucu c) Metamorfizma veya diyajenez sonrası ayrışma sırasında değişimler sonucu vb. gelişen bir oluşum mekanizmasına sahiptirler. Bu tür killere **illit, pennin, vermikülit, kaolinit, epidot, klorit, serizit, boksit** ve aşırı şişme özelliği gösteren **montmorillonit** örnek olarak verilebilir.

Kum ve daha iri boyutlu tanelerden oluşan kırıntılılar için yapılan tanımlamalardaki önemli bir parametreyi de, tanelerin yuvarlaklık ve küresellik gibi fiziksel özellikleri oluşturur. **Yuvarlaklık**, tanelerin köşelerinin ve keskinlik derecesinin azalması olarak tanımlanır. **Küresellik** ise tane şeklinin küreye olan benzerlik miktarıdır. Küreselliğin belirlenmesinde tanenin uzun ve kısa eksenlerinin oranı dikkate alınır. Buna göre köşeleri yuvarlaklaştırılmış eliptik bir çakıl tanesi yuvarlak, ancak küresel olmayan bir biçim arz eder. Bu tanımın tersi olarak köşeli, ancak uzun ve kısa eksenlerinin oranı 1’e yakın olan bir tane köşeli, ancak aynı zamanda küreseldir.

Kırıntılı kayaçlarda taneler, kayadan ilk koptukları sırada köşelidir. Ancak taşıyıcı unsurlardan, özellikle akarsular bu malzemenin taşınması sırasında keskin köşelerinden arınıp, yuvarlak bir yapıya kavuşmasını sağlar. Bu taşıma işlemi sırasında akarsular, taşıyabilme güçlerine göre blok *(boulder)* ve çakıl gibi iri parçaları, oluştukları yerlere yakın bölgelerde, ince çakıl, ve kum gibi daha ufak parçaları ise daha uzak alanlarda biriktirirken, ince kum, silt gibi çok ufalanmış parçaları deniz-göl kıyılarına kadar sürükleyebilir. Taşıyıcı unsuru akarsu olan kırıntılıların çökelmesinde iri taneli parçalar kayadan koptukları yere yakın bölgelerde çökelirken, daha ince taneli parçalar ise akarsu tarafından ayıklanarak daha uzaklara götürülür. Bu durumda eş boyutta (uniform, tekbiçim, homojen, eş dağılmış) olan taneler bir arada çökelirler. Bu işlem rüzgâr tarafından taşınan çökellerde de, tane boyu daha küçük malzeme için geçerli olmak kaydıyla benzerdir. Bununla birlikte buzul tarafından taşınan kırıntılı çökellerde, buzullar her boyutta malzemeyi bünyesinde beraberce taşıyabildiklerinden dolayı bu malzeme, tane boyunda herhangi bir eleme olmaksızın yan yana bulunabilir.

Bir sedimentasyon havzasında tanelerin hacim ve ağırlıklarına göre ve bir düzen içinde aşağıdan yukarıya doğru sıralanmalarına jeolojik anlamda **boylanma** *(graded-bedding)* denir (Şekil 3.16.A, B ve C). Bu şekilde istiflenmiş olan ve tekrarlanabilen tabakalara da **boylanmış tabakalar** denir. Bir sedimentasyon (çökelme) havzasında sular vasıtası ile akıntılarla gelen tanelerin ağırlıklarına göre ve akıntı yönünde olmak üzere sıralanışlarına jeolojik anlamda; **"derecelenme"** ismi verilir (Şekil 3.16.D). Bu derecelenme ile iri taneli kırıntılar akıntı kaynağına yakın, ince taneli kırıntılar ise daha uzak yerlere taşınarak çökelirler. Derecelenmeyi en iyi şekilde rüzgârlar meydana getirirler. Sulu ortamlar bu konuda ikinci gelirler. Buzlar ise hiçbir derecelenme yapamazlar. Boylanma elenmenin, derecelenme ise sürüklenmenin birer neticesi sayılırlar.



Şekil 3.16. Sedimentlerde boylanma ve derecelenme.
A) Boylanmış tabakalar, B) Çalkantılı ortamlarda boylanma C) Sâkin ortamlarda boylanma (iyi boylanma, *well sorted*), D) Derecelenme (Ok, akıntı yönünü göstermektedir).

Jeolojik anlamda çökelme havzasına göre tanımlanan ve tanelerin boyutları ve dağılımları dikkate alınarak yapılan sınıflamaların dışında, inşaat mühendisliğinin zemin ile ilgilenen bilim dalı olan geoteknik mühendisliği açısından, yukarıdaki sınıflamalar farklı şekillerde algılanabilmektedir. Geoteknik mühendisliğindeki terminolojiye göre; hemen hemen her çap aralığındaki tanelerin bir arada yer alması ile oluşan zeminler **"iyi derecelenmiş,** *well graded***",** aynı çap aralığındaki tanelerin (=dânelerin) bir arada yer alması ile oluşan (boşluklu) zeminler **"uniform,** *uniform***"**, ağırlıklı olarak belirli çap aralıklarındaki tanelerden oluşan ve bazı çap aralıklarındaki tanelerin hiç bulunmadığı veya çok az bulunduğu zeminler **"kötü derecelenmiş,** *uniformly-graded***"** zeminler olarak adlandırılır.

3.4.2. Organik sedimenter kayaçlar

Organik sedimenter (tortul) kayaçlar, taş yapan organizmalardan veya bunların irili ufaklı parçalarından oluşan kayaçlardır. Kayaçlar da, bütünüyle (Şekil 3.17) veya ağırlıklı olarak organizmaların katı kısımları taşlaşarak fosilleşmiştir. Bu tür sedimenter kayaçların en önemli örneğini mercanlar *(corals)* oluşturur. Mercanlar, uygun çevre koşullarında (sıcak ve sığ denizlerde) geniş alanlara yayılan, gün ışığına ihtiyaç duyan ve üst üste birikerek her sene, ancak 1 cm kalınlıkta $CaCO_3$'dan taşlaşmış iskelet oluşturabilen sığ denizel canlılardır. Mercan adalarının her bir metre kalınlığı yüzyıllık bir zaman aralığında oluşmaktadır. Mercanlar, deniz düzeyindeki değişimlere bağlı olarak yaşadıkları ortamların şartları değiştiğinde, bu alanı terk edemediklerinden dolayı yaşam ortamlarını sağlayan ve yükselen sığ deniz seviyesine doğru gelişimlerini sürdürürler ve geride geniş alanlara yayılmış bir kireçtaşı *(limestone)* oluşuğu bırakırlar. Organizmaların katı kısımları burada taşlaşmış, fosil hâline gelmişlerdir.



Şekil 3.17. Kavkılı Kireçtaşı (Küfeki Taşı): Çoğunlukla fosillerden (istiridye kabukları) oluşmuş kireçtaşı. Resimde görülen bol fosil kavkılı kaya, Bakırköy Formasyonu olarak adlandırılan kayadan alınmıştır. Bakırköy Formasyonu kireçtaşı *sığ denizel ortam yanında, burada hemen hemen tamamen resifte fosil kavkılarından oluştuğu için resifal kireçtaşı olarak adlandırılmaktadır. Kireçtaşı numunesinin alındığı yer: YTÜ Davutpaşa Kampüsü, Kongre Merkezi İnşaat Sahası kazısı, B Blok temel kayası (15.04.2011).

***[**Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü ve çevresini oluşturan günümüzdeki arazi yüzeyi, fosil kavkılarından da anlaşıldığı üzere, Üst Miyosen (Sarmasiyen) döneminde, yani günümüzden 10,5 milyon ile 8,2 milyon sene öncesi zaman aralıklarında sığ bir denizin içinde deniz tabanını oluşturmakta idi. Günümüze kadar geçen süre içinde ortalama 100 m yükselerek kara hâline gelen ve günümüzde YTÜ Davutpaşa Kampüsü olarak kullanılan bölgede, ilk inşaası 1483 yılında Davud Paşa tarafından yaptırılan ve Kânunî Sultan Süleyman tarafından yenilenen, günümüze kadar yaklaşık 530 yıldır mevcudiyetini korumuş Osmanlı eseri Hünkâr Kasrı'nın (**Otağ-ı Hümayun** = Padişahlara ait yerleşke/çadır) yapımında duvarlarda kullanılan doğal taşları, resimde görülen Bakırköy formasyonuna ait kavkılı kireçtaşlarından oluşmaktadır (Yıldırım vd. 2010)**]**.

"Kalsiyum karbonat" ($CaCO_3$) sıvı suyun varlığında oluşan bir bileşen olduğundan, mevcudiyeti canlı yaşam ortamının var olduğunu kanıtlar. İster deniz (tuzlu su), ister nehirler (**tatlı su** = çözünmüş tuz oranı % 0,1'den az olan su) olsun, bütün doğal sular daima az veya çok miktarda kalsiyum karbonat içerirler. Nehir suları önemli miktarda Ca ve Mg taşıdıklarından, denize varan bu elementler daha başlangıçta karbonat olarak çökelirler. Deniz suyunun yüzey kısımları, daima kalsiyum karbonat bakımından doymuş hâldedir. Sıcaklığın yükselmesi ve Ca iyonlarının artmasıyla karbonat çökelimi hızlanmakta, denizdeki tuz miktarının artmasıyla ise karbonat kayasında çökelimi azaltıp suda çözünmeyi arttırmaktadır.

Kalker oluşumlarının en önemlileri ve çoğunluğu organik kökenli olup denizel ortamda meydana gelmiş (vuku bulmuş) ve meydana gelmektedir. Ayrıca göllerde de sıcaklık artışı ile CO_2'nin azalarak kaybolması ve bitkilerin karbondioksiti emmesi de kalker çökelimini sağlayan önemli faktörlerinden biridir. Bu sebepten, günümüzde karbonat çökellerinin çoğu, tropik sıcaklıkların hüküm sürdüğü ekvatorun 30° kuzey ve 30° güneyi arasında kalan bir zonda oluştuklarından karbonata dayalı kavkı ve iskelet oluşturan algler ve resif oluşturan birçok mercan türleri bu enlemler (paraleller) arasında yaşarlar. Anorganik karbonat çökelimi yanında, biyolojik süreçler (prosesler) sonucu göl ve sığ denizlerde yaşayan kabuklu canlıların kavkılarının birikimiyle de karbonat çökelimi oluşmaktadır.

İstanbul çevresinde geçmiş jeolojik dönemlerde yer yer görülen Orta Eosen yaşlı (Kırklareli formasyonu) resifal kireçtaşı mercekleri ya da şekil 3.17'de görüldüğü gibi Üst Miyosen döneminde yaşamış istridye kabuklarının üst üste yığılarak (Bakırköy formasyonu, *Maktra*'lı kireçtaşı) sığ deniz ortamında deniz suyu

ile reaksiyona girerek kaynaşıp taşlaşmasından oluşan kireçtaşları bu tür oluşuklardandır.

Derin denizlerde, yüzer hâlde (pelajik-*pelagic*) veya deniz tabanına bağlı olarak (bentik) yaşayan kabuklu organizmaların sert kabukları, ölümlerinin ardından deniz tabanına çökerek, bu alanda istiflenip fosilli sedimenter kayaçları oluştururlar. Jeolojik dönemler içerisinde uygun ortamlarda yaşamsal çoğalmalar gerçekleştiren bu tür organizmaların toplu ölümleri sonrasında da oluşabilen sedimentlerin tamamı söz konusu organizmaların kabuklarından oluşabilir. Bu tür durumlarda sedimenter kayaç özel bir durumu ifâde etmek için söz konusu canlının adı ile anılır. ***Radyolarya*** veya ***Diatome*** gibi tek hücreli, derin denizlerde yaşayan canlılar, genel olarak ortalama 3.500 m'yi aşan derinliklerde düşük ısıda, CO_2 konsantrasyonunun (**karbonat dengeleme/kompenzasyon derinliği**, *carbonate compensation depth-CCD*), hidrostatik basıncın, ve genel tuz miktarının artması gibi nedenlerle karbonatların kolayca çökelemeyip erimeleri sebebiyle sadece silisli kavkı oluşturabildiklerinden, öldüklerinde bu silis kavkılarının derin deniz dibinde birikmesi ile silis kökenli **radyolarit** ve **diyatomit** olarak adlandırılan organik kayaçları meydana getirirler. Sığ denizel ortamlarına; Şile civarında görülen ve bugün karasal ortamda yer alan, taneleri çoğunlukla *Nummulit* adı verilen sığ denizlerde yaşayan organizmaların, öldüklerinde kabuklarının yığışmasıyla çökelmiş fosilli kireçtaşları (*Nummulitik* kireçtaşı) örnek olarak gösterilebilir. Organizmalar; kabuklarını ister karbonat, isterse silikat bileşeninden oluştursunlar, kavkıları sonuçta organiktir ve oluşturdukları kayaç türü de kimyasal açıdan ya karbonatlı (sığ denizde) ya da silis (derin denizde) bileşenlidir. Bu kayaçlar, organik işlem sonucu oluştuklarından, **organik sedimenter kayaçlar** olarak adlandırılırlar (örn. fosilli kireçtaşı, radyolarit, turba, linyit, taş kömürü).

Anadolu'da; Erzurum'un Oltu ilçesi civarında çıkarılan değerli bir süs taşı olan, **Oltu Taşı** (Kara Kehribar-Erzurum Kehribarı, Oltu *stone*) siyah, koyu kahve, sarımsı, nadiren grimsi-yeşil renkli, organik, güzel cilâlanan, takı, tespih ve mücevher yapımında kullanılan ve sadece Erzurum'a has, karbon içeriği yüksek, bitümce zengin özel bir **linyit** çeşididir ve *Mohs* Sertliği 3'tür (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Erzurum Oltu Taşından yapılmış bir tespih (06.06.2011).

Süs eşyası, takı yapımında, güzel koku üretiminde kullanılan **kehribar** *(amber,* Alm.: Bernstein) ise açık sarıdan kızıla kadar değişen, ancak genellikle sarı renklerde, saydam-yarı saydam, amorf, 2-2,5 sertliğinde, organik, Ön-tarihsel çam ağaçlarının oluşturduğu fosil reçinedir. Fosiller ise genellikle, kehribara yapışıp içinde kalmış fosilleşmiş böcek, yaprak ve çiçek kalıntılarıdır.

3.4.3. Kimyasal sedimenter kayaçlar

Kimyasal sedimenter kayaçlar, doygun eriyiklerin çökelmesi ve tuzlu suların buharlaşması *(evaporation)* sonucunda meydana gelen kayaçlardır. Eriyiklerden çökelme sırası; CO_3, SO_4, Cl şeklindedir. Suda eriyik hâlde bulunan ve bileşimlerinde esas maddesi $CaCO_3$ olan; yoğun **anorganik kalker** (masif kalker) inorganik olarak sudan direkt çökelebilir. Karbonat kayalarının en önemli ve en yaygın olanı kalkerlerdir. Kalkerler (kireçtaşı) bileşimlerinde kütlece en az % 80 oranında kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) bulunduran sedimenter (tortul) kayaçlardır. Ayrıca karasal ortamda oluşmuş mağaralardaki sarkıt ve dikitler ile sıcak su kaynakları etrafında oluşan **travertenler** (Pamukkale travertenleri) ve soğuk su kaynakları etrafında oluşan ve bol bitki kırıntıları içeren **tufa** ya da **kalker tufası** olarak adlandırılan travertenler (örn. Antalya Travertenleri); esas maddesi $CaMg(CO_3)_2$ ve kullanım alanı çok yaygın olan dolomit (=bileşiminde % 35'den fazla $MgCO_3$ bulunduran sedimenter kayaç) ve dolomitik kalkerler (=bileşiminde $CaCO_3$ yanında kütlece % 10-%35 oranında $MgCO_3$ bulunduran sedimenter kayaç); esas maddesi demirli bileşimleri içeren limonitli, hematitli ***oolit** gibi karbonatlı, demirli tortular; esas maddesi silisyum kolloidlerinden oluşan **çakmaktaşı**, **sileksit**, **çört** *(chert)* veya sıcak su kaynaklarından oluşan **gayzerit** gibi silisli tortular; göl kenarlarında buharlaşma ile arta kalan **kaya tuzu**, **jips** ve **anhidrit** gibi tuzlar; ayrışma ve çürüme sonucu meydana gelen **topraklar**; kimyasal sedimenter kayaçların başlıca örneklerini teşkil ederler.

***[Oolit** (=**Yumurta Taşı**, *oolite*)**:** Sığ denizel ve çok çalkantılı, dalgalı bir ortamın oluşturduğu, genellikle de yoğun karbonat ya da silis ve demir içeren sığ su ve denizlerde ve sahile yakın bölgelerde çökelmiş ufak mineral küreciklerinden oluşan sedimenter bir kayaçtır. Kayacı, çapı 0,25 mm ilâ 2 mm çaplar arasında balık yumurtalarına (ooid) benzer, ışınsal ya da konsantrik yapıda gelişmiş küçük küresel mineral parçacıkları oluşturur. Oolit'ler daha çok; sıcak ve yoğun karbonat içeren sularda, sahillerde kavkı ya da kum zerrecikleri etrafında kuvvetli dalga hareketleriyle küresel büyüyerek gelişirler**].**

Traverten ve kalkerlerin kullanım alanları; Türkiye'de bol miktarda bulunabilmeleri nedeniyle çok yaygındır. Karbonat içeriği yüksek olanlar, kolay işlenmesi ve ucuz olmaları dolayısıyla doğal yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Bileşimleri; % 90 $CaCO_3$ olan, zehirli etkisi olmayan, kokusuz, çevre dostu bu karbonat kayalarından: **Travertenler** *(travertine)*; iyi cila kabul ettiklerinden genellikle binalarda kaplama taşı olarak kullanılırlar. **Kalkerler** (kireçtaşı) ise bilinen en mükemmel yapı taşlarıdır. Kireçtaşlarının büyük miktarda kullanımı önce Mısır Piramitleri'nde görülmektedir. Mısır'ın başkenti Kahire'nin bir parçası olan *Gize*'de M.Ö. 2.550 yılında inşa edilen ve günümüzde yüksekliği 138,75 m'ye ulaşan *Keops* Piramidi (*Gize* Piramidi, Büyük Piramit) temel zemini; bir ana kaya üzerine, her biri 1 ton ilâ 3 ton arasında değişen yaklaşık 5,5 milyon ton ağırlığa ulaşan 2,3 milyon adet *Nummulit* fosilli kalker bloğundan oluşan, yontma taştan yapılma, yapı taşları ile inşa edilmiş olup günümüze kadar da kalker blokları orijinal yapı ve özelliklerini büyük ölçüde kaybetmemişlerdir.

Kalkerler; çimentonun da ham maddesidir, fırınlarda yakılarak, sönmüş ***kireç** eldesinde, inşaatlarda; temel ve kaplama taşı, kil içermeyenleri de dayanımlı olmaları nedeniyle agrega malzemesi ve yol yapımında mıcır olarak kullanılırlar. Bu kullanım, şayet beton veya yol yapımı gibi yapı sektöründe kullanılmaya yönelik ise taşın mekanik ve fiziksel özelliklerinin, kullanım alanlarına uygun olarak TSE kriterlerine uyum gösterip göstermediğine bakılmalıdır. Bilhassa kaliteli bir beton için, betonu oluşturan agreganın da kaliteli olması gerekmektedir. Agreganın yoğunluğu, kimyasal bileşimi, mineralojik yapısı, dayanımı, boşluk oranı, su emme vb. özellikler, agreganın elde edildiği kayaya bağlı olduğundan bu kayaların özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

***[Kireç:** Kireçtaşının 5 cm - 10 cm boyutlarda parçalar hâlinde kırılarak yaklaşık 900°C – 1.000°C sıcaklıkta uygun fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen bağlayıcı madde**]**.

Agregalar, doğada doğal olarak bulundukları gibi iri taş parçalarının **konkasör** adı verilen taş kırma makinalarında kırılması sonucunda da elde edilebilirler. Konkasörde elde edilen agreganın irisine **kırma taş**, incesine **kırma kum** (**ince mıcır**) denir. Kırma taş ve kırma kuma **mıcır** *(chip)*, denmektedir. Ayrıca agrega açısından: 4 mm göz açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan taneler **iri agrega** ya da çakıl, 4 mm göz açıklıklı kare gözlü elekten geçen taneler **ince agrega** (kum), doğal agrega ocağından doğrudan doğruya elde edilen elenmemiş, işlenmemiş malzemeden oluşan ince ve iri agrega karışımına **Tüvenan** *(pit-run)* **agrega**, agregaların üretilmesinden sonra konkasörden arta kalan ve silt büyüklüğüne karşılık gelen en ince agregaya (ince dâneli mineral toz) ise **taş unu, mıcır tozu** ya da **filler** adı verilir. İçinde ince bağlayıcısı kil olan kumlu çakıllı malzeme de **stabilize malzeme** (stabilize granüler) olarak adlandırılmaktadır.

Örnek olarak İstanbul il sınırları içinde kent, bölge ve ülke açısından stratejik önemdeki çeşitli yer altı kaynağı rezervleri bulunmaktadır. Bu doğal kaynaklar: Kum-çakıl ve taştan (örn. grovak, kireçtaşı, dolomit) oluşan taşocağı rezervleri; silis kumu rezervleri (döküm kumu, cam kumu), kuvarsit ve kil rezervlerinden (bentonit, seramik kili, tuğla kili ve çimento kili eldesi) oluşan endüstriyel ham madde (maden) rezervleri ile kömür ve doğal gaz (enerji kaynakları) rezervleridir.

Bu rezervlerden; silis ve seramik kili rezervleri; cam sanayi, seramik sanayi, seramik yapıştırıcıları, aşındırıcı üretimi, gaz beton üretimi, hazır sıva, dolgu malzemesi, filtre malzemesi, metal parlatma ve demir döküm sektörlerinde yaygın olarak değerlendirilmektedir. İstanbul'un kuzey batısındaki kuvarsit rezervleri, nitelikli cam üretiminde ham madde olarak değerlendirilmektedir. Kuvarsit ayrıca cam üretimi yanında seramik, boya, deterjan, dolgu, hafif gazbeton yapı elemanları *(ytong)*, silika tuğla üretimi gibi kuvars ve kuvars kumunun kullanıldığı tüm alanlarda kullanılmaktadır. Şile ve Ömerli arasındaki doğu-batı uzanımlı seramik kili rezervlerinin içlerinde yer alan kum mercekleri ise demir çelik sanayi için hayati önem arz eden döküm kumu rezervlerini oluşturmaktadır. Döküm kumu rezervleri işletilerek, ülke genelindeki döküm sanayinin malzeme ihtiyacı karşılanmakta ve ayrıca bu malzemenin yurt dışına ihracatı yapılmaktadır. Yalıköy-Podima arasındaki

kuvars kumları yıkanıp elenerek ülke genelindeki termik santraller ile içme suyu arıtma tesislerinin filtre malzemesi ihtiyacını karşılamaktadır.

İstanbul il sınırları içinde madencilik dalında günümüzde toplam 131 ocakta yılda 78 milyon ton değişik türde kum, çakıl, taş üretimi yapılmakta, üretim miktarı kum ve çakılda yılda 15 milyon ton, agrega ve yapı taşı üretimi (örn. grovak ve kireçtaşlarından) ise yılda yaklaşık 63 milyon tondur. İstanbul il genelinde toplam malzeme üretiminin % 72'sini kırmataş (mıcır), stabilizasyon ve suyun aşındırmasına ve oymasına karşı iri taşlarla akarsu kenarlarında, köprü ayaklarında veya sahillerde dalgakıran vb. olarak kullanılan **riprap** (=anroşman malzemesi), % 20'sini kum-çakıl, seramik kili (% 3), kömür (% 1), kuvars kumu (% 1) ve diğer malzemeler izlemektedir (İBB, 2009). Ancak İstanbul'da birbirlerine yakın, iç içe geçmiş tekil taş ocakları, çevresel anlamdaki sürdürülebilirlik açısından olduğu kadar, işletme güçlüğü, emniyet ve rezerv kayıpları açısından da çok büyük olumsuzluklar taşımaktadır. Bu tür ve çevresel açıdan da oluşan olumsuzlukların önlenmesi için, "Doğal Kaynak Organize Sanayi" gibi bir denetleyici anlayışın (DOKAS yönergeleri) uygulamada; emniyet, teknik, ekonomik, çevre, ekolojik, kentsel dönüşüm vb. açılardan gereklilik arz etmektedir (Vardar vd. 2012).

Türkiye'nin (Türkiye = *Turcia* =Türklerin Yurdu) Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde de kalker kayaları yaygınca görülmektedir. Örnek olarak Yukarı Mezopotamya Havzası'nda bir dağın tepe ve yamacında kurulmuş Mardin ili ve çevresi gösterilebilir. İlçesi olan Midyat'da yaygınca yer alan, toplam kalınlıkları 50 m ilâ 600 metreler arasında değişen tebeşirli, dolomitik, killi ve fosilli kireçtaşlarından oluşan istif (formasyon adı: Midyat Kireçtaşı, Eosen dönemi) genel olarak "**Mardin Taşı**" olarak bilinmekte ve adlandırılmaktadır. 1385 yılında Melik İsa tarafından Mardin, Medrese Mahallesi'nin kuzeyinde yaptırılan iki katlı "Zinciriye (Sultan İsa) Medresesi" girişini oluşturan Taç Kapısı'na işlenen taş oyma Şekil 3.19'da görülmektedir. Medreseyi yapan ustaların kesilip yontulabilen "Mardin Taşı" üzerinde taş oymacılığındaki maharetlerini göstermek üzere yaptıkları dairesel biçime uyumlu bitki motifleri şekilleri, merkezden dış çepere doğru: Dairenin merkezinde bir asma yaprağı, etrafında 8 tane karanfil, daha dışında lâle motifleri ve en dışında da muhtemelen kalın bezelye yaprakları yer almakta, dairenin merkezinden çepere doğru bakıldığında ise merkezden etrafa genişleyen her bir halkada farklı ve simetrik yeni figürlerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 19). Mardin Taşı'nın tipik rengi, sarı, sarımsı açık kahverengi, pembedir. Yer yer açık gri ve krem, kırmızımsı renklerde de olabilen Mardin Taşı; bol gözenekli, killi, fosilli, mikritik veya dolomitik olup bölgede taş ocaklarından çıkarılarak tarihî yapılarda kullanılmışlardır. Sertlikleri 2,5-3 serbest basınç mukavemetleri çoğunlukla 500 kg/cm^2 den küçüktür. Bu taşlar, taş ocağından çıkarıldıktan sonra suyunu zamanla kaybederek hem çok

daha hafif hem de daha sonra sertleşerek dayanımları artmaktadır. *****Mardin İli'nde ve çevresinde, tarihî yapılarda yaygınca kullanılan Mardin Taşı'ndan inşa edilmiş yapıların içi şaşırtıcı derecede yazın serin, kışın ise ılık olup doğal klima ortamı oluşturmaktadır. Mardin Taşı'nın bu özelliği, rengi, dokusu, bileşimi gibi kendine has özelliklerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.19. Mardin, Zinciriye (Sultan İsa) Medresesi, Taç Kapısında yer alan motifler (31.05.2011).

***[**Yukarı/Kuzey Mezopotamya'da (bereketli Hilâl) yer alan Mardin'de M.Ö. 4.500'de Subariler daha sonra Sümerler, Asurlular, Kelt'ler (M.Ö. 600; Türkije), Roma, Doğu Roma (Bizans) vb. topluluklar bu civarlara yerleşmiş, Türklerin Orta Asya'dan Anadolu'ya gelişlerini ve mücadelesini yöneten askerî komutan ve Büyük Selçuklu Devleti 2. Hükümdarı Muhammed Alp Arslan'ın (1029 - 15 Aralık 1072) 26 Ağustos 1071 Cuma günü Bizans İmparatorluğu ordusunu yenilgiye uğratan Malazgirt Zaferinden sonra Anadolunun tekrar Türk Yurdu hâline getirilmesi için en önemli adım atılmıştır (TSK, 2012). Günümüzden 12.000 yıl önce Cilalı Taş Devri'ne ait, yeryüzünün bilinen ilk ve en eski yerleşkelerden biri olan ve Şanlı Urfa'da yer alan, muhtemelen Sümerlerin atalarını oluşturan Öntürkler'e ait "Göbekli Tepe" Yerleşkesi ve Mardin bölgesi de 1102 tarihinden itibaren Büyük Selçuklu Devletine bağlı olarak Oğuz Türkmen Beyliği olan Artuklu Beyliği hâkimiyetine geçmiştir. Daha sonra Mardin, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve tüm Anadolu 15-20 yıl gibi kısa bir süre içinde tekrar ve ebedî olarak Türk egemenliğine geçmiş; Selçuklu Dönemi, Osmanlı Dönemi ve günümüzde de TC ile devam etmiştir. Artuklular (Artukoğulları), Mardin bölgesine hâkim oldukları 300 yılı aşkın süre boyunca, Mardin ve yöresinde, 'Mardin Taşı'ndan çok sayıda günümüzde de görülebilen ve şehrin tarihine Türk damgasını vuran tarihî câmi, medrese, hamam ve kervansaraylar yapmışlardır**]**.

Kesme taştan yapılan eserlerden bir diğeri Artukoğulları'ndan Timurtaş tarafından 1147 tarihinde Diyarbakır İli, Silvan İlçesi sınırları içerisinde Dicle Nehri'ne birleşen Batman Çayı üzerinde yaptırılan "**Malabadi Köprüsü**"dür. Eni 7,15 m; uzunluğu 150 m; toplam uzunluğu 281,67 m, kemer açıklığı 40,8 m; yüksekliği, alçak su seviyesinden *****kilit taşına kadar 24,50 m olan tarihî "Malabadi Köprüsü", taş kemer köprüler içinde, kemeri dünyada en geniş olan tek açıklıklı köprüdür. Artukoğulları'ndan günümüze kadar sağlam kalan Malabadi Köprüsü de mühendislik ve mimarî açıdan çok değerli tarihî bir eserdir.

***[Kilit taşı,** *keystone*: Kemer kubbe ve tonozların tepe noktalarına konan, üstüne gelen ağırlığı yanındaki taşlara aktaran taş, anahtar taşı**]**.

Mühendisliğin, mimarlığın, taş oymacılığı sanatı ve yaratıcılığı ile estetiğin bir arada bulunduğu dünyaca ünlü diğer bir şahaser eser ise 'Divriği Ulu Câmii'dir. 1071 Malazgirt Meydan Muharebesinden sonra Türk egemenliğine giren Anadolu'da, Sivas'ın Divriği İlçesi'nde Anadolu Selçuklu Mengücek Oğulları Beyliği Döneminde Ahmed Şah tarafından yaptırılan "**Divriği Ulu Câmii**"nin (=Ahmed Şah Ulu Câmii) yapımına Aralık 1228 yılında başlanıp 1243 yılında 14,5 yıl içinde tamamlanmış ve günümüzde 1985 tarihinde Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır (Sakaoğlu, 2005; Şekil 3.20.A, B ve C). Ahlatlı mimar Hürremşah ve diğer ustalar tarafından yapılan "Ahmed Şah Ulu Câmii"de ve bitişiğinde yer alan Ahmed Şah'ın eşi Turan Melek tarafından külliyeye ilâve ettirilen Dâruşşifanın (hastahane) taşıyıcı sisteminde ve oymacılığında Şekil 3.20.C'de görüldüğü gibi kimyasal kökenli ve organik katkıları da (fosil kavkıları) içeren açık krem renkli masif, dayanımlı dolomitik kireçtaşları ile sarımsı kireçtaşları kullanılmıştır. Yapımında dayanımlı fosilli dolomitik kireçtaşlarının kullanılması, Divriği (Divrik) Ulu Câmii'nin orijinal yapısının ve işçiliğinin, herhangi bir müdahale olmadan günümüze kadar geçen 800 yıllık süre boyunca korunmasını sağlamıştır. Ancak Divriği Ulu Câmii ve çevresinde günümüzde oluşan zeminden kaynaklanan stabilite sorunlarının çözümü için, bilimsel nitelikli herhangi bir ciddi geoteknik etüdün hâlâ yapılmamış ve zemin-iyileştirme önlemlerinin henüz alınmamış olması üzüntü vericidir.



Şekil 3.20.A) Divriği Ulu Câmii, Kuzey Taç Kapısı (Kale/Cümle/Cennet Kapısı). Dünya'da başka bir yerde benzer örneği olmayan ve Selçuklu mimarisinin, yapılışındaki orijinalliğini 800 yıldır koruyarak ayakta kalmış tek yapıt.



Şekil 3.20.B) Divriği Ulu Câmii, Batı Taç Kapısı. Mimarî mükemmellik ve muhteşem taş oyma ve kabartma sanatı görülmekte.

.



Şekil 3.20.C) Divriği Ulu Câmii'ye ait orijinal taş, tuğla, sıva ve harçlar. Câmi'ye ait numuneler, YTÜ İnş. Müh. Bl. Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı'ndan temin edilmiştir (24 Ocak 2012).

Şekil 3.20.C'de Divriği Ulu Câmii'ye ait taş, tuğla, sıva ve harçlar üzerinde Ocak 2012 tarihinde yapılan Nokta Yükleme deney sonuçlarına göre, câmi'yi oluşturan doğal taş, sıva ve harç gibi malzemelerin dayanımları aşağıdaki Tablo 3.5'de verilmektedir.

Tablo 3.5. Divriği Ulu Câmii malzeme özellikleri.

Numune No	Malzeme Cinsi	Nokta Yükleme Deneyi ile Bulunan Tek Eksenli Basınç Direnci [kg/cm^2]
T1a	Tuğla	97-128
T2	Tuğla	83-94
1b	Açık krem renkli, fosilli dolomitik Kireçtaşı	725-1160
2b	Açık krem renkli, fosilli dolomitik Kireçtaşı	1.380-1.950
3	Sarımsı killi Kireçtaşı	260-540
	Sıva (Çap >35 mm)	20
	Harç (Çap > 35 mm)	15-30

İstanbul ve civarında da kireçtaşlarının tarihî eserlerde sık olarak kullanıldığı görülmektedir. Örnek olarak Bakırköy formasyonu kireçtaşları; genel olarak marn, killi kireçtaşı, som kireçtaşı ve bol fosil kavkılı *Maktra*'lı kireçtaşı (Küfeki Taşı) olmak üzere dört farklı kaya grubundan oluşmaktadır (Yıldırım, 2010). Bunlardan günümüzde yapılan çalışmalarla yapı taşı özellikleri açısından en elverişlisi olanının kompozit malzeme özelliğindeki Küfeki taşı olduğu belirlenmiştir. Osmanlı da, tarihi yapılarda kullanmak üzere

Küfeki Taşı'nı tercih etmiştir. Fosilce çok zengin organik kökenli ve tarihî yapılarda kullanılan lif görevi gören bol karbonat fosil kavkılı (*Maktra*) ve boşluklu ,***Maktra*'lı Kireçtaşı** ya da **Küfeki Taşı** olarak adlandırılan kalkerler (Üst Miyosen dönemi çökelleri); büyük oranda $CaCO_3$'dan (% 90-100) oluşmaktadır.

İçerdiği kavkılar nedeni ile doğal bir *****kompozit malzeme (karma malzemeler, *composite material*) özelliği gösteren kayaç, doğada oldukça sağlam, ancak çatlaksız ve yönlenmemiş yani sistematik süreksizlikler içermeyen masif görünüşlü bir yapıda bulunduğundan deprem yükleri altında oldukça sünek davranış göstermektedir. Örnek olarak Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Davutpaşa Kampüsü'nde yer alan tarihî Hünkâr Kasrı'nın (Otağ-ı Hümayun) tüm duvarları Bakırköy kireçtaşlarından (Küfeki Taşı) oluşmaktadır. Bu doğal kireçtaşları üzerinde YTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuarlarında yapılan nokta yükleme deneylerine göre basınç dayanımları ortalama 270 kg/cm^2, tuğlalarda ise 200 kg/cm^2 olarak tespit edilmiştir (Aköz vd, 2012). Dayanımın zamanla artması ise su içeriğinin azalması ve havadaki CO_2'nin, kimyasal bileşimi $CaCO_3$ olan taşla tepkimeye girerek taşın gözeneklerini karbonatlaşma ürünleri ile doldurması ve sonuçta taşın "kompasite oranının (doluluk) artmasıyla açıklanmaktadır (Arıoğlu,1997). Taş ocağından alınan Küfeki Taşları'nda, taşın doku ve bileşenine bağlı olarak; ilk 3 günlük serbest basınç dayanımları q_u = 200 kg/cm^2 iken, 28 gün sonra dayanımları % 50 artışla q_u = 300 kg/cm^2 ye ulaşabilmektedir. Ocaktan ilk çıktığında boşluklu, tabiî birim hacim ağırlığı $\gamma_n \cong$ 1,95 gr/cm^3 - 2,3 gr/cm^3, dâne birim hacim ağırlığı $\gamma_s \cong$ 2,5 gr/cm^3 - 2,7 gr/cm^3, porozitesi n= % 5-22, ağırlıkça su emme oranı ≅ % 2,2 ; hacimce su emme oranı % 4,9 ve serbest basınç dayanımı *(unconfined compressive strength)* genellikle q_u = 20 MPa - 30 MPa (~200 kg/cm^2 - ~300 kg/cm^2) olan Bakırköy Küfeki Taşı, atmosfer koşullarında bekletildiğinde bünyesine boşluklu olduğu için CO_2 alarak hızlı karbonatlaşma süreci ile boşluklarının bir bölümü kalsiyum bikarbonat $Ca(HCO_3)_2$ ile dolmakta, porozitesi azalıp, dayanımı ve tabiî birim hacim ağırlığı artarken, su emmesi de azalmaktadır. Söz konusu "karbonatlaşma" sonucunda basınç dayanımındaki artış, ******beton ile büyük benzerlik göstermektedir. Aradaki fark, betonda ilk anda taşıma gücü olmamasına karşı, Küfeki Taşı'nda ilk dayanımın olmasıdır. Bol kavkılı Küfeki Taşı numuneleri üzerinde yapılan bazı deneylerde, ocaktan

çıktıktan 30 gün sonraki dayanımları q_u = 45 MPa = 458,87 kg/cm^2 olduğu gözlenmiştir (Arıoğlu vd., 1998). İstanbul'un çoğu tarihî yapısında, yapıların dış duvarlarında, gövde örgüsü ve dış kaplama olarak, iç mekânlarda iç duvar malzemesi ve döşeme kaplaması olarak, taşıyıcı ayaklarda (fil ayaklar), kemer, portal (**portal**: ana giriş, çıkış yerleri, ana kapı) ve mihraplarda (**mihrap**: Kâbe yönünü gösteren, duvarda bulunan ve imama ayrılmış olan oyuk veya girintili yer), parmaklıklarda olmak üzere eleman ve bileşen düzeyinde geniş bir aralıkta kullanılmıştır.

Bakırköy kireçtaşlarının yukarıda belirtilen özelliklerden en önemlisi; doğadan çıktığı, yani taş ocağından alındıklarında, yumuşak, her türlü işleme uygun olması ve kolay işlenmesi olup havayla temastan sonra zamanla havadaki karbondioksiti bünyesine alarak sertlik, dayanıklılık ve güç kazanmasıdır. Diğer bir ifâde ile Bakırköy kireçtaşları zamana bağlı olarak basınç, çekme dayanımı ve elâstisite modülleri artmaktadır. İçerdiği bol fosil kavkıları ve kırıntıları ise taşa hem boşluklu hem de çekme direncini artıran lifli, kompozit bir yapı özelliğini kazandırmaktadır. Ayrıca taş-harç ara yüzeyi aderansı (=bağlanma, yapışma) da yüksektir. Bu yüzden İstanbul estetiğini oluşturan başta câmiler ve minareleri olmak üzere hemen hemen çoğu tarihî yapılarda Küfeki Taşları temel taşı olarak da kullanılmışlardır (bk. Örnek, Uygulama ve Yorumlar, 3.7.1.A ve B). Örnek olarak Osmanlı mimarîsinde Mimar Koca Sinan (1490-1588), yapılarında özellikle Küfeki Taşını tercih etmiş, saray, kervansaray, hamam, hastane, köprü, çeşme, su yolu, mahzen, türbe, mescit, câmi, medrese ve Kur'an okuma yerleri inşaası gibi toplam 375 eserinin çoğunda karbonat bileşimli kayaları kullanmıştır. Mimar Sinan'ın 84 yaşında iken 1569 yılında yapımına başladığı ve ustalık eseri olarak, Kânunî Sultan Süleyman'ın oğlu Sultan II. Selim Han (1524-1574) adına yaptığı Edirne Selimiye Câmii'ni *(Selimiye Mosque)* 1575 yılında tamamlamıştır. Câminin dört köşesinde birebir eşit boy ve çapta dört minare yer almaktadır. Bunlar 70,89 metreyi bulan boyları ile Türkiye'nin en yüksek minareleridir. Kireçtaşları kullanılarak yapılan câminin ve minarelerinin birisinin üç şerefesine, üç ayrı merdivenle çıkılmaktadır ve bu merdivenlerden çıkanlar birbirlerini asla görememektedirler (Şekil 3.21. A, B ve C). Mimar Sinan'ın eserlerinin mimarî güzelliği yanında, günümüzde hâlâ ayakta durmaları, Mimar Sinan'ın aynı zamanda zeminlerin ve kayaların dayanım ve davranışlarını iyi bilen, sanat yapılarında en iyi ve en uygun doğal malzeme seçimini yapabilen, taşlara

sükûnet ve asaleti ifâde eden sade ve âhenkli görünüşü veren, son derece bilgili ve tecrübeli, mimarlıkta olduğu kadar inşaat mühendisliğinde ve mühendislik jeolojisinde uzman ve Dâhi bir insan olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.21.A) Edirne Selimiye Câmii. Yapıda fosil kavkılı kireçtaşları kullanılmıştır. Selimiye Câmii, 2011 yılından itibaren UNESCO-Dünya (Kültür) Miras Listesinde yer almaktadır. (26.06.2007).



Şekil 3.21.B) Edirne Selimiye Câmii minaresinin dış görünüşü. Minare sütununda kullanılan kavkılı, gözenekli kireçtaşları (26.06.2007).



Şekil 3.21.C) Edirne Selimiye Câmii minaresinin iç görünüşü. İnsanların birbirlerini görmeden 3 ayrı merdivenle çıkılan minaresinin en üst üçüncü Şerefe'sinden iç görünüş (26.06.2007).

Günümüzde; analiz ve laboratuar deneyleri yapılmak ve TSE standartlarına uygun olmak kaydıyla ayrışmamış, gerek granit, diyorit, siyenit, bazalt, andezit gibi mağmatik, gerekse kireçtaşı, dolomit(it), kuvarsit, karbonatlı kumtaşı, kumtaşı gibi kil içermeyen sedimenter kayaçlar, inşaatlarda *******beton agregası olarak kullanılmaktadır. Yüksek performanslı (basınç dayanımı yüksek+dayanıklı beton) beton üretiminde kullanılacak agregaların tek başına yeterli bir kriter olmamakla birlikte, tek eksenli basınç dayanımları (serbest basınç mukavemetleri) genel olarak >1.100 kg/cm^2 olması gerekmektedir. Bu kayalar içinde beton agregası olarak genellikle tercih edilen ve Türkiye'de bol bulunan kaya, kireçtaşlarıdır. Kireçtaşı ($CaCO_3$) ve dolomit(it) kayasından **[=Dolomitit=Dolotaşı** *(dolostone, dolomite rock)***:** Sertliği 3,5-4 olan dolomit *(dolomite)* minerallerinin -$CaMg(CO_3)_2$- oluşturduğu kayaç**]** oluşan agregalar 700ºC'ye kadar kararlıdırlar; 800ºC - 900ºC'lerde CaO ve MgO'ya dönüşüm söz konusudur. Yani, kalker esaslı agrega ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisinde silis esaslı agrega ile üretilen betonlara göre daha iyi performans göstermektedir. Ancak yüksek dayanımlı beton (>40 MPa) sınıflarında granit ve özellikle bazalt gibi sert mağmatik kökenli agregaların kullanımı beton basınç dayanımına olumlu yönde etkisi vardır. Beton basınç dayanımlarına göre, düşük dayanımlı

çimento hamurlu normal beton sınıflarında (C-20, C-35) en yüksek dayanıma; kalker agregalı bir betonda ulaşılabilmektedir. C-50 (~500 kg/cm^2) ve C-90 (~900 kg/cm^2) gibi yüksek dayanımlı beton sınıflarında ise en yüksek dayanıma; granit ve bazalt agregası içeren betonlarda ulaşılmaktadır. Sleyt, fillit, şist gibi yapraklanma gösteren metamorfik kayalar ile bazı mineraller beton agregası olarak kullanılamazlar. Örneğin silis, kuvars minerali olarak uygun iken, aktif silis polimorfları içeren kristobalit, tridimit ile kristalleşmemiş opal ve kalsedon, alkali reaksiyonuna neden olduğu için kullanılmamalıdır. Ayrışmaya uğramış feldspatlar, kile dönüşmektedirler. Kil ise su ile şişen, agrega-çimento aderansını bozan bir öğedir. Serpantin de çatlaklı ve hacim sabitliği yönünden sakıncalı ve kil gibi kayaçların kimyasal ayrışması sonucu sekonder oluşmuş mineraldir; sağlam kaya gibi görünmesine rağmen, su alınca zamanla şişmekte ve dağılmaktadır. Jips ve anhidrit de, betonda sülfat etkisine neden olur (Akman, 1990). Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda da agreganın mineral yapısının önemli bir etkisi vardır. Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvars ise 575ºC'de yaklaşık % 5,7'lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α-kuvarsdan β- kuvarsa, 867ºC'den itibaren Tridimit'e, 1.470ºC'den itibaren ise Kristobalite dönüşmektedir ve her üç şekilde de kristal hâldedir. Saf kuvarsın yoğunluğu 2,65 g/cm^3, ergime sıcaklığı 1.710 ºC'dir.

***[**Kompozit:** İki veya daha çok malzemenin makro düzeyde yan yana getirilmesi ile bu malzemelerin üstün özelliklerini aynı malzemede toplayarak daha farklı üstün özellikte yepyeni bir özellik ortaya çıkaran malzemelerdir. Örn. çimento ve kumdan meydana gelen ve çelik donatılarla desteklenen beton; diğer bir örn. çamur ile samanın karıştırılması ile oluşturan kerpiç malzeme.

****Beton:** Çimento, agrega, su ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkıların uygun oranlarda ve homojen olarak karıştırılmasıyla oluşturulan, başlangıçta plâstik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla çimentonun hidratasyonu ile katılaşıp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir (Ulaştırma Bakanl. Y.-16, 2011);

*****Beton agregası**; beton yapımında ~% 10 çimento ve % 15-20 su karışımından (çimento+su=çimento hamuru) oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen organik olmayan, doğal veya yapay malzemenin genellikle 100 mm'yi aşmayan (yapı betonlarında çoğu zaman 63 mm'yi geçmeyen) büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış tanelerin oluşturduğu bir yığındır ve betonun hacminin yaklaşık olarak % 70 - % 75'ini oluşturur**]**.

Kil ve silt boyutundaki malzemelerin oranı % 5'den az olan ayrışmamış ve killeşmemiş ya da kil içermeyen kireçtaşı, kumtaşı (grovak, kuvarsit), barit

(barit; yoğunluğu 4,3 gr/cm^3 - 4,7 gr/cm^3 → ağır beton bileşeni) gibi çökelik kayalar ile granit, granodiyorit, siyenit, bazalt türü mağmatik kayalar doğal agregaları oluştururlar. **Doğal agregalar;** nehir, deniz, eski göl, dere yatakları/terasları ve taş ocaklarından kırılmamış veya kırılmış olarak elde edilen agregalardır. **Yapay agregalar** (=sanayi ürünü agregalar) ise yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmamış veya kırılmış yoğun yapılı agregalardır (Şimşek, 2007). Orijinal özellikleri bozulmamış tüm tarihî eserlerde kullanılan doğal taşların taş ocaklarından çıkarıldıkları dönemde, özellikle ayrışmamış olan kesimlerinin alınıp kullanılmaları ile oluşturdukları tarihî yapılar günümüze kadar ulaşabilmiştir. Günümüzde de aranan, tercih edilen ve TSE standartlarına uygun kullanılabilir kayaçların, standartlara uygun fiziksel ve mekanik özelliklerinin 'ayrışma'nın (bozunma) artışına bağlı olarak hızla azaldıkları gözlenmektedir. Hangi tür kayaç olursa olsun ayrışma, kayacın kendine özgü dayanım ve diğer tüm değerlerini azalttığı gibi farklı bir kayaca da dönüşmesine neden olabilmektedir. Mühendislik açısından göz ardı edilmemesi gereken “ayrışma” kavramı ile ilgili detaylı açıklamalar aşağıda “Kısım 3.5. Kayaçlarda Ayrışma ” başlığı altında verilmektedir.

3.5. KAYAÇLARDA AYRIŞMA (Bozunma, *Weathering*)

Sedimenter kayaçlar, yukarıda değinildiği üzere, yeryüzünde mevcut her türde kayaçların ayrışması, taşınması ve çökelmesi sonucu oluşmaktadırlar. Gerek sedimenter kayaların, gerekse mağmatik ve metamorfik kayaların oluşumlarından sonra yer kabuğunun yüzey ve yüzeye yakın derinliklerinde kayaların yer değiştirmeye uğramadan; atmosfer, güneş ışınları, su etkisi ve canlılar aracılığı ile parçalanma, çözülme ve çürüme şeklinde gerçekleşen fiziksel (parçalanma/ufalanma), kimyasal (bozuşma/çözünme) ve biyolojik süreçlerle meydana gelen nitelik değişimlerine **ayrışma** *(weathering)* denir. Ayrışma, bozunma, günlenme, çözünme ve alterasyon kavramları çoğu zaman eş anlamda da kullanılmaktadır. Mineral ve kayaçlar, oluştukları çevre koşulları değişmediği sürece oldukça duraylıdır. Dolayısı ile ayrışma aynı zamanda, ayrışmamış *(unweathered)* kayaların ve minerallerin değişen çevre koşullarına uymak için uzun bir sürede geçirdikleri dönüşümlerdir. Kayanın litolojik özellikleri, jeolojik yapısı, süreksizlikler, yer altına sızan suların kimyasal etkisi,

gaz ve sıcak su çıkışları, iklim, radyasyon, topoğrafik koşullar, biyolojik aktivite ve zaman, kaya üzerindeki ayrışma işlemine neden olan faktörlerdir. Ayrışma, yüzeysel veya zemin yüzeyine (*ground surface*) yakın kesimlerde daha etkili olmakla birlikte, etki ettiği kayaların yapı ve bileşimi çoğu zaman homojen olmadığından ve içerdikleri süreksizliklerin değişken özellikleri açısından ayrışma derinlikleri ve sınırları farklılık göstermektedir. Diğer bir ifâde ile aynı bölgede bile farklı hızlarda gerçekleşen ayrışma, genelde düzensiz yüzeylerle sonlanabilmektedir.

Kayalar üzerindeki ayrışma işlemi; **fiziksel ayrışma**, **kimyasal ayrışma** ve **biyolojik ayrışma** olmak üzere üç şekilde gerçekleşir. Ancak bu üç ayrışma formu arasında her zaman keskin bir ayrım yapmak mümkün değildir.

Fiziksel ayrışma (parçalanma-fiziki veya mekanik ayrışma; *disintegration, mechanical weathering, breakdown*) : Kayalar üzerinde suyun mekanik etkisi ile donma-çözünme, basınç, ıslanma kuruma veya anî sıcaklık değişimi, yağmur, rüzgâr ve tektonizma gibi olaylar sonucu, kayaların herhangi bir kimyasal reaksiyona uğramadan ufalanarak küçük parçacıklara ayrılmasına fiziksel ayrışma denir (3.22.A).



Şekil 3.22.A) Kumtaşı tabakasında görülen fiziksel ayrışma. İstanbul, Asya Yakası, Beykoz İlçesi-İshaklı Köyü batısında görülen kumtaşı-şeyl-karbonatlı kiltaşı ardalanması (Üst Kretase Flişi). Sistematik çatlak takımları boyunca fiziksel ayrışma sonucu dayanımlı kumtaşı tabaka düzleminin (çekicin bulunduğu yer) çakıl-blok boyutunda parçalara ayrılması (15.01.2013).

Yağışın az, buharlaşmanın çok olduğu kurak (arid) iklimlerde, kaya içine nüfuz eden (=içine geçme) suyun, kaya içlerinde arta kalan tuz kristali zerrelerinin kaya yüzeyine yakın gözeneklerde ve çatlaklarda zamanla büyümesiyle tıpkı art arda oluşan donma çözülme olaylarında olduğu gibi, tuz kristallerinin de üç kata kadar büyümeleriyle, çevrelerini saran kayaya yaklaşık 170 kg/cm^2 lik basınç yaparlar ve kayalarda içi boş bal peteği görünümlü yapıları (bal peteği ayrışma) oluştururlar. Tuzların oluşturduğu bu tür fiziksel ayrışma *(salt-crystal growth)*, kayanın içinden dış yüzeyine doğru gelişmekte ve şehirlerde betonarme ve taş yapılarda da sık sık görülmektedir. Bu ayrışma sadece kurak iklimlerde değil, içten dışa doğru tuzun da etken olduğu kimyasal ayrışmalarda da birlikte görülmektedir. Bilhassa Akdeniz sahil kesimlerinde denize çıkıntı ve çoğunlukla orta iri taneli kumtaşı türü benzeri kaya falezlerinde (örn. Korsika, Sardunya ve Sicilya sahilleri) bu tür ayrışmalar görülmekte, gelişen ayrışma, birkaç cm'den yarım metre çapa kadar, boş bal peteği (*Tafoni, honeycomb weathering*), küresel veya böbreğimsi görünümlü boşluklar oluşturmaktadırlar. Ayrışmalarda, bir kaya ne kadar kompleks (karmaşık) bir yapıya sahipse, yani onu meydana getiren farklı mineral sayısı ne kadar fazla ve yapısı, dokusu ne kadar anizotrop ise o kadar süratle parçalanmaktadır.

Donma ve çözünmede; suyun buz hâline geçmesi ile kayaların parçalanması üzerine yaptığı etki fiziksel parçalanmada önemli bir yer tutar. Su, buz hâline geçerken % 9'luk bir hacim artması meydana gelir. Kayaların çatlak ve boşluklarda mevcut suların donması ile meydana gelen % 9'luk hacim artması, kayaların yüzeyinde her bir cm^2 ye yaklaşık 160 kg'lık bir basınç meydana getirir ki, bu basınca çoğu kaya mukavemet edemez. Çatlaklar ve boşluklar, enine ve derinliğine büyüyerek, parçalanmayı hızlandırırlar. Donma ve erime birçok defalar tekrar edecek olursa o zaman tesir daha çok şiddetlenir ve neticede; Kayanın bünyesindeki yarık ve çatlaklar genişler, kaya köşeli taş parçalarında oluşan bir **moloz yığını** *(talus screes)* hâline gelir. Kahramanmaraş kuzeyinde Engizek Dağları yamaçlarında mermer çakıl ve bloklarından oluşan yamaç molozları örnek olarak gösterilebilir (Yıldırım, 1989).

Zemin yüzeyinden zemin içine etki eden don derinliği *(frost depth)* ise mühendislik açısından bilinmesi gerekli önemli bir parametre olup bölgenin

iklimine bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak don; Türkiye'de Doğu Anadolu'da ortalama 0,5 m – 1 m (Kars'ta maksimum 1,4 m; Şentürk ve Köksal, 1968), Merkezî Avrupa'da 0,5 m – 1 m; Doğu Avrupa'da 1 m – 1,4 m; Kuzey Sibirya'da ise 6 m – 7 m kadar zemin içerisine tesir etmektedir.

Kimyasal ayrışma (bozunma*, chemical weathering*), kayaları oluşturan minerallerin kimyasal olaylar sonucunda bozunarak (çözülerek, eriyerek) ikincil minerallere dönüşüp, iç yapılarındaki değişime neden olan süreçler topluluğudur. Buna kimyasal alterasyon da denilmektedir. Kimyasal ayrışmada; fiziksel ayrışmanın tersine, ayrışan malzemelerin bileşimi değişmektedir. Başta oksijen olmak üzere atmosferdeki gazlar, su ve asitler kimyasal ayrışmaya neden olan en önemli etkenlerdir. Oksidasyon (yükseltgenme), redüksiyon (indirgenme), hidratasyon, karbonatlaşma, çözünme (erime), hidroliz, çözelti oluşumu, katyon değişimi; kimyasal ayrışma süreçleridir. Aynı yerde iki tür, yani fiziksel ve kimyasal ayrışma etkili olabilir. Kimyasal ayrışma ile yüzeydeki kayalar, ortam koşullarının etkisi altında kimyasal tepkimelere uğrayarak daha büyük hacimli, buna karşılık daha az yoğun bileşikler oluştururlar. Kimyasal ayrışmayı hızlandıran faktörlerinden biri de kayayı oluşturan minerallerin tane büyüklüğüdür ve mineral boyutları küçüldükçe yüzey alanı artacağından, ayrışmada da artış görülebilecektir.

Kimyasal ayrışma süreçleri tanelerin yüzeylerinde etkili olduğundan, kayalar ya da mineraller çoğunlukla dıştan içeriye doğru bozunurlar ve kimyasal ayrışmanın ilerleme hızı, akışkanların sızabileceği süreksizlik (=çatlaklar) özellik ve sayılarına göre değişir. Benzer koşullar altında bulunan aynı kaya, ne kadar çok çatlaklı ise o kadar hızla kimyasal ayrışmaya uğrar. Bu sebepten, fiziksel ayrışma nedeniyle parçalanan, ufalanan kayaların dış etkilere açık yüzey alanları genişlediğinden, kimyasal ayrışmanın daha hızlı gelişmesine yardımcı olmaktadır. Örnek olarak 1 m^3 lük som küp şeklindeki bir kayanın (monolitik kaya) 6 m^2 lik bir yüzey alanı var iken, bu kayayı ortasından düşey ve yatay yönlerde 0,5mx0,5m boyutlarında küplere ayıracak şekilde bölündüğünde yüzey alanı 12 m^2 ; bölünme artırılıp 0,25mx0,25m boyutlarında ufak küpler oluşturulduğunda 1 m^3 lük kayanın yüzey alanı 21 m^2 olacaktır. Bu kaya giderek küçülen parçalara ayrıldıkça yüzey alanı daha da büyümekte, ancak hacmi sabit kalmaktadır. Küçük tanelerin hacimlerine oranla büyük tanelerden daha büyük bir yüzey alanı vardır. Bölünme yüzeyleri çatlak

(süreksizlik) yüzeyi olarak varsayıldığında, bir kayanın giderek küçülen parçalara ayrılmasıyla yüzey alanı da artış gösterecektir. Kimyasal ayrışma da tane yüzeylerini etkilediği için kayanın yüzey alanı ne kadar büyürse kimyasal ayrışma da o kadar etkili olacaktır.

Ayrıca kayayı oluşturan minerallerdeki çeşitlilik, mineral büyüklükleri, bileşimleri ve iklim de kimyasal ayrışmanın hızını denetler (Şekil 3.22.B). Kuvars minerali (SiO_2) ise bozunmaya karşı diğer minerallere nazaran çok daha dayanıklıdır. Kuvarstan oluşan kuvarsit de kayacı çok yavaş bozunan son derece duraylı bir kayadır. Olivin, piroksen, amfibol, biyotit, feldspat (örn. albit) türü mineraller içeren; peridotit, amfibol, piroksen ve feldspat gurubu kayaçlar, kimyasal açıdan duraylı olmadıklarından daha hızlı kimyasal ayrışıma uğrarlar. Yani minerallerin duraylılığı, mağmadan birincil oluşumlarındaki öncelik sırasının tersi bir sıra izler. Mağmadan son oluşan "silis gurubu" mineraller (örn. kuvars) duraylı iken, ilk oluşanlar (örn. olivin) kimyasal süreçlerle daha kolay bozunurlar.



Şekil 3.22.B) Kayalarda fiziksel ve kimyasal ayrışma. İstanbul, Avrupa Yakası, Sarıyer İlçesi-Uskumruköy batısında yer alan Taş Ocağında görülen ince taneli kumtaşları ile ardalanan açık gri renkli dayanımlı dolomit(it) kayaları (Devoniyen). Litolojik özellikler yanında tektonizma etkisiyle süreksizlikler boyunca farklı derecelerde gelişmiş kimyasal ayrışmalar (14.01.2013).

Sıcaklığın yüksek, yağışın bol ve buharlaşma hızının düşük olduğu tropik iklime sahip bölgelerde kimyasal ayrışma daha hızlı gelişmektedir. Ancak ister sıcak isterse soğuk iklim bölgeleri olsun, “kurak” ortamlarda kimyasal ayrışma en az düzeydedir. Tropik bölgelerde ayrışmanın etkisi onlarca metre derinliğe ulaşırken, kurak bölgelerde ve kutuplarda görülen kimyasal ayrışma zemin yüzeyinden, ancak birkaç cm ya da birkaç m derinliğe kadar ulaşır. Kimyasal ayrışma; sürekli olarak donmuş hâlde bulunan yörelerde gelişmez.

Kimyasal ayrışmanın diğer bir göstergesi de **küresel ayrışma'**dır *(spheroidal weathering)*. Farklı süreksizlik takımlarını içeren bir kaya yapısı, bilhassa çöl ikliminin hüküm sürdüğü günlük sıcaklık farkının fazla olduğu yerlerde, kaya köşelerinden çok hızlı olarak üç yandan, kenarlarından hızla iki yandan, düz yüzeylerinden ise daha yavaş ve yaklaşık tekdüze biçimde hem fiziksel hem de kimyasal ayrışmaya başlar. Ayrışma sonucu köşeler ve kenarlar daha hızlı bozunur, malzemeler buralardan kopar ve kaya küresel bir biçim alır. Bir blok küreye çok yakın bir biçim alarak ayrıştığında yüzeyi eşit olarak ayrışmıştır ve küresel biçiminde daha fazla bir değişiklik gerçekleşmez (örn. üç yönde gelişmiş çatlak takımlarını içeren granit; soğan yapısı). Küresel ayrışma aynı zamanda çatlak takımlarından daha etkin olan kararsız minerallerin etkisiyle de oluşabilirler. Şekil 3.22.C ve D’de görüldüğü gibi aglomeralarda, duraysız ince taneli volkanik matriks ve hamurla çevrelenmiş irili ufaklı volkanik kaya parçaları, dışarıdan merkeze doğru iç içe paralel olarak gelişmiş kimyasal bozuşmaya neden olmakta ve küresel bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 3.22.C) Küresel ayrışma. İstanbul, Avrupa Yakası Uskumruköy, Kilyos Caddesi yol yarmasında kimyasal ayrışmaya uğramış Üst Kretase yaşlı aglomeralarda, volkanik matriks ve hamurla çevrelenmiş volkanik kaya parçaları (bazalt) üzerinde görülen kararsız minerallerin etkisiyle oluşmuş gonca biçimli küresel ayrışmalar (28.12.2012).



Şekil 3.22.D) Küresel ayrışma. İstanbul, Asya Yakasında Paşamandıra-Riva Konakları güneyinde (Riva Konakları'nın yaklaşık 400 m güneyi) yamaçlarda yer alan Üst Kretase yaşlı aglomera ve bazaltlarda oluşmuş küresel ayrışmalarda, çekirdek taşı (az ayrışmış yuvarlak ve sağlam kalmış blok) çapları birkaç metreye ulaşmaktadır. Bu yöre, *jeopark olarak korunmaya değer, *jeosit alanlarını oluşturan bir *jeolojik mirastır (22.01.2013).

***[Jeosit:** Güncel veya eski herhangi bir jeolojik süreci, olayı veya özelliği ifade eden kaya, mineral, fosil topluluğu, yapı, istif, yerşekli veya arazi parçasıdır (jeolojik miras terimi).
Jeopark: Aynı veya farklı türden jeositlerin topluca bulunduğu, yaya gezme mesafesinden küçük olmayan alan (jeolojik miras terimi).
Jeolojik Miras: Önemli bilimsel veya görsel değeri olan, doğal veya insan eliyle yok olma tehdidi altındaki jeosittir (Jemirko, 2000)**]**.

Ayrışma olaylarında; oksidasyon, redüksiyon, hidratasyon, karbonatlaşma, çözünme (erime) ve hidrotermal ayrışma, kimyasal ayrışma süreçlerini oluşturmaktadır.

Oksidasyon (yükseltgenme); elektronların bir atom, iyon ya da molekülden ayrılmasını sağlayan kimyasal bir reaksiyondur. Yani, kaya bileşiminde yer alan minerallerin oksijenle birleşmesi sonucu meydana gelen kimyasal değişimdir. Bir elementin oksijenle birleşmesini ya da oksijen etkisi altında parçalanması olayını ifâde eden oksitlenme (**paslanma**) bir kimyasal ayrışma olup çoğunlukla demir mineralleri içeren kaya yüzeylerinde gerçekleşir ve oluşumunda suyun etkisi büyüktür. Örnek: Pirit (FeS_2) oksijen ve suyun

etkisiyle önce demirsülfata sonra da Limonit'e ($Fe_2O_3.nH_2O$) dönüşür. Bu nedenle, içinde pirit kristalleri içeren kayalar yapı taşı olarak kullanılmaya uygun değildir. Ayrıca piritin, hematit ve jipsle oksitlenmesi, çok büyük hacim artışı ortaya çıkarır ve yeraltı yapılarında taban kabarmalarına neden olur.

Redüksiyon (indirgenme, geri getirme)**;** kimyasal bir reaksiyon olup oksidasyonun tersine, bir atom, iyon ya da bir molekülden elektron kazanma hâdisesidir. Zeminde, yeraltı suyunu içeren doymuş bölgede yeterince oksijen mevcut olamayacağı için redüksiyon meydana gelir. Yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyine çok yakın olduğu ve uzun zaman böyle kaldığı yerlerde, bataklıklarda, redüksiyon hâdiseleri hâkimdir. Hematit'in (Fe_2O_3 – O_2-ferri oksit), ferro oksite (FeO) dönüşmesi redüksiyona örnek olarak verilebilir.

Hidrat; su ile başka bir maddenin birleşmesi ile oluşmuş bir bileşiktir (örn. jips=alçıtaşı, $CaSO_4.2H_2O$). Suyun doymamış bağlarla birleşmesine **hidratlaşma**, diğer bir ifadeyle kaya ve minerallerin su almasına **hidratasyon** *(hydration)* denir. **Hidroliz** ise su ve bazların tepkimesiyle gerçekleşen yer değiştirme reaksiyonlarıdır. Hidroliz ile kaya yapısında suyun etkisiyle meydana gelen reaksiyon ve kimyasal değişmeler meydana gelmekte olup aynı zamanda yeryüzünde en yaygın görülen bir kimyasal ayrışma sürecini oluşturmaktadır. Hidratasyon, su ve mineralin bir hidrat mineral oluşturma süreci olduğundan, çözülme ilerledikçe hidratasyon daha fazla önem kazanır. Bu olay neticesinde, hematit, limonite ve anhidrit su alarak jipse dönüşür. Hidratasyona uğramış mineraller, orijinal sertliklerini kaybederler ve nispeten kolay eriyebilir bir duruma gelirler. Meselâ, hidratasyon sonucu anhidrit jipse dönüşünce, hacimde % 30 artış meydana gelir ve tünellerde taban kabarmasına neden olur.

Karbonatlaşma (karbonasyon, *carbonation*); kimyasal bir reaksiyon olup (kireçtaşlarında) maddenin karbondioksitle doyurulması ve karbondioksit vasıtasıyla bileşiklerin karbonatlara dönüştürülmesi işlemidir. Karbonatlı çözeltilerin kimyasal yollar ile çözünmesinde (karstlaşma) başlıca rolü oynar. Diğer bir ifâde ile karbonatların oluşturulması, karbondioksitin akışkana sokulması anlamındadır [$CaCO_3+CO_2+H_2O\rightarrow Ca(HCO_3)_2$]. İkincil karbonat ve bikarbonatlar, kalsiyum oksit mağnezyum, potasyum gibi bazı ayrışma ürünleriyle karbondioksitin birleşmesi sonucu meydana gelirler. Bu işlem sonucu, erimiş hâlde karbondioksit içeren yüzey suları, ayrışmış kayalardan

süzülür ve çatlak ve tabaka yüzeylerinde çözünmüş CO_2'nin ayrılması ile tekrar kristalleşerek kireçtaşı tortuları oluştururlar. Karbonatlaşma olayı sadece doğada değil, inşaatlarda beton yüzeyleri üzerinde de görülür ve azalan bir hızla beton derinliklerine doğru ilerler. Ancak ilerleme hızı en kötü koşullarda bile ortalama 1 mm/yıl'dan daha azdır ve 1 mm beton kaplaması, en fazla 1 yılda karbonatlaşır. Yüksek kaliteli ve düşük poroziteli geçirimsiz betonlarda karbonatlaşma etkisi ise çok azdır ve donatılara ulaşıp paslanma olayını engeller.

Çözünme (erime-*solution*); Çözünme sırasında bir maddenin iyonları bir sıvı içinde birbirinde ayrılır ve katı madde erir. Su ise önemli bir çözücüdür. Kaya tuzunun (Halit-NaCl) suda çözülmesi çözünmeye bir örnek olarak verilebilir. Çözünme; karbonatlaşma olayları sonucunda da gerçekleşir ve asidik suda karbonik asit kayayı oluşturan mineraller üzerinde kimyasal değişime yol açar ve çözünmeye neden olur. Genellikle su içersinde erimiş karbonik asit (H_2CO_3), kaya yapısını etkiler ve sudaki oranı sıcaklıkla ters orantılıdır. Karbonatlı kayaların kimyasal yollarla çözünmesinde (karstlaşma) başlıca rolü oynar. Mineraller suda aynı derecede erime özelliğine sahip değillerdir. Kaya tuzu, jips gibi mineraller suda kısa sürede çok kolay erimelerine karşın, kireçtaşı ve dolomitler daha az ve uzun bir sürede erirler. Kuvars muskovit gibi mineraller, hemen hemen hiç erimezler. Kayaların erimesi sonucunda içlerinde büyük boşluklar oluşur. Boşluklar, mühendislik projelerinde büyük sorunlar oluştururlar (bk. Örnek, Uygulama ve Yorumlar 3.7.2).

İçinde kil ve kuvars mineralleri içeren kireçtaşlarının erimesi ile kil, kuvars ve diğer erimeyen minerallerin tortular hâlinde yüzeyde, çatlaklar içinde, erime boşluklarında ve süreksizlikler içinde birikmesiyle artık (rezidüel, kalıcı) kırmızı topraklar *(Terra-Rossa)* oluşur. Karbonatlı kayalardan oksidasyon ve erime sonucu arta kalan bu toprakların rengi, içindeki oksitlenmiş demirden dolayı parlak kırmızı-kırmızımsı kahverengidir. Genellikle Akdeniz Bölgesi'nde görülen, ham humus rengini andıran, ancak humusça fakir olmasına rağmen tarım açısından su temini ile oldukça verimli hâle gelebilen özellikteki bu tür kırmızı topraklara **Terra-Rosa** (Akdeniz toprağı) adı verilir. Kırmızı toprak olarak da adlandırılan Terra-Rosa'ların kalınlığı, kireçtaşı katmanlarının kalınlığına, içerdikleri erimeyen minerallerin miktarına ve zamana bağlıdır. Meselâ; çözünme ile kireçtaşları su ve karbondioksit birleşerek, karbonatlaşma

meydana getirir ve karbondioksitin kaynağı ne olursa olsun asitli bir çözeltide yer alan kalsit: $CaCO_3+H_2O+CO_2 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$ tepkimesiyle hızla erir. Ancak ortamda karbondioksit azalacak olursa reaksiyon ters yönde gelişerek tekrar $CaCO_3$'ü oluşturarak çökelir. Bu yeni çökeller; doğada daha çok çatlak dolguları, travertenler, tufalar, sarkıt ve dikitler hâlinde gözlenirler.

Hidrotermal Alterasyon *(hydrothermal alteration)*: Sıcak çözelti alterasyonu veya bozunması ya da sıcak çözeltili bozuşma anlamındadır. Burada, yer içindeki sıcak sulu çözeltiler, geçtikleri yollar boyunca, yan kayada giriştikleri fiziksel ve kimyasal etkileşimler sonucunda, renksel, kimyasal ve mineralojik değişiklikler meydana getirirler.

Hidrotermal alterasyonda; hidrotermal çözelti ile yan kayaç arasında, hidroliz, hidratlaşma, silisleşme, silikatlaşma, oksidasyon-redüksiyon vb. reaksiyonlar oluşmaktadır.

Hidrotermal alterasyon, ya yüzeyden kaynaklanan suların etkisiyle **yüzeysel bozunma** ya da derinsel kökenli çözeltilerin etkisiyle **derinsel bozunma** şeklinde olmaktadır. Bu bozunma şekli hidrotermal çözelti ile yan kaya arasında hidratlaşma, silisleşme, silikatlaşma gibi ya da H^+ iyonunun etkisini ifâde eden, yani çözeltiden yan kayaca H^+ ilâvesi sonucunda hidroliz *(hydrolysis)* reaksiyonları gelişir ve hidroliz reaksiyonları sonunda hidrotermal çözeltide önemli değişiklikler olabilir. **Hidroliz;** kaya yapısında suyun etkisiyle meydana gelen reaksiyon ve kimyasal değişmeler olduğundan, yeryüzünde en yaygın görülen bir kimyasal ayrışma sürecidir ve su katılımıyla ilişikli kimya yolu ile bir çürüme işlemidir. Ayrışma daha çok silikatlar üzerinde etkilidir. Kaya yapısında suyun etkisiyle meydana gelen reaksiyon sonucu kimyasal değişmeler oluşur. Burada, suyun kimyasal etkisi H^+ ve OH^- iyonlarına ayrılmasına bağlı olarak yükselir. Hidroliz, suyun H^+ ve OH^- iyonları ile kaya ve minerallerin bileşiminde bulunan elementler veya iyonlar arasındaki bir reaksiyon olarak da tanımlanabilir. Suyun iyonlara ayrılması sıcaklığa, karbondioksit miktarına ve asitlere bağlı olarak artar. Asidik ortam H^+ iyonlarına bağlı olarak yükselir ve silikatlı kayaların ayrışmasında başlıca etkendir. Silikatların kimyasal ayrışması sonucunda değişik kil mineralleri ortaya çıkar. Meselâ; feldspatların kimyasal ayrışması sonucunda kaolen, illit vb. gibi değişik türde kil mineralleri meydana gelir. Feldspat'lardan ortoklasın hidrolozi sonucunda kil minerali olan kaolinit oluşur. Kimyasal ayrışma

sonucunda kayaların hacmi değişik oranlarda (% 5-30) artar. Basınç dirençleri, dolayısıyla da taşıma güçleri azalır. Bu tür kayalar üzerine mühendislik yapılarının inşaası düşünüldüğünde ayrışmanın derecesi ve derinliğinin özenle saptanması gerekir (Tarhan, 2002). Kayanın kimyasal ayrışması temelde inorganiktir ve toprak için gerekli malzemeyi oluşturur.

Hidroliz yolu ile kayaların ayrışması, ancak kayanın zaman zaman su ile doymuş hâle gelmesine bağlıdır. Devamlı olarak yeraltı suyu seviyesi altında bulunan kayalarda, genellikle çözülme izine rastlanmaz. Buna karşılık, aynı bölgede olup zaman zaman su ile doymuş hâle gelen, ancak yeraltı su seviyesi üstünde bulunan kayalar hidroliz yolu ile daha fazla bir çözülme gösterirler; çünkü hidroliz, kayaların hareketsiz bir su ile doymuş hâle gelmesinden ziyade, sık sık kaya ile temasa gelen hareketli bir suyun, daha önce erime durumuna hâle getirilmiş olan maddeleri oradan uzaklaştırması ile tesirini daha iyi gösterir. Bu suretle hidroliz, oksidasyon, karbonasyon gibi reaksiyonlar neticesinde erime durumuna geçen maddeler yıkanıp başka taraflara taşınırlar, memba ve nehir suları ile denizlere kadar sürüklenirler.

Doğada rastlanılan maddelerin hemen hepsi az ya da çok suda erirler. Bilhassa çeşitli asit ve tuzları içeren yer altı sularında daha fazla eritme özelliği vardır. Bu suretle ayrışma tabakasından, suda erimiş birçok malzeme devamlı olarak nakledilir. En az eriyen kısım ise geriye kalarak toprağı oluşturur.

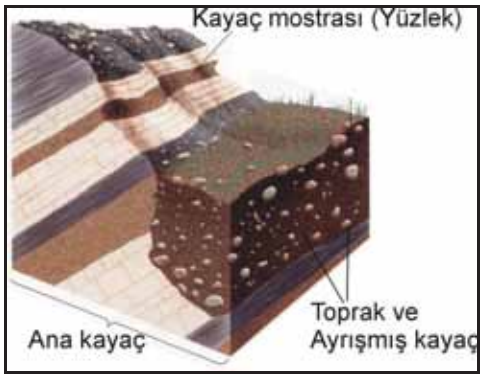
Karalar üzerinde, ortalama olarak 1 km^2 araziden senede 35 ton çeşitli malzeme, erimiş bir hâlde nehirlere ve denizlere taşınır. Denizlere taşınanların en önemlileri $CaCO_3$, $CaSO_4$. NaCl, SiO_2, Na_2O_3, K_2O_3, ve $MgCO_3$ 'tür.

Hidroliz olayının genel neticeleri şöyle özetlenebilir:

a) Hidroliz ile bilhassa çok yağışlı yerlerde SiO_2 eriyerek, uzaklara nakledilir. Buna desilsifikasyon denir. b) Yine nemli bölgelerde çözülme sonucunda kalsiyum, mağnezyum, potasyum ve sodyum yıkanır. Buna dealkalizasyon denir. Bunun sonucunda asit topraklar meydana gelir (Ketin, 1963). c) Toprağın esas unsurunu teşkil eden killer teşekkül eder. Kimyasal ayrışmaya mâruz kalmış taş parçasının temas sathı ne kadar büyükse, kimyevî etkinlik de o ölçüde fazla olur ve tane boyutu küçüldükçe de, yüzey alanı büyümektedir.

Biyolojik ayrışma; kayalar üzerinde organizmalar tarafından (çoğunlukla bakteriler) oluşturulan ayrışma işlemidir. Bu işlem sonucu diyajenez (taşlaşma,

d*iagenesis*) geçirmiş olan sedimenter kayalar ile mağmatik ve metamorfik kökenli sağlam kayaların zemin yüzeyinde fiziksel ve kimyasal ayrışmanın da etkisiyle ayrışma ürünü toprak oluşumu meydana gelir (Şekil 3.22.E). **Toprak**; fiziksel parçalanmayla gevşemiş, kimyasal ayrışma ve humuslaşma olaylarıyla yeni özellikler kazanmış olan katı yer kabuğunun en üstteki gevşek tabakasıdır (Çepel, 1998). Biyolojik ayrışma hem kimyasal hem de fiziksel ayrışmaya neden olmaktadır. Ayrışmanın sonucu meydana gelen toprak oluşumu iklim, kaya türü organizma, topoğrafya ve zaman faktörlerine bağlıdır. Toprağın oluşabilmesi beş ana faktöre bağlıdır. Bunlar: Minerallerin cinsi, iklim, organizma, arazinin morfolojik yapısı ve zamandır. Kayaların ayrışmasında organizmaların yaptığı kimyasal tesir, fiziksel tesirden daha çok önemlidir. Bütün bitki kökleri, en başta CO_2 ve diğer organik asitler çözülemeyen fosfatların çözülebilir hâle getirilmesinde esaslı rol oynarlar.



Şekil 3.22.E) Yeryüzünde mostra (=yüzlek) veren ana kayacın ayrışması ve toprak oluşumu.

Toprak oluşumunda, çeşitli böcekler ayrışmaya çok yardımları dokunur. Bunlar toprağın iç kısımlarına bazı organik maddeleri taşıyıp depo ederler. Bu maddeler ile minerallerin parçalanma ve çözülmesini kolaylaştıran kendilerinden arta kalan çürümüş ölü organik kalıntı ve bitki bileşenlerinin (humus) oluşturduğu hümik asitler meydana gelerek ayrışma gerçekleşir ve geride siyah, koyu kahverengi toprak olarak adlandırılan maddeler oluşur. Toprak oluşumunda aneorobik canlıların da etkileri vardır. *****Anaerobik şartlar altında, kayalarda oksijen bakımından zengin olan nitrat ve sülfat gibi bazı bileşikler, bakteriler tarafından bir oksijen membaı (kaynağı) olarak kullanılır. Bu maddeleri, bakteriler parçalayarak oksijeninden istifade ederler.

***[Anaerobik ortam**: Biyolojik, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar için moleküler oksijenin bulunmadığı ortam**]**.

Toprak oluşumu; en etkili biçimde sırasıyla, yağışın bol ve sıcaklığın yüksek olduğu tropikal bölgelerde gerçekleşmekte, tropikal bölgeleri ise ılıman bölgeler takip etmektedir. Yağış miktarının az olduğu, ormanların yetişmediği ve yıllık yağışın <25 cm/yıl olduğu çöl bölgeleri ile yıllık yağışın <25-50 cm/yıl olduğu kutuplarda toprak oluşumu son derece az olup cm'ler mertebesinde kalmaktadır.

Ayrışmanın hızı; iklim bölgelerine ve kayacın cinsine göre değişmektedir. Ilıman ve yağışlı bölgelerde, örnek olarak İstanbul'da birçok eski tarihî binaların ve hisarların taşları, belirgin bir ayrışmaya uğramışlardır. Süleymaniye Câmii'nin ve medresesinin avlu duvarlarındaki *Maktra'*lı kireçtaşları (kalkerler), yer yer birkaç cm oyulmuşlardır.

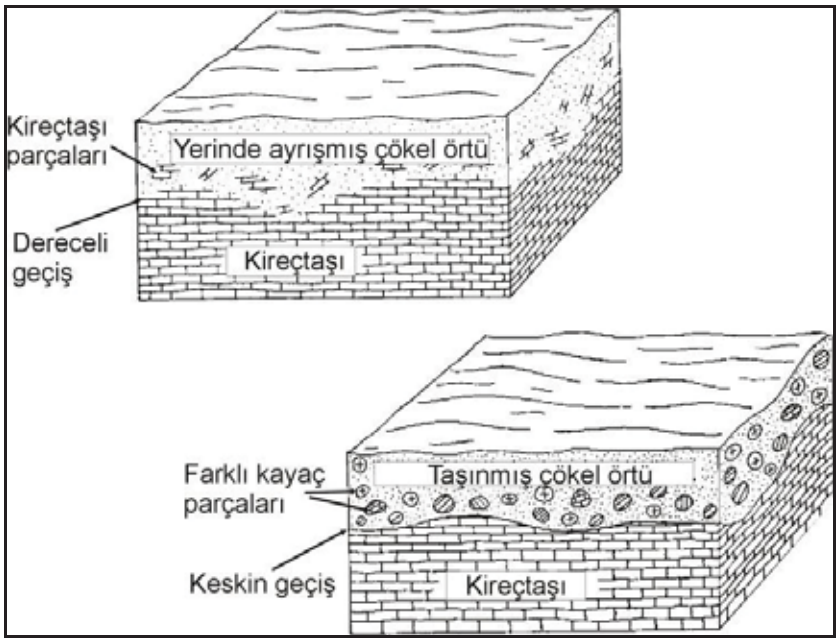
Kuru ve sıcak iklim bölgelerinde ayrışma, daha yavaş oluşur. Mısır'da İskenderiye'de 3.500 seneden beri dikili duran *Assuan* granitlerinden yapılmış ve üzerine hiyeroglif yazılmış sütunlarda çok az bir aşınma izi görülmektedir. *Assuan* granitlerinden yapılmış âbidelerin, Mısır'daki aşınma-ayrışma hızı, 5.000 senede 5 mm – 10 mm kadardır ve buradan Londra'ya taşınan hiyeroglifli sütunlardan bir tanesi ise oldukça fazla aşınmıştır. Burada don tesiri ve sık yağışlar, ayrışmanın hızını arttırmıştır ve 70 kış mevsiminde oluşan ayrışmalar, Mısır'daki 70 senelik aşınmanın 50 katından daha fazladır.

Havadaki CO_2 miktarının ayrışma hızı üzerine etkisi de büyüktür. Kimyasal ayrışmaya karşı en fazla dayanıklı mineral kuvarstır. Plajioklaslar, ortoklaslardan daha çabuk, kalsiyumlu plajioklaslar sodyumlu olanlara nazaran daha fazla ayrışırlar. Olivin, piroksenlerden ve piroksenler de amfibollerden daha az dayanıklıdırlar. Mika, diğer siyah mineraller arasında en dayanıklı olanıdır. Beyaz mika (muskovit), siyah mikaya (biyotit) nazaran daha dayanıklıdır (Ketin vd., 1963).

Yukarıda da değinildiği üzere, herhangi bir zemin yüzeyinde sağlam kayacın ayrışarak bozunmuş bölümü, kaya kütlesinin *(rock mass)* üzerinde zemin özelliğine sahip bir toprak katmanının oluşmasına neden olmaktadır. Bu işlem sonucu oluşan taşlaşmamış kırıntılı-kimyasal çökel, herhangi bir taşınma ve biriktirme işlemi geçirmemiş olduğundan düzensiz dokanaklı, kısmen dereceli geçişli ve yerinde ayrışma yani bozunma ile **yerinde oluşmuş zeminler**i (**kalıntı=rezidüel zeminler**, *sedentary soil*) oluştururlar. Ya da ayrışma sonucu kayalardan kopan değişik boyuttaki parçalar, kolay aşınmaları

nedeniyle rüzgârlarla *(wind-laid deposit)* veya sularla *****erozyona *(erosion)* uğrayarak bulundukları yerlerden uzak farklı depolanma alanlarına taşınıp birikerek, **taşınmış zeminleri** *(transported soil)* oluştururlar. Dolayısı ile taşınmış zeminler*;* bozunmuş ana kaya örtüsünün erozyona uğrayarak taşınması ile bulundukları yerlerden uzak farklı havzalarda birikmiş yüzey çökelleridir. Taşınma sonucu, sedimentlerle bozunmamış kaya kütlesi arasındaki geçiş, ayrışmaya (bozunma) bağlı olarak yerinde oluşmuş olan sedimentler gibi kısmen dereceli olarak değil, tek bir yüzeyden oluşan sınır boyunca anî ve keskin olarak gerçekleştiğinden, bulundukları yörede oluşmadıkları kolayca anlaşılabilmektedir (Şekil 23).

***[Erozyon**: Zemin yüzeyindeki toprak ve gevşek malzemenin, su, rüzgâr vb. doğal kuvvetlerle aşındırılıp taşınması**]**.



Şekil 3.23. Yerinde ayrışma ile oluşmuş ve taşınmış zeminler. Şekilde üst kesimde yer alan blok diyagramda; ana kayanın yerinde ayrışması ile oluşmuş ve ana kaya ile dereceli geçişi görülen çökel örtü zemini görülmekte (örn. iklime bağlı olarak oluşmuş pedalfer ve pedokal vb. türü **zonal topraklar** = yerli topraklar). Şekilde alt kesimde yer alan blok diyagramda ise **azonal topraklar** (örn. alüvyon birikintileri), yani zonlanma gelişmemiş başka yerlerden taşınmış topraklar (zeminler) görülmektedir. Burada ana kaya üzerine farklı bölgelerden akarsu veya rüzgârlarla vb. ana kayadan erozyon ile farklı cinsteki kırıntıların taşınarak getirilip ana kaya üzerine üst üste yığışmasıyla oluşmuş ve ana kaya ile keskin geçişi (dokanağı) görülen taşınmış zemin veya taşınmış çökel örtüler görülmektedir. Bu tip taşınmış çökellere; alüvyon birikintileri, rüzgârlarla taşınmış kumlar (lös), tarıma oldukça elverişli kolüvyal topraklar yanında, bitkisel toprak içermeyen taşlı topraklar = **Litosol,** (örn. yamaç molozları) ve buzullarla oluşan morenler örnek olarak verilebilir.

Zemin yüzeyindeki bozunmalar, toprağı oluşturur ve derine doğru ayrışmanın yarattığı bozuşma giderek azalarak dereceli olarak sağlam kayaca ulaşılır. Zemin yüzeyinden sağlam kayaya kadar ulaşan farklı özellik içeren toprak zonları "**Toprak Kısımları**" adı altında incelenirler. Toprak kısımları A, B, C, D profilleri olarak adlandırılabilecek dört ana profilden oluşur (Şekil 3.24). Bu dereceli geçişte en üstte organik ve mineral karışımından oluşan bir katman (A zonu) yer alır (Şekil 3.24). Toprağın verimliliğini sağlayan ve birkaç 10 cm'yi geçmeyen humusça zengin (örn. daha çok ılıman ve nemli iklim bölgelerinde) olan "A" zonunun en üst kesimi toprağın işlendiği yani tarımın yapıldığı yerdir. Şayet A zonu (=yıkanma kuşağı=üst toprak, *zone of leaching*) aşırı yağıştan dolayı fazlaca yıkanırlarsa besin maddeleri bakımından da fakirleşirler. Zemin yüzeyini oluşturan kahverengi, gri ve siyahımsı renkli "A" zonunda (horizon, katman) suda eriyen maddeler ve ince zerreli taneler, sızıntı suları ile zamanla aşağı kısımlara B zonuna sızarlar.

A zonunun altında yer alan B zonu (=birikme kuşağı=alt toprak, *zone of accumulatio*n), A'dan sızan maddelerin toplandığı, kil minerali demir oksit (=pas) ve kalsit birikiminden oluşan ikinci tabakayı oluşturan bir zondur. Bu nedenle B zonu birikme bölümü, yani tarımın yapılmadığı yerdir. "B" zonunda onlarca metre kalın katmanlar oluşturabilen toprak türüne örnek olarak sıcak iklimlerde oluşan ***laterit topraklar** verilebilir.

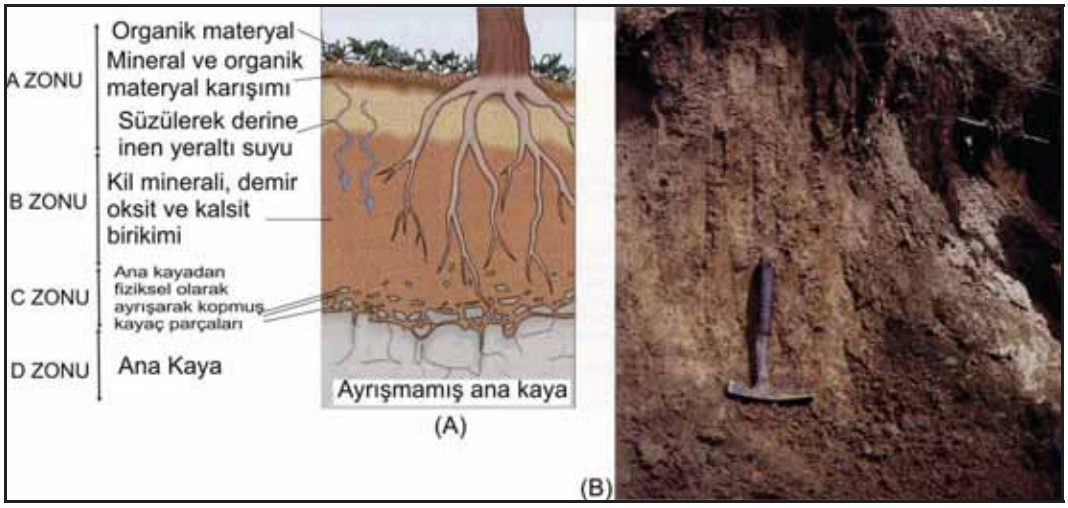
***[Laterit:** Sıcak ve yağışlı (tropikal) iklime sahip bölgelerde yoğun kimyasal ayrışma ile kolay çözülebilen Na, K, Ca, Mg gibi elementlerin yağmurlarla A zonundan tamamen alta taşınıp geride zor çözülen ve B zonunu oluşturan zonda metrelerce kalınlıkta kızıl rengi veren alüminyum ve demir elementleri tortularının kaldığı humusça fakir, kırmızı kahverengi gevşek tutturulmuş tuğla toprağı. Ana malzeme alüminyum açısından zenginse B zonunda alüminyum cevheri olan **boksit** birikir**]**.

Sıcak iklimlerde lateritleşme, soğuk iklimlerde ise üst zonda silis oranı yüksek olan podsollaşma egemendir. Podsolik topraklarda A zonunda silis oranı yüksek, lateritik topraklarda ise düşük değerdedir.

"C" zonu; B zonu altında yer alır ve fiziki, kimyevî olarak ayrışmış, ana kaya *(bedrock)* parçalarını içeren kesimdir. C zonu, ayrışmamış kayadan kopmuş çakılların belirdiği ve bunların miktarının derine doğru gidildikçe artmaya ve irileşmeye başladıkları üçüncü zonu oluşturmaktadır (Şekil 3.24). Bitkisel toprağın ulaşmadığı ana kaya ile sınır teşkil eden C zonunda; kısmen kaya dokusunun korunduğu irili ufaklı çakıl ve blokları içeren, kimyasal

ayrışma ile oluşmuş kahverengi, kırmızı renkli, killi zeminlere **saprolit** adı verilir. Saprolit'in altı, yapısı bozulmamış ana kayanın az ayrışmış kesimini, daha altı ise hiç ayrışmamış taze kesimini oluşturur. Sırasıyla yüzeyden derine "A", "B" ve "C" zonları olarak adlandırılan bu katmanların bileşimi, ayrışma derecesi ve ürünleri, ortamın iklim farklılıklarına, yağışına, nemine ve ayrışan ana kaya türüne göre değişim gösterir.

C zonunun tabanında çakıllar yer alır ve dereceli olarak bozuşmamış olan ana kaya birimine geçiş gösterirler. En altta ve C zonu altında yer alan ayrışmamış ana kayadan oluşan bu zona, "D" zonu denir.



Şekil 3.24. Yerinde ayrışma ile oluşmuş tipik bir Toprak Profili. Nemli iklimlerde oluşan humusça zengin bitkisel topraktan oluşan A Zonu ve altında yer alan diğer B (çekicin bulunduğu zon) ve soldaki şekilde C Ayrışma Zonları ile ana kayayı oluşturan D zonu (*McGeary* vd., 2004).

Pedalfer toprak *(pedalfer),* ılıman ve nemli iklimlere özgü ormanlık alanlarda gelişen Al ve Fe'ce zengin zonal topraklardır (örn. Karadeniz Bölgesi). Bu tür topraklarda A zonu organik madde açısından zengindir. A zonunun korunup yıkanmamasında ve erozyonunun engellenmesinde ormanlık alanlar büyük fayda sağlarlar. Bu tür topraklarda kil ve demiroksitler B horizonunda birikir.

Lateritler *(laterites),* tropikal yani sıcak ve nemli bölge toprakları olup yağış ve sıcaklığın fazla olması nedeniyle çözülme, kimyasal ayrışma ileri derecededir ve A zonunda aşırı yıkanma sonucu silisyum ortadan kaldırılarak Fe ve Al oksitler egemen olmaktadır. Eriyebilen minerallerin yıkanması tamdır. Yağmurla yıkanma sonucu A zonu humusça fakir bir topraktan oluşur. Toprak kalınlığı B zonunda fazla olup demiroksit ve alüminyum bakımından zengin

olduğundan renkleri kızıldır. Yıkanma ile kırmızı-kızıl topraklar (boksit/Al cevheri) 10'larca m derinliğe kadar uzanır. B zonunda oluşan, erozyona oldukça dayanıklı Laterit (=tuğla toprağı), ne kaya gibi sağlam ne de zemin gibi çok dağılgan olduğundan basit yapılarda yapı taşı olarak kullanılmaktadır (örn. *Angadipuram-Hindistan*).

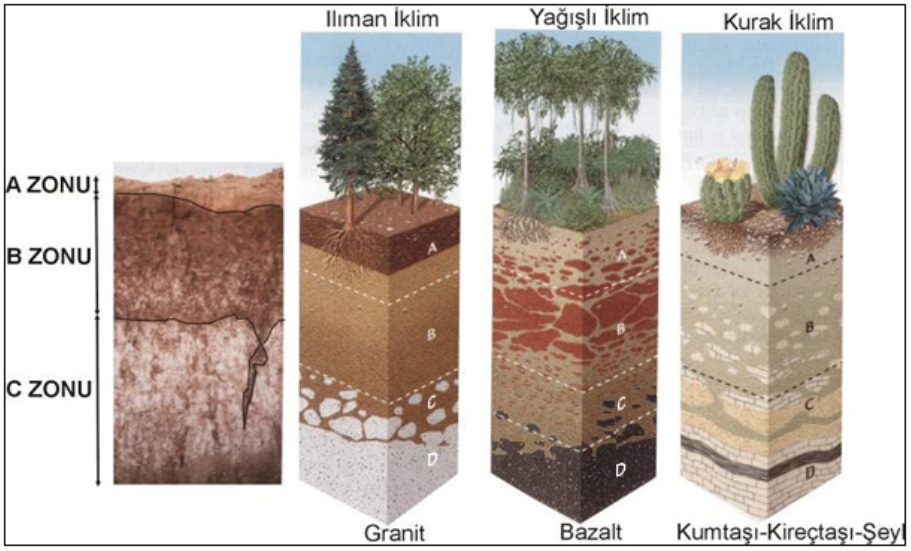
Terra Rosa'lar (=kırmızı toprak, *terra rossa*) genellikle kireçtaşı ve mermerlerin $CaCO_3$'lerinin sular tarafından binlerce yılda eritilip yıkanması sonucu kalıntı olarak bıraktıkları, karbonat içermeyen oksitlenmiş kırmızı-kızıl renkli (Hematit> %5) kil-silt minerallerinden oluşmuş verimsiz, ancak sulama ile verimli hale gelebilen, çoğunlukla Akdeniz İklimi'nde gelişen Akdeniz Bölgesi'ne has topraklardır. Sıcaklığın yüksek ve yağışın yeterli olması, toprağın oksitlenmesini arttırarak kızıllaşmasına neden olmakta ve Terra Rosa'lar oluşmaktadır. Akdeniz Bölgesi sıcak olduğundan organik maddeler çabuk ayrışmakta, bir kısmı yağış suları ile alt zona taşınmaktadır. Bu nedenle Akdeniz Toprakları, Karadeniz Toprakları'na göre humus yönünden zengin değildirler.

Podzol toprak *(podsol),* iğne yapraklı orman örtüsü altında çok ince bir bitkisel toprağın altında kumtaşı, granit veya kuvarsça zengin kilce fakir kayaçların ayrışmasıyla oluşan, fazla yıkandığından madensel tuzlar yönünden fakir, verimsiz asidik soğuk ve nemli bölge topraklarıdır. Bu toprakların gri siyahımsı A zonunda (A horizonu) kil ve organik madde az ve asidik; B zonu açık renkli, demir ve alüminyumca zengin olup oldukça yıkanmıştır. Okyanus ve denizlerden uzak kıtaların iç kesimlerinde görülen Karasal iklim veya Orta Kuşak Karasal İklimi bölgelerinde bu tür topraklar oluşmaktadır. (örn. Kuzey Yarım Küre'de Sibirya, Kuzey/Doğu Avrupa ve Kuzey Amerika, Kanada, İskandinavya ve Türkiye'nin karasal iklimini oluşturan İç Anadolu toprakları).

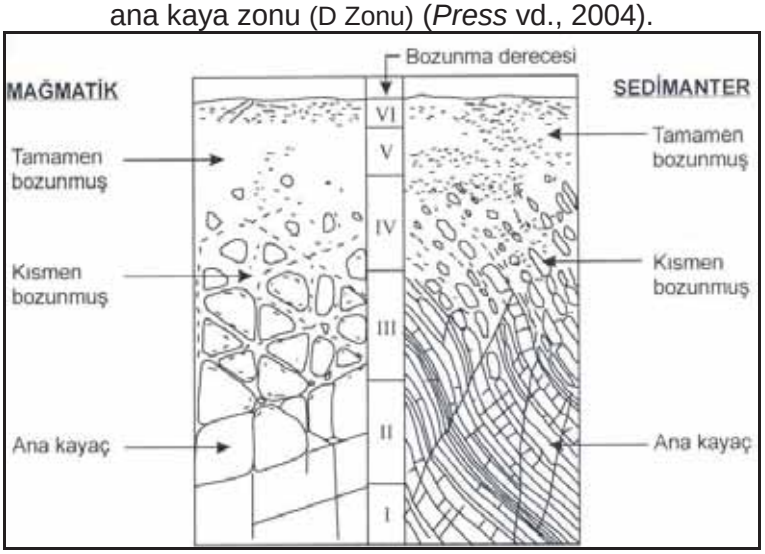
Pedokal *(pedocal),* kurak iklim koşulları (arid ve yarı arid, örn. çöller; kutup bölgeleri, Avustralya vb.) altında gelişmiş bol kalsiyum içeren zonal topraklardır ve üst zonda yıkanma az veya minimumdur (Şekil 3.25). Kimyasal ayrışma daha az etkin olduğundan A zonu açık renklidir: Zemin yüzeyinde A zonunda oluşan renkler, B zonunun bileşimine bağlı olarak beyazdan açık sarımsı pembeye, açık kahverengiden griye kadar değişebilir. Kurak iklim nedeniyle A zonunda yıkanmanın az olmasından dolayı bu tür toprakların tanıtıcı özelliği kalsifikasyon sunmalarıdır ($CaCO_3$ birikimi, A zonundan kaldırılarak B zonunda birikimi).

Kuraklık derecesi arttıkça da A zonu çok incelir, B zonu yüzeye yaklaşır veya tamamen yüzeylenir. Kurak bölgelerde görülen kalker kabuk veya ***kaliş** (=kireç=*kalk*; *caliche)* aslında toprağın B zonunun (kalsifikasyon zonu) yüzeylemiş şeklidir. Bu tür topraklarda A zonu çok incedir. Çok sıcak bölgelerde de buharlaşma sonucu suyun kılcal yol ile hareketiyle de (kapilarite) $CaCO_3$ yüzeye taşınarak kaliş oluşabilmektedir. Kaliş oluşumları; batı USA, batı Avustralya, *Khankar*/Hindistan, Kalahari Çölü/Afrika vb. bölgelerde sıkça görülmektedir. Farklı iklim ve ana kaya türlerindeki ayrışma zonları, bozunma vb. örnekler aşağıdaki Şekil 3.25, 3.26 ve 3.27.A'da verilmektedir.

***[Kaliş:** Zemin yüzeyinde yer alan kil, kum, çakıl gibi tutturulmamış tüm malzemenin, zemin altından yüzeye taşınan $CaCO_3$ ile tutturulmasıyla (çimentolanma) oluşan sedimenter kayaç**]**.



Şekil 3.25. Farklı iklimlerde gelişen ayrışma (bozunma) zonları (A, B, C zonları) ve ayrışmamış ana kaya zonu (D Zonu) (*Press* vd., 2004).



Şekil 3.26. Mağmatik ve sedimender kayaların bulundukları yerlerde, zemin yüzeyinden zemin içine doğru gelişen ayrışma (bozunma) zonları.



Şekil 3.27.A) Ayrışmanın oluşturduğu renk farkı. İstanbul Beşiktaş'ta bir temel kazısında gözlenen ayrışmamış sağlam kaya (grovak) ve onun üzerinde yer alan aynı kayacın kısmen ayrışmış olan bölümü. Sarı kesik çizgilerle gösterilen hat, grovağın sağlam ve kısmen ayrışmış olan bölümleri arasındaki yaklaşık sınırı göstermektedir (22.03.2006).

Türlerine ve ortam şartlarına göre kayalarda gerçekleşen ayrışma miktarlarına bağlı olarak yapılmış olan sınıflama Tablo 3.6.A'da; farklı yazarlar tarafından yapılan sınıflamalar ise Tablo 3.6.B ve 3.7'de verilmektedir. Ayrıca taze iç yüzeyi koyu gri renkli ayrışmamış bir bazalt kayası mostrasından alınan bir el numunesinde (Yuntdağ Volkanitleri, Miyosen; Akyürek ve Soysal, 1981), kimyasal ayrışma sonucu, kaya dış yüzeyine doğru artan bozunma ve bu nedeniyle oluşan ayrışma dereceleri ve renk farklılıkları Şekil 3.27.B'de görülmektedir. Kaya ortamında oluşan ayrışma dereceleri ve derinlikleri yönlere göre farklılık gösterebildiklerinden, yeraltının gerçeğe en yakın, daha hızlı ve daha ekonomik olarak belirlenip tanımlanabilmesi için, incelenen alanda zemin etüt sondaj sayısını aşırı arttırmak yerine, ayrışma dereceleri ve derinlikleri üç boyutlu olarak "elektriksel özdirenç tomoğrafisi yöntemi" ile belirlenebilmekte, zemin etüt sondajından elde edilen numunelerin arazi ve laboratuar verileri yardımıyla da belirlenen ayrışma dereceleri mukayese (kıyaslama) edilebilmektedir. Geoteknik *(geotechnical)* uygulamalar açısından ayrışmaya uğramış kayaların, ayrışmamış ve ayrışmaya uğramış kesimlerinin mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi önemlidir. Ayrıca ayrışma ürünleri ve ayrışma nedeniyle gevşemiş malzemenin erozyon sebebi ile kolay aşınıp taşınması ile oluşmuş yamaç molozu, birikinti konileri ve alüvyon yelpazeleri gibi jeolojik ortamlar; oturma, göçme, yol şevlerinde (**yapay şev**/*slope*) ve yamaçlarda (**doğal şev**/*hillside*) stabilite sorunlarına yol açabilmektedir.

Tablo 3.6.A) Kayalardaki ayrışma (bozunma) dereceleri ve tanımları.

TANIM	TANIMLAMA ÖLÇÜTÜ	AYRIŞMA DERECESİ
Ayrışmamış-taze kaya	Kayada, atmosferik ayrışmaya ait hiçbir belirti yok.	1A
Belirsiz ayrışmış	Ana süreksizlik yüzeylerinde renk bozulması.	1B
Hafifçe ayrışmış	Kayada ve süreksizlik yüzeylerinde atmosferik ayrışmayı işaret eden renk bozulmaları.	2
Orta derecede ayrışmış	Kayanın yarısından azı, bir zemin oluşturacak şekilde bozuşmuş veya parçalanmış. Taze ve rengi bozulmuş kaya, ya bir arada devamlı ya da parçalı hâlde bulunmakta.	3
Çok ayrışmış	Kayanın yarısından fazlası, bir zemin oluşturacak şekilde bozuşmuş veya parçalanmış. Taze ve rengi bozulmuş kaya, ya bir arada devamlı ya da parçalı hâlde bulunmakta. Kütlenin esas yapısı büyük ölçüde sağlam durumda.	4
Tamamen ayrışmış	Tüm kaya, bir zemin oluşturacak şekilde bozuşmuş veya parçalanmış. Kütlenin esas yapısı kısmen tanınabilir durumda.	5
Rezidüel zemin (= kalıntı, artık, süreç sonunda arta kalan miktar)	Kaya kütlesi, yapısı, dokusu tanınamaz durumda ve tüm kaya tamamen zemine dönüşmüş durumda. Hacimde büyük ölçüde artış gözlenmekte, ancak zemin taşınmamıştır.	6

Tablo 3.6.B) Kayalardaki ayrışma (bozunma) dereceleri ve tanımları (ISRM, 1978).

TANIM	TANIMLAMA ÖLÇÜTÜ	AYRIŞMA DERECESİ
Ayrışmamış-taze kaya	Kayanın ayrıştığına ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla birlikte, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözlenebilir.	W1
Az ayrışmış	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde çok az renk değişimi gözlenir. Ayrışma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiş ve kaya taze hâlinden daha zayıf olabilir.	W2
Orta derecede ayrışmış	Kayanın rengi değişmiştir. Süreksizlikler açık olabilir. Ayrışma kayanın içine nüfuz etmeye başlamıştır. Kaya, fark edilir ölçüde zayıflamıştır. Kaya oranı %50-90 arasında ve sürekli bir kütle veya *****çekirdek taşı hâlindedir.	W3
Çok ayrışmış	Kayada süreksizliklere yakın kesimlerde orijinal doku değişmiş, ayrışma kayanın iç kesimlerini daha fazla etkilemiştir. Kaya oranı % 50'den azdır. Ancak orijinal kaya kütlesinin yapısı hâlen korunmaktadır.	W4
Tamamen ayrışmış (rezidüel zemin)	Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlesinin yapısı ve dokusu tanınamaz hâlde kaybolmuştur. Seyrek olarak küçük ana kaya parçaları bulunabilmektedir. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmakla birlikte zemin taşınmamıştır.	W5

*** Çekirdek taşı** *(core stone)*: Ayrışma ürünü içinde bulunan daha az ayrışmış yuvarlak ve sağlam blok.

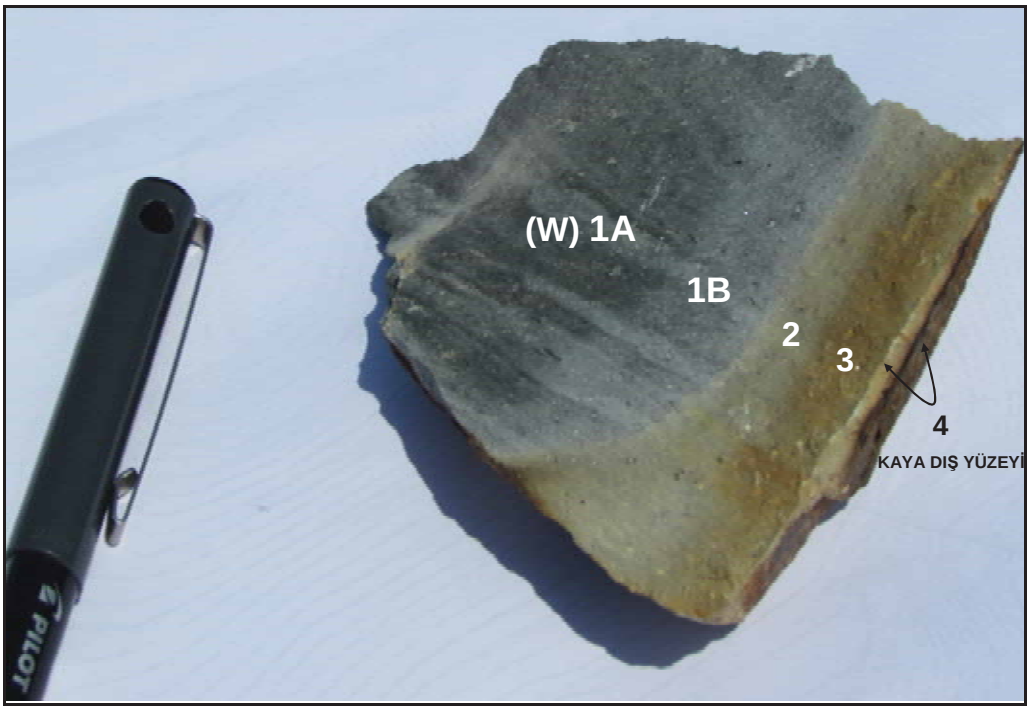
Tablo 3. 7. Ayrışma derecelerinin farklı sınıflandırılmaları (Oteo, 2002).

Şematik profil	Love (1951) & Little (1961)	Vargas (1951)	Sowers (1954, 1963)	Chandler (1969)	Geological Soci. Eng. Group (1970)	Deere & Patton (1971)
	Volkanik kayaçlar	Volkanikler,bazaltlar ve kumtaşları	Volkanik ve metamorfik kayaçlar	Mam ve limolitler	Volkanik kayaçlar	Volkanik ve metamorfik kayaçlar
	VI Zemin	Rezidüel zemin	Üst bölge	V Tamamen ayrışmış	VI Rezidüel zemin	IA Katman
						IB Katman
	V Tamamen ayrışmış	Genç rezidüel zemin	Ara bölge	IV	V Tamamen ayrışmış	IC Katman (saprolit)
	IV Yüksek oranda ayrışma	Ayrışmış zemin tabakaları	Kısmi ayrışmış bölge	III	IV Yüksek oranda ayrışma	IA Saprolit, ayrışmış kaya geçişi
	III Orta ayrışma			II	III Orta ayrışma	
	II Az ayrışma				II Az ayrışma	IB Kısmen ayrışmış
	I Taze kayaç	Taze kayaç	Ayrışmamış kayaç	I Ayrışmamış kayaç	IB Çok az ayrışma	
					IA Taze kayaç	Taze kayaç

Yerinde oluşmuş zemin

Geçiş bölgesi

Kısmen ayrışmış

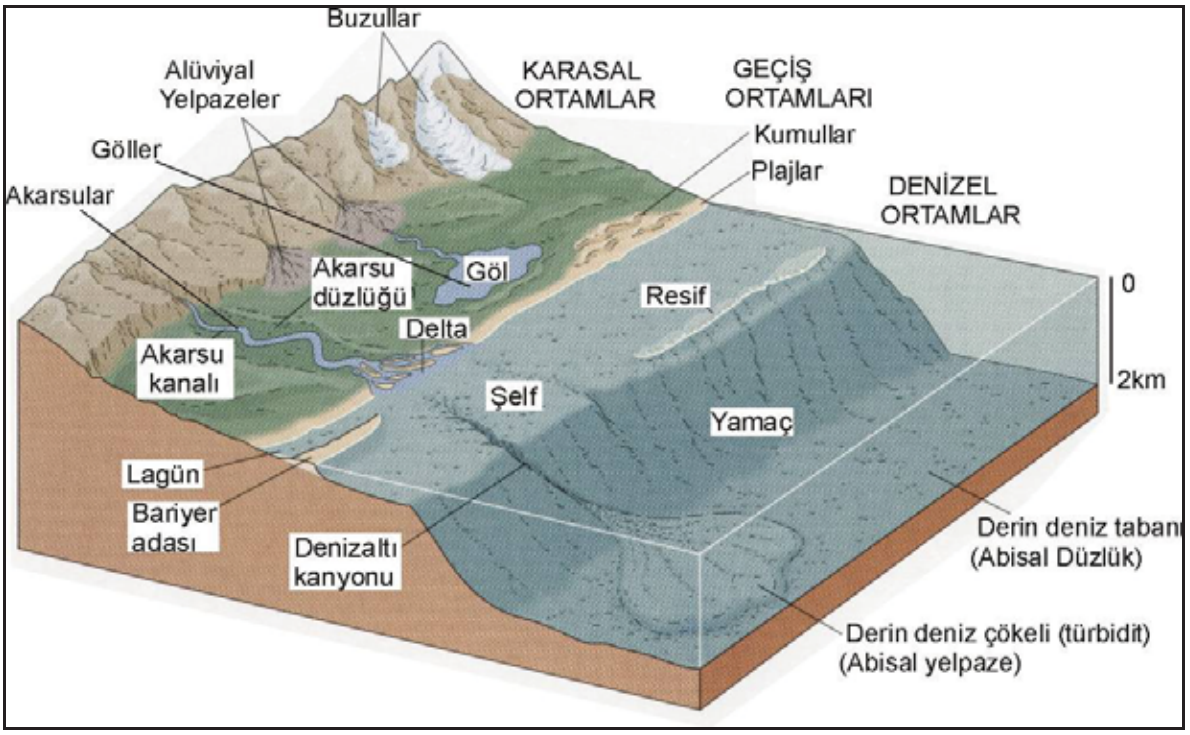


Şekil 3.27.B) Bazalt kayasında kimyasal (oksitlenme), biyolojik ve güneş radyasyonu, gibi etkenler ile oluşmuş ayrışma, dereceleri ve renk solmaları (*discolouring*). Tablo 3.7 ile de karşılaştırılabileceği üzere; burada yeni yol güzergâhı yapım çalışmaları sırasında açılmış şevden yeni koparılan bir kaya parçasında kayanın iç kesiminin taze, ayrışmamış olduğu, kaya dış yüzeyine doğru ayrışmanın arttığı görülmektedir. Bu kesimler; 1A: Taze kaya zonu, 1B: Çok az ayrışmış kaya zonu, 2: Az ayrışmış kaya zonu, 3: Orta ayrışmış kaya zonu, 4: Kayanın dış yüzeyinde, yüksek oranda ayrışmış, oksitlenerek koyu kahverengi renge dönüşmüş, kolay ufalabilen, kayanın birincil yapısı ve dokusunun zor tanınabildiği birkaç mm kalınlığındaki ince ayrışma zonu görülmektedir. Yer: Manisa İli, Gelenbe Kasabası, Sayalar Köyü, rüzgâr türbinleri sahası. Koordinatlar X (kuzey-güney): 4338427.00; Y (doğu-batı): 583128.90 (28.08.2012).

3.6. Sedimentlerin Taşınması ve Sedimenter Ortamlar

Sedimenter ortamlar, kayaç parçalarının ayrışma işlemi sonucu bulundukları ortamlardan akarsu, rüzgâr, buzul gibi taşıyıcı unsurlar tarafından değişik boyutlarda koparılıp, taşınmalarının ardından birikebilecekleri uygun bölgeler olarak tanımlanabilir. Söz konusu ortamlar ana hatları ile karasal ortamlar, kıyı (geçiş) ortamları ve denizel ortamlar olmak üzere üç ana grupta toplanır (Şekil 3.28). **Karasal çökelme ortamları** (akarsu, göl, bataklık, buzul, çöl), deniz düzeyi üzerinde yer alan akarsu ve buzul vâdileri, ovalar ve göller gibi sedimentlerin istiflenebilecekleri, göreceli alçak alanlara verilen genel addır. **Kıyı (geçiş) çökelme ortamları** (kıyı, lagüner, delta), karasal ve denizel ortamlar

arasındaki geçişi sağlayan, bunları birbirinden ayıran ve kabaca kıyı hattı boyunca yer alan sedimenter ortamlardır. Bu tür alanlarda kayaç parçalarının depolanabileceği iki temel ortamın birincisi akarsuların kıyıya kadar getirmiş oldukları sedimentleri yığdıkları **delta ortamları**, ikincisi ise kıyıya ulaşan sedimentlerin dalga etkisi altında istiflendikleri '**plâj ortamları'**dır. Sedimentlerin depolanabilecekleri üçüncü ortam olan **denizel çökelme ortamı** (kıta sahanlığı, kıta yamacı, derin deniz) deniz tabanı morfolojisindeki değişimlere bağlı olarak kıyı-şelf, yamaç önü ve derin deniz havzaları olarak tanımlanan bölgelerden oluşur. Gölsel ve denizel ortamlarda kırıntılı malzeme depolanması dışında kimyasal ve organik kökenli sediment depolanması da gerçekleşir.



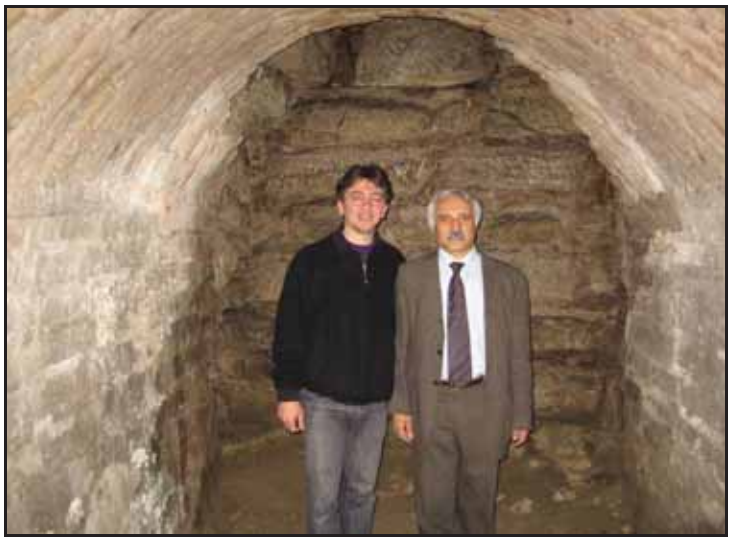
Şekil 3.28. Sedimenter (çökel, tortul) ortamlar (*McGeary* vd., 2004).

3.7. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:

3.7.1. Yavuz Sultan Selim Câmii Galerisi Örneği:

İstanbul ve civarında çoğu câmi duvar ve minarelerinde Bakırköy Kireçtaşı veya Küfeki Taşı olarak adlandırılan boşluklu ve bol kavkılı, kalkerler kullanılmıştır. Yavuz Sultan Selim Câmii'nde de kullanılan bu beyazımsı krem renkli kireçtaşları, içerdikleri kil ile boşluk oluşturan ve lifli yapı özelliği veren fosil kavkı ve kavkı kırıntıları nedeni ile kolay işlenebilir

doğal bir kompozit malzeme özelliğini taşımaktadır. Örn. “3.7.1.A”da 24.02.2006 tarihinde Yavuz Sultan Selim Câmii’nin galerisinden çekilmiş fotoğrafta, tuğla ile örülmüş kemer tavanı, cemaatin namaz kıldığı yerin yaklaşık 60 cm altından itibaren başlamaktadır. Galeri, namaz kılınan yerden açılan bir kapak ile kuzey yöne aşağı doğru bir taş merdivenden inildikten sonra önce doğuya sonra Kıble’ye doğru yataya yakın doğrultuda uzanarak câmi güney dış kenar duvarıyla son bulmaktadır. Mihrap’ın hemen altına rastlayan kesimde çekilen fotoğrafta galeri, arka tarafta ve temele kadar örülmüş câmi dış duvarı ile son bulmaktadır. Câmi dış duvarını oluşturan ve taş ocaklarından alınarak biçimlendirilmiş iri kesme taşlar, doğal fosilli kireçtaşlarından (Bakırköy Formasyonu Küfeki Taşları), oluşmaktadır. Câmi’de harç olarak Horasan Harcı kullanılmıştır (3.7.1.B).



3.7.1.A) *Yavuz Sultan Selim Câmii’nin altında yer alan galeri (24.02 2006).

*[Yavuz Sultan Selim Câmii; Yavuz Sultan Selim Han’ın (I. Selim: 1470-1520) emri ile oğlu Kânunî Sultan Süleyman Han (I. Süleyman veya Muhteşem Süleyman: 1495-1566) tarafından 1522-1529 tarihleri arasında İstanbul’un 7 tepesinden Haliç’e en yakın olan tepede, Fatih İlçesi’nde, bulunduğu semte adını verdiği Yavuz Selim’de Osmanlı baş mimarı ve mühendisi Mimar Sinan’a (Koca Mimar Sinan Ağa: 1490-1588) inşa ettirilmiştir].



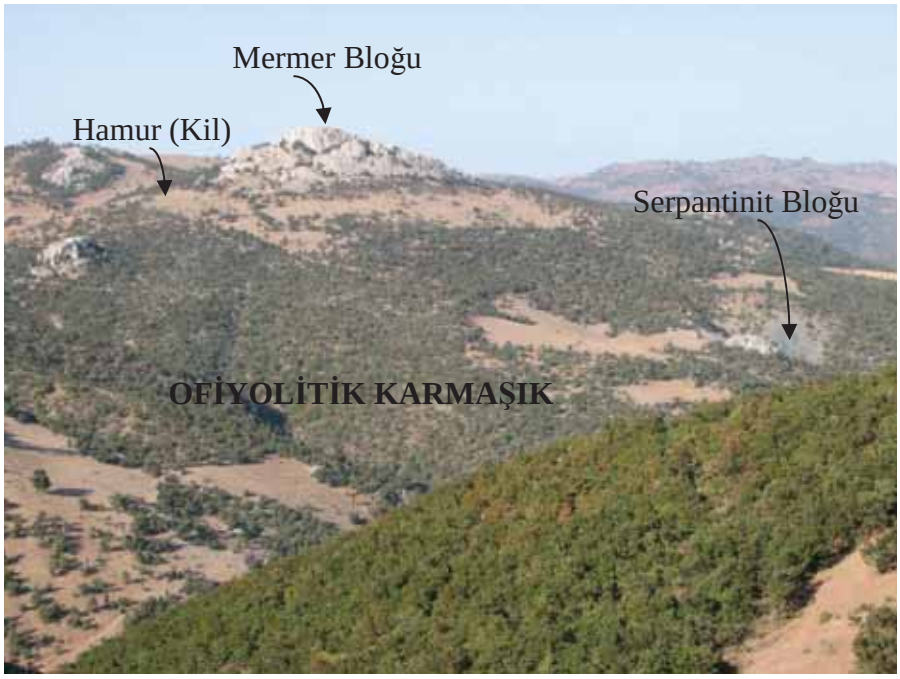
3.7.1.B) Şekil 3.7.1.A’da yer alan Yavuz Sultan Selim Câmii altındaki galeride, yapımda kullanılmış orijinal Horasan Harcı numuneleri (24.02.2006).

3.7.2. Rüzgâr Türbinleri Sahasında Gözlenen Ayrışmaya Örnek Uygulama:

Kaya ortamları; ister mağmatik, ister çökelik, isterse metamorfik kökenli olsun, bu ortamların zemin ortamlarından farkı; soğuma çatlakları, tabakalanma ve yapraklanma gibi düzlemsel ya da ikincil gelişmiş zayıflık zonları olarak tanımlanan süreksizlik (yer değiştirmemiş ya da belirgin bir yer değiştirmeye mâruz kalmamış çatlak düzlemleri) takımlarını içermeleridir. Kayalar, süreksizliklerinde veya zemin yüzeyine yakın kesimlerinin tamamen ayrışması sonucu zemine dönüşmekte ve zemin yüzeyinde kalıntı toprakları oluşturmaktadırlar. Dolayısı ile kaya ortamlarının maddesel ve dokusal özellikleri yanında, ayrışma dereceleri ve içerdikleri süreksizliklerin özellikleri birlikte değerlendirilmelidir. Bu özellikler, ortamın taşıma gücünü *(bearing capacity)*, yamaçlarda ise stabiliteyi *(stability)* belirleyici unsurlardır. Bu unsurların, diğer sanat yapılarında olduğu gibi rüzgâr türbinlerinde de farklı yörelerde, üzerine oturdukları benzer kaya ortamlarında fiziksel, kimyasal ya da biyolojik ayrışma nedeniyle mühendislik parametreleri de geniş bir yelpazede değişkenlik göstermektedir (Karagüzel ve Kılıç 2000; Yıldırım, Akgüner vd., 2010). Bu değişkenlikler, verilerin sayısal ve doğru olarak belirlenmesini de gerekli kılmaktadır. Tüm bu veriler sırasıyla ve doğru uygulanıp, geoteknik etüt, araştırma ve çözümlerle birlikte değerlendirildiğinde, uygulamada en uygun çözümler ortaya çıkacak, inşa edilecek yapılar daha güvenli olacaktır.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.7.2.A-J arası) yer alan fotoğraflarda, farklı bölgelerde yapılan arazi çalışmalarında *(site investigation)* kayalarda görülen ayrışma türlerine örnekler verilmektedir (Yıldırım vd., 2010). Bu şekillerden Şekil 3.7.2.A'da kızılımsı kahverengi siltli kilden oluşan ve çoğun ayrışmış tabiî bir hamur malzemesi içinde gri renkli mermer ve serpantinit, şist lâv blokları yer aldığı tektonik dokanaklı, ezik zonlu ve her türlü kayacın iç içe geçtiği görülen ve çok kısa mesafelerde çok değişken özellik gösteren arazi zemin yapısı, mühendislik problemlerinin en sık görüldüğü alanları oluşturmaktadır. Diğer şekillerde yer alan fotoğraflarda ise rüzgâr türbini çelik kulesini taşıyacak olan türbin temeli oturma alanlarının sağlam kireçtaşı ya da mermerlerden oluşmasına rağmen bu tür birimlerin bazı kesimlerinde irili ufaklı, bazen de büyük mağara boyutlarında karstik boşluk ve ayrışma nedeniyle oluşmuş kızıl

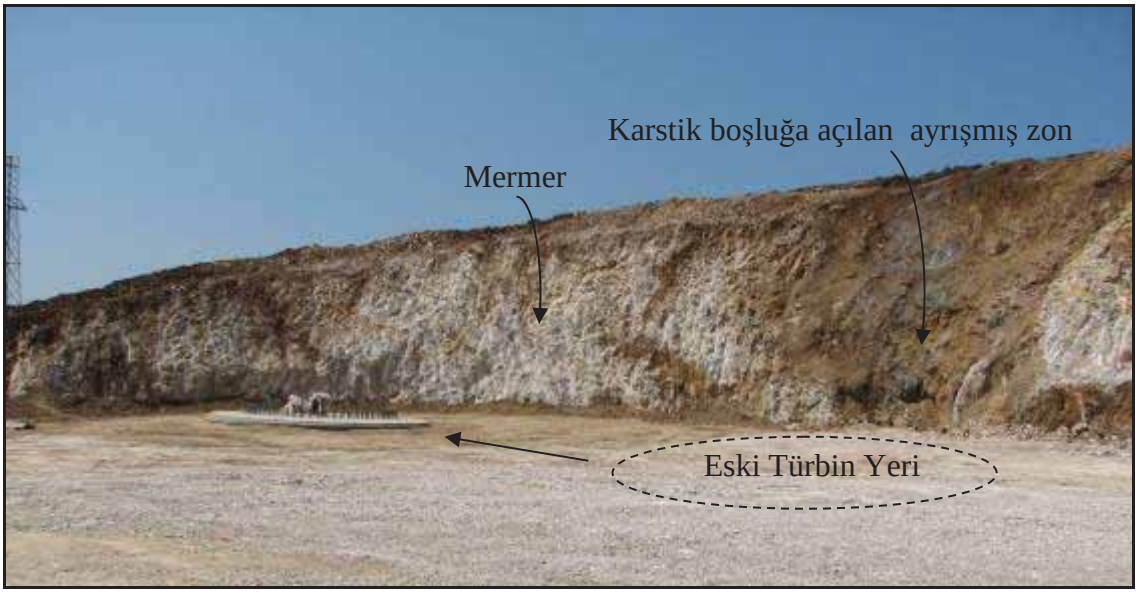
toprakları oluşturması dolayısıyla bu tür yerlerde türbin temel alanı ya iyileştirilerek ya da büyük boşluklara rastlandığında temel yeri değiştirilerek, ayrışmanın oluşmadığı kesimlere oturtulmuştur.



3.7.2.A) Ofiyolitik karmaşık kayaları. Manisa İli, Kırkağaç İlçesi, Gelenbe Kasabası, Sayalar Köyü civarında yüzeylenen Üst Kretase yaşlı ofiyolitik karmaşıktan (**=melanj**) oluşan kayaların görünümü. (Özaydın vd., 2007; 23.08.2007).



3.7.2.B) Ayrık (ayrışmış, bozunmuş) volkanik kayalar. Manisa, Sayalar Köyü bölgesi rüzgâr türbini temeli oturma alanı. Volkanik kayaların (Neojen yaşlı-bazaltik andezit) üst seviyeleri çok ayrışmış kayalardan oluşmakta (23.08. 2007).



3.7.2.C) Terra Rosa (=kırmızı toprak, *Terra-Rossa=red soil*). Balıkesir İli, Susurluk İlçesi, Kel Tepede yer alan Paleozoyik yaşlı dolomitik mermerlerde (=dolomit-mermer) karstik boşluklara açılan ayrışmış kırmızı, kızıl kahverengi killeşmiş zon. Burada, çelik kuleyi taşıyacak olan rüzgâr türbini temeli oturma alanı değiştirilerek, ayrışmanın oluşmadığı kesime oturtulmuştur (Özaydın vd., 2009; 18.04.2009).



3.7.2.D) Rüzgâr türbini temeli. Susurluk İlçesi Kel Tepede toprak ve ayrışmış kesimlerin sıyrılıp, ayrışmamış mermerler üzerine oturtulmuş ve çelik kulesi için hazır duruma getirilmiş 16 m çapında bir rüzgâr türbini temeli (Yıldırım, 2012; 18.04.2009).



3.7.2.E) Susurluk, Kel Tepeyi oluşturan mermerlerde oluşmuş kimyasal ayrışma. Yüzeyde ve çatlaklar boyunca düşeye yakın yönde gelişmiş çatlaklar boyunca kil ve demirli maddeleri içeren mermerlerin ayrışmasıyla karbonat içermeyen artık minerallerden oluşmuş kırmızı, kızıl-kahverengi topraklar olarak adlandırılan Terra Rosa *(Terra Rossa)* ile ayrışma yüzeylerinin alt kotlara doğru uzanan birleşim yerlerinde görülen karstik boşluk (18.04.2009).



3.7.2.F) Karstik boşluk. Susurluk, Kel Tepede dolomit-mermerlerde şev düzenleme çalışmalarında kimyasal ayrışma sonucu oluşmuş kahverengi killerin altında ve devamında rastlanılan suların erittiği karstik boşluklardan biri (İstanbul Mühendislik, 2009; 14.02.2009).



3.7.2.G) Mermerlerde karstik boşluklarda görülen ayrışma ve karbonatlaşma (14.02.2009).



3.7.2.H) Çatlaklar boyunca gelişmiş aşırı ayrışma. Manisa İli, Kırkağaç İlçesi, Kuyucak Mvk. kireçtaşlarında 'Mesozoyik-Jura' temel kazısı yamaçlarında çatlaklar boyunca ayrışma ile oluşmuş kalıntılar *'Terra-Rosa'* ve karstik yapılar (Özaydın ve Yıldırım, 2010; 10.02.2010).



3.7.2.İ) Dolin. Manisa, Soma-Bozarmut Köyü, Dededağ Mevkiide; 'Jura' yaşlı dolomitik kireçtaşları ortasında çatlaklar boyunca kimyasal ayrışma ile çevreye doğru genişleyerek oluşmuş ve yüzeyi kırmızı, kızıl renkli killer -*Terra-Rossa*- ile kaplı, karstik su kaynaklarını besleyen bir dolin (karstik çukur) ve üzerinde yağmurlu mevsimlerde oluşan geçici göl alanı (07.02.2009).



3.7.2.J) Rüzgâr Türbinleri. Manisa, Dededağ-Yumruçalı Mevkiide temelleri, ayrışmamış ve karstik boşluk içermeyen sağlam kireçtaşları üzerine oturtulan rüzgâr türbinleri (Özaydın vd., 2009; 30.05.2009).

3. Bölümün Özeti

Mineral toplulukları olarak tanımlanan kayaçlar, oluşum şartlarına ve kökenlerine göre mağmatik, metamorfik ve sedimenter kayaçlar olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Mantodan yüzeye doğru ilerleyerek kabuk içerisindeki değişik derinliklerde veya yüzeye kadar ulaşarak soğuyan ergiyikler, mağmatik kayaçları oluşturur. Bu ergiyikler soğudukları derinliklere göre; derinlik, yarı derinlik ve volkanik kayaçlarını meydana getirirler. Mağmatik kayaçların dokusu ve rengi gibi fiziksel özellikleri de, soğudukları derinliğe ve kimyasal bileşimlerine göre değişir. Yavaş soğuma ile derinlik kayaçları genel olarak iri, soğuma hızının artışına bağlı olarak yüzey kayaçları ince taneli; hızlı soğuma ile obsidiyen gibi kayaçlar camsı doku özellikleri gösterirler. Volkanlardan, şiddetli bir püskürme sonucu havaya fırlatılan çok ince taneli lâv parçacıkları ve toz+kil boyutundaki zerreciklerden oluşan kırıntılı volkanik malzemeler, havada kızgın bir kül bulutu hâlinde iken soğuma sonucu yoğunlaşıp çok geniş alanlara çökelip katılaşarak tüf adı verilen volkanik malzemeyi oluştururlar. Lâvların volkandan çok yüksek sıcaklık ve basınç altında yüzeye ve havaya püskürtülmesi ve aynı anda hemen soğumaları, suyun ve karbondioksitin çözünürlülüğü azalarak soğuyan malzeme içinde kalıp kaçamayarak, bol boşluk oluşturması ile de sünger taşları oluşurlar. Vâdi yamaçları boyunca, soğuyarak sertleşmiş lâv katmanları, volkan bombası adı verilen soğumuş iri lâv blokları ya da lâvların soğumasıyla oluşmuş değişik yönde çatlaklı düzlemler içeren bazalt gibi şapka görevi gören kaya parçalarının, yanlarında yer alan yumuşak tüf katmanlarının yağmur, rüzgâr gibi etkenlerle daha kolay aşınarak; altlarında aşınmadan korudukları yumuşak tüflerle birlikte oluşturdukları kalıntı koni biçimli yapılar, peri bacaları olarak adlandırılırlar. Mağmatik kayaçlar, ayrışmamış ve sağlam kaya olmaları kaydıyla gerek binalar, gerekse barajlar için çoğunlukla iyi bir temel zemini oluştururlar. Yüksek dayanımlı beton imalâtında granit ve özellikle bazalt gibi sert mağmatik kökenli agregalar kullanılmaktadır. Mağmatik kayaçların çatlaksız, som yapılı ve ayrışmamış granit, siyenit, gabro gibi derinlik kayaları ile bazalt, diyabaz, riyolit, trakit gibi volkanik kökenli yüzey kayaları, yapılarda taşıyıcı sütun olarak bina temellerinde, dış duvar, döşeme, merdiven, mutfak tezgâhı kaplamalarında, taş oymacılığı ve çok sürtünmeye mâruz kalan

dalgakıranlarda, rıhtım duvarları, yollarda ve bordür taşları olarak kullanılırlar. Mağmatik kayaçların yüzey kayaçlarını oluşturan volkanik kayaçlardan tüfler; inşaat sektöründe hafif tuğla yapımında; sünger taşları (pomza taşı) inşaat sektöründe hafif beton blok üretiminde, ısı yalıtımında, aşındırıcı özelliğinden dolayı abrazif sanayiinde, yüksek su depolama kapasitesi nedeniyle tarımda, su arıtma malzemesi olarak ve boya, kimya, cam, mobilya, elektronik sanayiilerinde, seramikte vb. kullanılmaktadır.

Metamorfik kayaçlar, daha önce var olan kayaçların yeryüzeyi derinliklerinde yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında, katı hâlde başkalaşım göstermiş hâlleridir. Farklı türden kayaçların, değişik derecede metamorfizmaya uğramaları sonucu farklı tür metamorfik kayaçlar oluşur. Kayaçların, yer kabuğu derinliklerinde ısı ve basınç artışı sonucu, değişik fiziksel ve kimyasal şartlar altında uğradıkları katı hâldeki mineralojik ve yapısal değişikliğe metamorfizma, metamorfizmaya uğrayan kayaçlara da metamorfik kayaçlar denir. Metamorfik kayaçların çoğunda görülen en belirgin özellik, metamorfizmanın derecesine bağlı olarak gelişen yapraklanma oluşturmalarıdır. Bu tür kayaçların çoğu, birbirlerine paralel düzlemler boyunca, kolaylıkla yaprak-yaprak ayrılma ve bölünme gösterirler. Bu tür metamorfik kayalara sleyt, fillat, şist, gnays gibi kayalar örnek olarak gösterilebilir. Metamorfik kayaçlar; metamorfizma derecesi, derinlik şartları ve bileşimlerine bağlı olarak som mermer, kuvarsit amfibolit gibi yapraklanma göstermeyen yönlenmesiz kayaçları da oluştururlar. Yönlenme gösteren fillat, şist, gibi yapraklanmaları belirgin kayalar, ne granüler malzeme, ne beton malzemesi ne de demiryollarında traverslerin altına balast malzemesi veya rıhtımlarda dalga kıran olarak kullanılabilirler. Kullanılamamalarının nedeni ise sık gelişmiş yapraklanma düzlemlerinin her birinin zayıflık zonu oluşturması ve metamorfizma sonucu yapraklanma düzlemleri arasında ilâve gelişmiş ve şişebilen kil minerallerini içermeleridir. Bu tür kayaçların dayanımları yapraklanma düzlemleri boyunca hem düşüktür hem de bu düzlemler boyunca oluşmuş ikincil kil minerallerinin su ile temasları hâlinde süreksizlik düzlemleri kolayca birbirlerinden ayrılıp dağılma özelliği gösterirler. Metamorfik kayaçlardan mermerin en geniş kullanım alanı, inşaat sektörü, güzel sanatlar ve dekorasyondur. Sleyt, fillit gibi düzgün yapraklanma gösteren metamorfik kayalar ise yüzeylerde veya çatılarda kaplama taşı olarak kullanılırlar.

Sedimenter kayaçlar; kayaçların aşınıp başka alanlarda (genellikle deniz diplerinde) birikmeleri sonucu oluşan kırıntılı; yaşayan organizmaların kabuklarından oluşan organik; suyun buharlaşması ile ortamdaki kimyasal bileşiklerin yoğun olarak artması sonucu bu bileşiklerin söz konusu ortamda çökelmesi ile oluşan kimyasal kökenli kayaçlar olarak üç ana grupta toplanırlar. Kırıntılı tür sedimenter kayaçların tanımlanmasındaki en dikkate alınan kriter, kayacı oluşturan kırıntıların tane boyudur. Bu kayaçlar tane boyuna göre çimentolanıp taşlaşmış ise çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı; çimentolanmamış veya ayrışmış ise çakıl, kum, silt ve kil olarak tanımlanırlar. Kırıntılı sedimenter kayaçların tanımlanmasındaki bir diğer önemli unsur tanelerin yuvarlaklığı, küreselliği ve uniform veya iyi derecelenmiş olması gibi fiziksel özellikleridir. Geoteknik mühendisliğindeki terminolojiye göre; hemen hemen her çap aralığındaki tanelerin bir arada yer alması ile oluşan zeminler iyi derecelenmiş, aynı çap aralığındaki tanelerin (=dânelerin) bir arada yer alması ile oluşan zeminler uniform, ağırlıklı olarak belirli çap aralıklarındaki tanelerden oluşan ve bazı çap aralıklarındaki tanelerin hiç bulunmadığı veya çok az bulunduğu zeminler kötü derecelenmiş zeminler olarak adlandırılır. Sedimenter kayaçlardan kalkerler yani kireçtaşları, çimentonun ham maddesi olup sönmüş kireç eldesinde, inşaatlarda da temel ve kaplama taşı olarak, kil içermeyenleri ise dayanımlı olmaları nedeniyle agrega malzemesi ve yol yapımında mıcır olarak kullanılırlar. Diğer doğal sedimenter kökenli kayaçlardan olan kumtaşlarından (örn. grovak ve kuvarsit kayalarından), kum-çakıl ve taş eldesinde; kuvars mineralleri yataklarından silis kumu döküm kumu ve cam kumu eldesinde, kil yataklarından ise bentonit, seramik kili, tuğla kili, çimento kili eldesinde ve enerji kaynağı eldesinde de kömürler kullanılmaktadır. Gerek sedimenter kayaçların, gerekse mağmatik ve metamorfik kayaçların oluşumlarından sonra yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde atmosfer, güneş ışınları, su etkisi ve canlılar aracılığı ile parçalanma, çözülme ve çürüme şeklinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle kayaların bulundukları yerlerde parçalanarak uğradıkları değişimlere, ayrışma denir. Kayalar üzerindeki ayrışma (bozunma) işlemi; fiziksel ayrışma, kimyasal ayrışma ve biyolojik ayrışma olmak üzere üç şekilde gerçekleşmektedir. Kayalar üzerinde suyun mekanik etkisi ile donma-çözülme, basınç, ıslanma kuruma veya anî sıcaklık değişimi, yağmur, rüzgâr ve

tektonizma gibi olaylar sonucu, kayaların herhangi bir kimyasal reaksiyona uğramadan ufalanarak küçük parçacıklara ayrılmasına fiziksel ayrışma denir.

Kimyasal ayrışma (bozunma), kayaları oluşturan minerallerin kimyasal olaylar sonucunda bozunarak ikincil minerallere dönüşüp, iç yapılarındaki değişime neden olan süreçler topluluğudur. Buna kimyasal alterasyon da denilmektedir. Kimyasal ayrışmada; fiziksel ayrışmanın tersine, ayrışan malzemelerin bileşimi değişmektedir. Başta oksijen olmak üzere atmosferdeki gazlar, su ve asitler kimyasal ayrışmaya neden olan en önemli etkenlerdir. Oksidasyon, redüksiyon, hidratasyon, karbonatlaşma, çözünme (erime), hidroliz, çözelti oluşumu, katyon değişimi, kimyasal ayrışma süreçleridir. İçlerinde kil ve kuvars mineralleri içeren kireçtaşlarının kimyasal ayrışmaya uğrayıp erimesi ile arta kalan karbonat kırıntıları içermeyen kil, kuvars ve diğer erimeyen minerallerin tortular hâlinde yüzeyde, çatlaklar içinde, erime boşluklarında ve süreksizlikler içinde birikmesiyle artık kırmızı topraklar (terra rosa, t*erra-rossa*) oluşur. Kimyasal ayrışmanın hızı; iklim bölgelerine ve kayacın cinsine göre değişmektedir. Ilıman ve yağışlı bölgelerde ayrışma hızlı; kuru, sıcak ve çok soğuk iklim bölgelerinde ise daha yavaş oluşur. Sıcaklığın yüksek, yağışın bol ve buharlaşma hızının düşük olduğu tropik iklime sahip bölgelerde kimyasal ayrışma daha hızlı gelişmektedir. Ancak ister sıcak isterse soğuk iklim bölgeleri olsun, kurak ortamlarda kimyasal ayrışma en az düzeydedir. Tropik bölgelerde ayrışmanın etkisi onlarca metre derinliğe ulaşırken, kurak bölgelerde ve kutuplarda görülen kimyasal ayrışma zemin yüzeyinden, ancak birkaç cm ya da birkaç m derinliğe kadar ulaşır. Kimyasal ayrışma; sürekli olarak donmuş hâlde bulunan yörelerde gelişmez.

Biyolojik ayrışma; kayalar üzerinde organizmalar tarafından oluşturulan ayrışma işlemidir. Bu işlem sonucu diyajenez (=taşlaşma) geçirmiş olan sedimenter kayalar ile mağmatik ve metamorfik kökenli sağlam kayaların fiziksel ve kimyasal ayrışmanın da etkisiyle, zemin yüzeyinde ayrışma ürünü toprak oluşumu meydana gelir. Ayrışma işlemi sonucu kayalar dereceli olarak zemine dönüşür ve en üstte kimyasal ve biyolojik ayrışmanın etken olduğu kesimlerde toprakları meydana getirirler. Yerinde ayrışmış zeminler, günümüz döneminde zamanla akarsu, nehir, rüzgâr gibi taşıyıcı unsurlar yardımıyla erozyona uğrayıp sürüklenerek, farklı alanlara taşınmış iseler bu tür zeminler taşınmış zeminler olarak adlandırılırlar.

4. BÖLÜM: TABAKALI KAYAÇLARIN ÖZELLİKLERİ, STRATİGRAFİ, FAYLAR, TOPOĞRAFİK-JEOLOJİK HARİTA ve KESİTLER

4.1. Giriş

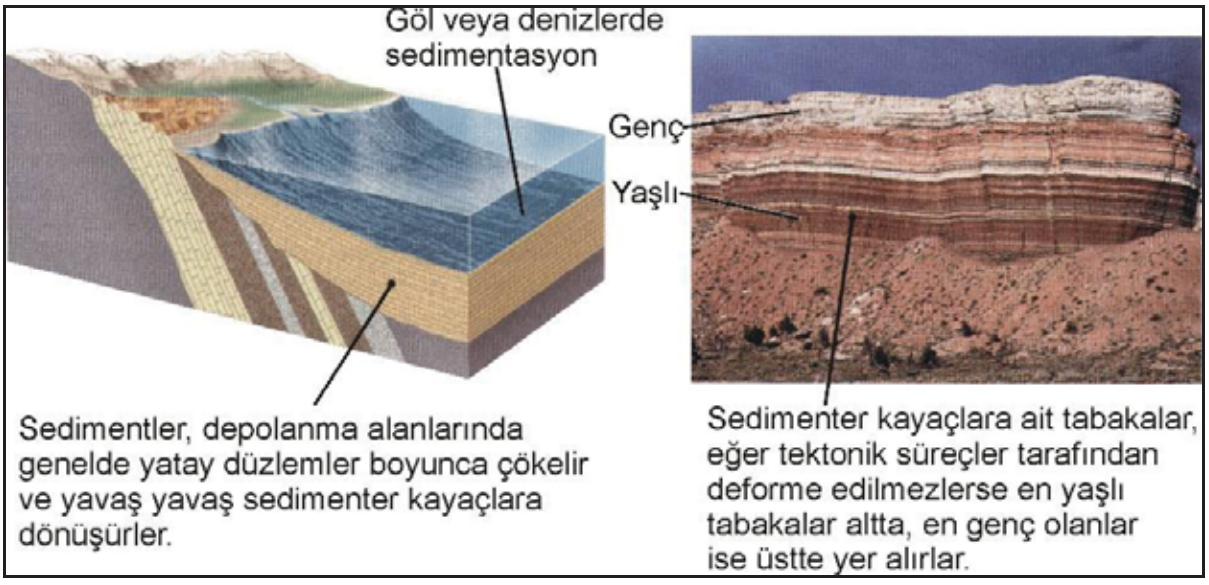
Bu bölümde, sedimenter kayaçların oluşumları sırasında kazanmış oldukları tabakalı yapıların özellikleri, kıvrımlar, çatlaklar, faylar ve çeşitleri birlikte ele alınacak ve kayaçlardaki tabakalanmaya ait tüm özelliklerin yanında zemin kesitlerinde, mühendislik çalışmalarında dikkate alınması gerekli stratigrafi kavramı ve bölümleri tanımlanıp, anlam ve önemi örnek şekillerle açıklanacaktır. Bu bölümün son konusunu ise inşaat ve harita mühendisliği çalışma ve uygulamalarında sıkça karşılaşılan kavramlar yanında, topoğrafik-jeolojik haritalardan kesit *(cross-section)* alınması oluşturmaktadır. Bölümün sonunda da "jeoloji haritası ve kesiti", "jeolojik kesitte stratigrafik dizilimin değerlendirilmesi" ile "İstanbul'un jeolojisi, güncellenmiş jeoloji haritası, stratigrafisi ve Tersiyer çökellerinin tipik geoteknik parametreleri" adı altında, derin zemin etüt sondajı ve değerlendirilmesini de içeren mühendislere örnek teşkil edecek uygulamalı çalışmalar; "Örnek, Uygulama ve Yorumlar" kısmında yer almaktadır.

4.2. Tabakalanma

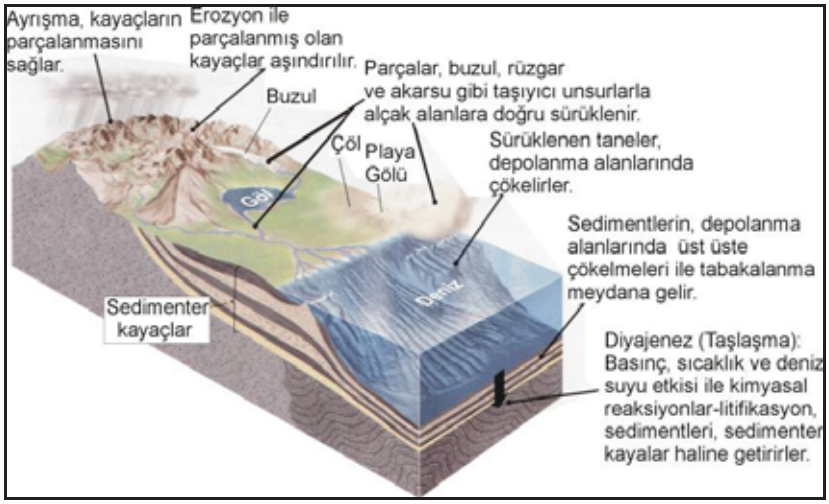
Sedimenter kayaçların, oluşumları sırasında sahip oldukları en önemli süreksizlik türünü tabakalanma arası yüzeyler oluşturur. Herhangi bir çökelme havzasında çökel kayaçların, tanelerin tabiî şartlar altında, tane büyüklüğü, renk ve sertlik bakımından birbirinden farklı yataklar hâlinde depolanma havzası yüzeyine paralel olarak üstü üste istiflenmesine **tabakalanma** (stratifikasyon) denir. Tabakalanma, çökelme ortamı yüzeyine paralel bir şekilde

çökelmenin geçici duraklamasıyla ve kayaçları bölen düzlemlerle oluşmuş bir yapı gösterirler. İki komşu tabaka arasındaki sınır düzlemine **tabakalanma düzlemi** (stratifikasyon düzlemi) adı verilir ve kayma oluşturmamış bu düzlemler süreksizlik olarak nitelendirilir (Şekil 4.1). Çökelme havzasında, alt ve üstteki litolojik oluşuklardan özel karakterleriyle ve süreksizlik düzlemleri ile ayrılmış olan çökel birikimlerine **tabaka** *(layer, bed, stratum*; Şekil 4.2, 4.3.A) adı verilir. Diğer bir ifâde ile tabaka; sabit hidrodinamik koşullar altında çökelmiş, kendine has özellikleri olan ve genellikle 1 cm'den daha kalın, en küçük litostratigrafi birimidir. Tabakalanma, sedimenter kayaçlarda sedimentasyonun geçici olarak duraklamasından meydana gelmektedir.

Tabaka kalınlığı, gelen malzemenin miktarına, çökelme ortamı şartlarına ve iklime göre değişmektedir. Tabakaların kalınlıkları birkaç metre ilâ birkaç cm arasında değişir ve genel olarak ortalama 1 cm'den daha ince olan tabakalara **lamina** *(lamina)* denir (Şekil 4.3.B; Tablo 4.1). Laminalanma *(lamination; laminated structure)* genellikle ince taneli (silt ve kil boyutu; *fine-grained*) şeyl türü çökelik kayalarda daha çok görülür. Mağmatik kayaçlarda ise yüzey kayaçlarının oluşturduğu lâv akıntılarında, lâvların birbirleri üzerine akması ile meydana gelen tabakaya benzer akma yapıları gelişebilir.



Şekil 4.1. Depolanma ortamlarında sedimentlere ait yatay tabaka çökelimleri (*Press* vd., 2004).



Şekil 4.2. Sedimenter kayaçların ayrışıp, taşınarak uzun bir jeolojik süreçte tabakalaşmalarına kadar geçen aşamalar (*Press* vd., 2004).



Şekil 4.3.A) Sedimenter kayaçlarda görülen yatay tabakalanmalar ve bir nehirin oluşturduğu aşınma (erozyon) (*Utah*-Amerika; *Boggs,* 2001).

Günümüzden 3.000 yılı aşkın süre öncesinden beri Kızılderili'lerin (Amerika yerlileri) yaşadığı Amerika'da, ABD'nin batı uzantısında Arizona Eyaleti içinde 40 milyon sene önce Kolorado Irmağı oluşmaya başlamıştır. Nehir, 5 milyon sene önce yatağını hızla aşındırmaya başlamış, son birkaç milyon sene içinde ise daha da hızlı aşındırarak bugünkü morfolojik yapıyı oluşturmuştur. Bu aşındırma Kolorada Irmağı, yatağında 1.800 m derinliğe kadar ulaşan kilometrelerce genişlikte ve 450 km uzunluğunda bir kanyon meydana getirmiştir (Büyük Kanyon, *Grand Canyon)*. Fotoğrafta "1 Milyar sene"yi aşkın bir süre önce metamorfik kayalar ve granitler üzerine denizel ortamda çökelmeye başlayan ve ~525 milyon sene önce (Paleozoyik dönemi başlangıcı) ise yeni bir transgresyonla (açısal diskordans) ve Paleozoyik dönemi boyunca denizel çökelimini tektonizmadan korunmuş olarak kesiksiz devam ettirmiş kumtaşı şeyl-kireçtaşı ardalanmalı sedimenter kayaçların, erozyon sonucu oluşmuş yamaçlarında, yatay tabakalı yaşlı çökeller görülmekte.



Şekil 4.3.B) Laminalı stratifikasyon. İstanbul Ayazağada, sedimenter grovak-silttaşı kayalarından (Devoniyen) alınan taş örneği. Örnek taş numunesinde, tabaka kalınlıkları 1 cm'den daha az silttaşı-kuvarsit ardalanmalı '**lamina'lar** görülmekte (05.12.2012).

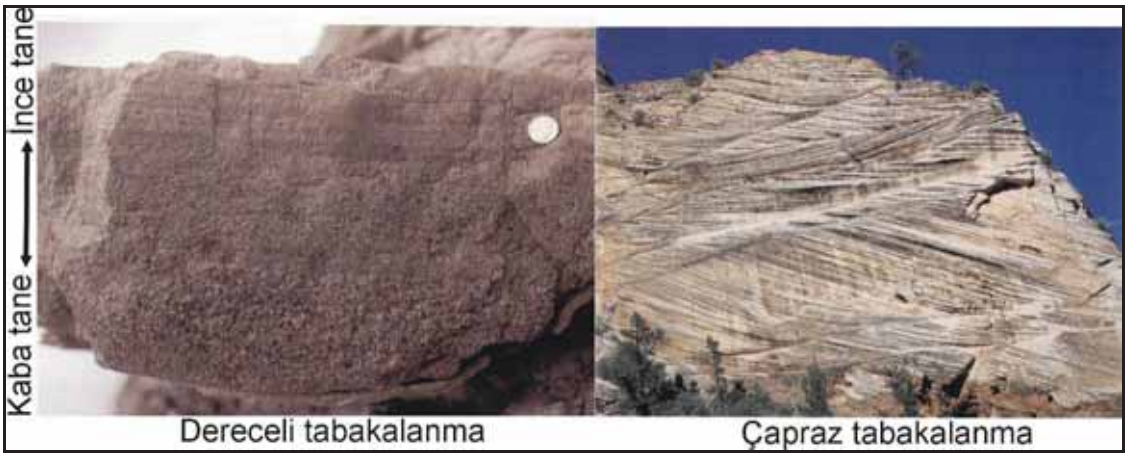
Tablo 4.1. Tabaka kalınlıklarına göre değişik sınıflandırmalar (Tarhan, 2002).

KAYAÇ TANIMI	Tabaka Kalınlığı (cm)	
	Deere (1963)	Londra Müh. Jeo. Gr.
Çok kalın tabakalı	> 300	> 200
Kalın tabakalı	300-100	200-60
Orta tabakalı	100-30	60-20
İnce tabakalı	30-5	20-2
Çok ince tabakalı	< 5	6-2
Laminalı (tortul)	-	2-0.6
İnce laminalı (tortul)	-	< 0.6

Sedimenter kayalarda, tektonik olmayan yani kayacın oluşması sırasında meydana gelen sedimenter primer yapılar da vardır. **Sedimenter primer yapılar: a)** Tabaka içi, **b)** Tabaka üstü yapılar ve **c)** Tabaka altı yapılar olmak üzere gruplandırılırlar.

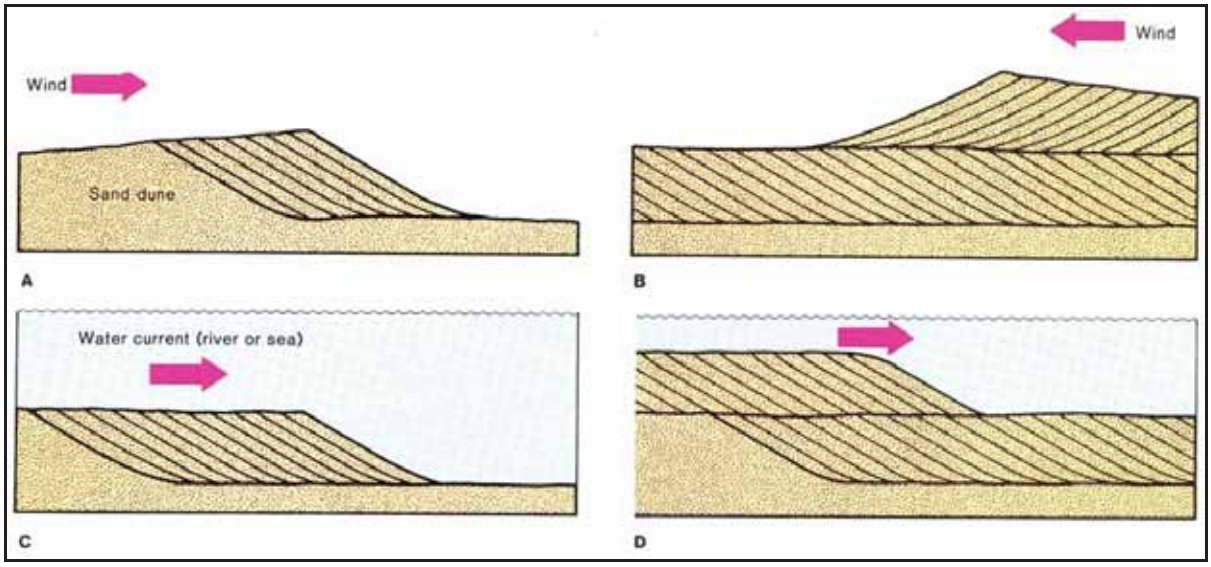
a) Tabaka içi yapılar: Sedimenter kayaçlarda; boylanmış, derecelenmiş ve çapraz tabakalanmalar tabaka içi yapılardandır.

Sedimenter kayaçların en önemli özelliği tabakalanmadır. Depolanma ortamlarının koşullarına ve depolanacak olan malzemenin türüne göre tabakalar farklılıklar gösterir. Tabakalar birbirlerinden bileşim, doku, renk ve sertlik farkları ile ayrılırlar. Tabaka içi yapıları olarak tabakalanmalar; kalınlıklarına göre çok kalın, kalın, orta, ince, çok ince ve lamina olarak gruplandırılır. Diğer tabaka içi yapılar ise boylanma ve çapraz tabakalanmadır (Şekil 4.4). Bunlardan boylanmış tabakalanma; türbiditik akıntılar ile deniz içinde yamacın derinlerine akıp biriken sedimentlerin, bu birikme işlemleri sırasında gelişir. Bu istiflenme sırasında, daha iri ve ağır olan kaba taneler, yamaç aşağıya doğru daha büyük bir hızla akacağından tabana daha çabuk ulaşırlar ve istifin altında yer alırlar. Daha hafif olan ince taneler ise su içerisinde süzülerek tabana ulaşacakları ve iri tanelerden daha sonra çökeleceklerinden dolayı, istifin üzerinde yer alacaklardır. Bunun sonucunda, tabaka içerisinde taneler, hacim ve tane büyüklüklerine göre altta iri taneliden üste daha ince taneliye doğru bir düzen içinde sıralanış göstereceklerdir. Tabaka içerisinde tanelerin, aşağıdan yukarıya doğru, kaba malzemeden inceye doğru istiflenme göstermesine **boylanmış tabakalanma** *(graded bedding)* denir (Şekil 4.4.A). Tabaka içi yapılardan olan derecelenme ise bir sedimentasyon havzasında akıntılarla gelen tanelerin ağırlıklarına göre ve akıntı yönünde olmak üzere sıralanışlarına "jeolojik anlamda" derecelenme denir (örn. akarsu kaynağında daha iri, kaynaktan uzaklaştıkça daha ince malzemelerin sürüklenip birikmesi).



Şekil 4.4.A) Tabaka içi yapılara örnek: Soldaki şekilde dereceli tabakalanma; sağdaki şekilde çapraz tabakalanma görülmekte.
[Sağdaki şekilde kumtaşlarında görülen çapraz tabakalanma, (tabular/düzlemsel/çizgisel, *tabular cross bedding*); eğim yönlerinin yer yer zıtlaşması dolayısıyla sığ sularda oluşmayıp, farklı yönlerde esen rüzgârlarla karalarda çökelerek oluşmuş ve sonradan taşlaşmış olmalıdır].

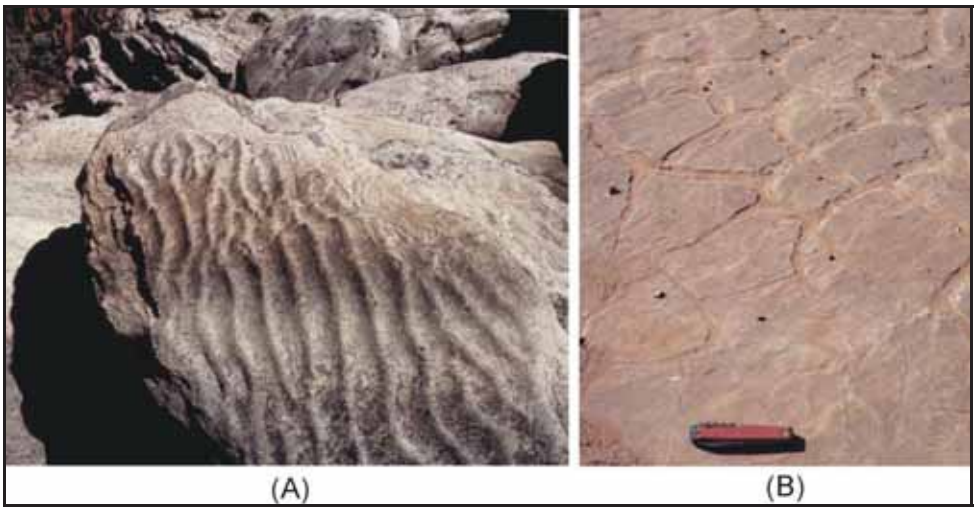
Sedimenter kayaçlarda tabaka içi yapılardan bir diğeri ise akarsu, ve delta ortamları gibi çalkantılı sığ ortamlarda, sedimentlerin birbirinin üzerine, akış yönüne uygun, ancak düzensiz olarak çökelmeleri ile gelişen çapraz tabakalanmadır. Çapraz tabakalanma, çökel istifin eğimine göre tabakaların bir veya birden çok açıda düzenlenme tarzı olup esas tabakalanma düzlemleri arasındaki eğik, çoğu merceksel tabakalardan oluşur. Diğer bir ifâdeyle; tanelerin tabaka içindeki sıralanışları tabakanın alt ve üst yüzeylerine paralel olmayıp, bu yüzeylerle açılar yapacak şekilde ise böyle bir tabakalanmaya **çapraz tabakalanma** *(cross-bedding)* denir. Çapraz tabakalanma paralel tabakalar arasında çapraz olarak (örn. çizgisel/düzlemsel, *tabular*), mercek, kama veya tekne şekillerinde oluşan tipleri vardır. Çapraz tabakalanma, nehir ve sığ deniz *(continental shelf)* diplerinde özellikle yamaçlardaki hareket ve akıntılarla bilhassa kumlu sedimentlerde ya da rüzgârın aynı yönde ya da farklı yönde esmesi sonucu çöl kumullarında meydana gelirler. Çöl gibi rüzgârların egemen olduğu kara ortamlarında oluşan çapraz tabakalanma ise sulardaki akış yönünden farklı olarak rüzgârların değişik yönlerde esmesiyle eğim yönleri farklı açılarda ve zıt yönlerde olmaktadır (Şekil 4.4.A ve Şekil 4.4.B). Durgun sularda ve killerde çapraz tabakalanmaya hemen hemen hiç rastlanılmaz.



Şekil 4.4.B) Çapraz tabakalanma. Üstteki iki şekilde (A ve B) farklı yönlerde esen rüzgârlarla oluşan çapraz tabakalanma, alttaki iki şekilde (C ve D) ise nehir ve sığ deniz diplerinde suyun akım yönüne göre gelişen çapraz tabakalanma görülmekte. “D” ile belirtilen sağ alttaki şekilde aynı anda su akıntılarıyla sığ su tabanlarında iki düzlemde çapraz tabakalanmanın aynı anda birlikte de gelişebileceğini göstermektedir.

b) Tabaka üstü yapılar: Bu tip yapılar henüz çimentolanmamış (sertleşmemiş) tabakaların üst yüzeylerinde oluşurlar. Tabaka üstü yapılar; ripılmarklar (***ripple-mark*), kuruma çatlakları, akarsu sürükleme izleri, deniz dalgalarının henüz taşlaşmamış temel üzerinden sahile doğru giderken bu temeli yıkayarak geride bıraktıkları birtakım çizgi veya tümseklerden oluşan çalkantı izleri *(swash mark)*, çamur kuruma çatlakları, oyuklar, çukurluklar, yivler, yağmur, dolu, tuz kristali, canlı izleri ve çeşitli kalıplardır. Bu yapıların tamamı tabakaların üst yüzeyinde meydana geldiklerinden, tabakaların üst yüzeylerinin tanınmasını sağlarlar. Günümüzde, yeryüzündeki sedimenter kayaçların atmosferle ilişkili olduğu yüzeyleri boyunca gelişen süreçlere ait izler de tabaka üstü yapılardandır (Şekil 4.5).

***[Ripılmark,** *(ripple, ripple-mark)*: Ripılmarklar, sedimenter çökellerde, sığ sularda akıntı ve çalkantı (dalga) etkisiyle su tabanında kumlu siltli zeminlerde görülen ve henüz çimentolanmamış tabakanın üstünde oluşan, dalga formlu, kırışık görünümlü eğri ve birbirlerine paralel gelişmiş tümseklerdir**]**.



Şekil 4.5. Tabaka üstü yapıları. (A) Ripılmark (Ripple-mark; Press vd., 2003'den değiştirilerek), (B) Kuruma çatlakları. Kuruma çatlakları olan tabakalarda çatlakların sivri uçları daima tabakanın alt yüzeyine doğru yönelmiş bulunurlar (*McGeary* vd., 2004).

c) Tabaka altı yapılar: Türbiditik akıntı ve sürüklenmeden doğan izler, genellikle kumlu tabakaların ağırlıkları nedeniyle alt yüzeylerinde yer alan henüz yumuşak olan killi zemin tabakasının üst yüzeyinde tabaka altı yapıları olarak bilinen şekilleri oluştururlar. Sedimentler henüz hamur hâlinde, çimentolanmamış ve killi bir tabaka üzerine çökelmeye devam ederlerken, yerçekimine bağlı olarak ağırlıkları nedeniyle alt tabaka yüzeyinde çukurluklar

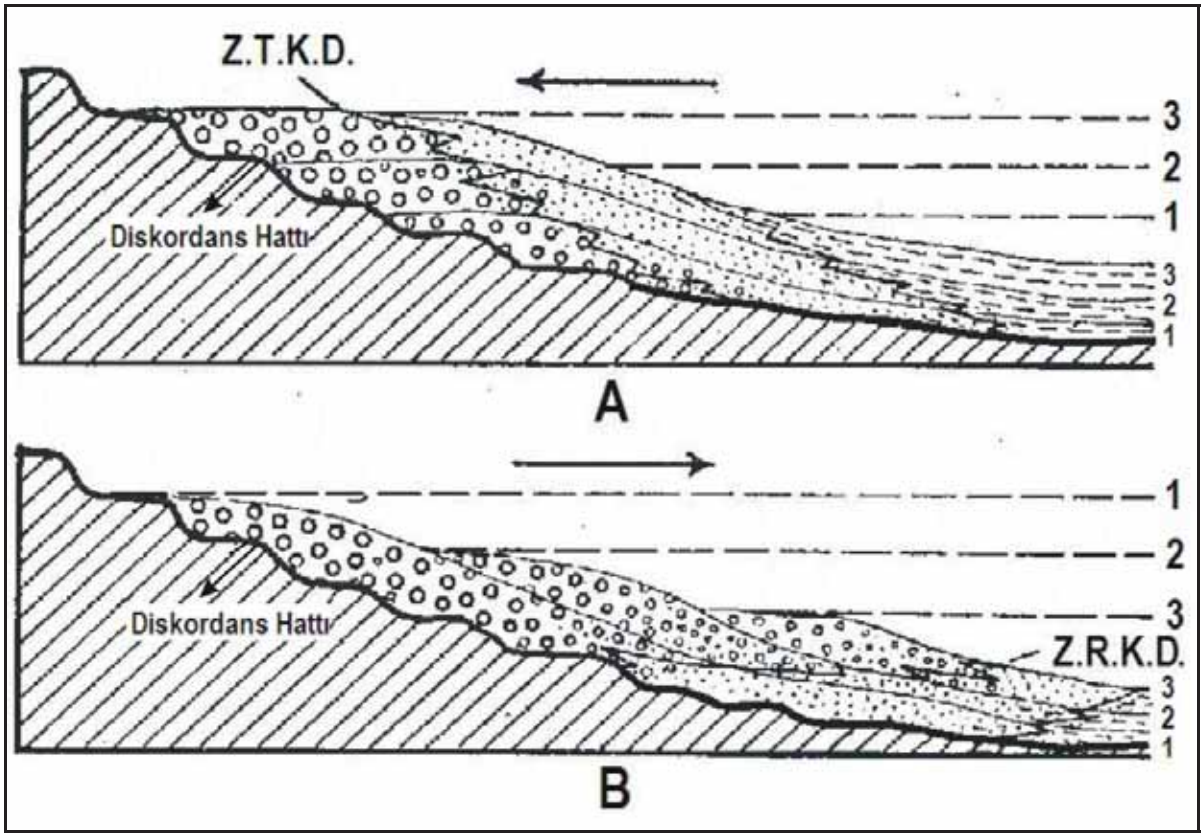
oluştururlar. Oluşturdukları yumrulu girintili çıkıntılı şekillere **çöküntü cepleri**, alt tabakanın üst yüzeyini oluşturan bu çöküntülerde biriktirdikleri yumru biçimli malzemeye de **yük kalıbı** *(load cast)* denir. Yumruların (yük kalıbı) yuvarlak tarafları kumlu tabakanın daima alt yüzeyini; altında yer alan kil tabakasında görülen oyuklar ve çukurluklar ise bu killi tabakanın üst yüzeyini temsil ederler.

Sedimenter kayaçların mağmatik ve metamorfik kayaçlardan ayırt edilebilir ve tanınmalarında ayırt edici en belirgin özelliklerinin başında tabakalanmalı *(bedded)* yapıları gelmektedir. Tabakalar, çökeldikleri ortamda (genellikle deniz dibi) üst üste benzer ya da farklı litolojik özellikleri içeren katmanlar hâlinde çökelirler. Bu çökelimde; az çok birbirine benzeyen ve üst üste gelen tabaka topluluğuna **üye** *(member)*, üst üste gelmiş birbirine benzeyen üyelerin toplanmasından meydana gelmiş litoloji birliğine **formasyon** *(formation)***,** iki veya daha fazla ve üst üste bulunan formasyonlara **grup** *(group)* ismi verilir ve bunların hepsi **kaya stratigrafi birimleri** adı altında tanımlanır.

Bulundukları ortamın koşullarına bağlı olarak aynı boyuttaki kırıntılardan ya da birbirleriyle ardalanan eş boyuttaki aynı cins tanelerden oluşan killi ve kireçli tabakalanmalara **homojen tabakalanma** denir. Burada, her bir tabaka kendi içinde homojen özellik gösterir. Buna karşın kumlu çökellerde, tanelerin büyüklükleri tabaka içinde her tarafta aynı olmadığı gibi tanelerin sıralanışları da muntazam değildir. Bu çeşit tabakalanma **heterojen tabakalanma** olarak adlandırılır.

Sedimentlerin çökelme ortamında, jeolojik dönemler içerisinde herhangi bir değişimin olmadığı durumlarda (örn. denizel ortamın ve çökelimin devam etmesi), söz konusu çökelme sürekli devam eder ve bir zaman boşluğu veya tabakalanmada bir kesinti gözlenmez. Bu tür oluşan istife **uyumlu seri** veya **konkordan** *(concordance)* **seri** adı verilir. İki tabaka grubunu birbirinden ayıran aşınma veya çökelmede kesikliğe uğramış istife ise uyumsuz ya da **diskordan seri**, uyumsuzluğa **diskordans** *(discordance)*, çökelleri iki kısma ayıran kesikliğe uğramış yüzeye **diskordans hattı** adı verilir. Tabaka sınırlarında izlenen bu tür farklılıklar, genelde jeolojik dönemler içerisinde tektonik veya iklimsel şartlardaki değişimlerin, çökelme ortamları üzerinde oluşturduğu etkilerden kaynaklanır.

Denizlerin herhangi bir tesir altında yükselerek karalar üzerine ilerleyip örtmesine **transgresyon** *(transgression)* denir. Kara parçası üzerine ilerleyen denize **transgresif deniz**, bu denizin çökelttiği tabakaya da **transgresif tabaka** adı verilir. Denizin ilerlemesi esnasında oluşan tabaka serisi, en altta iri taneli tabakalar ile başlar ve yukarı doğru tane boyutu dereceli olarak küçülür. Bu kesimde önceden depolanmış malzemeler, daha genç kırıntılı malzemelerle yani sedimentlerle örtülmektedir. Transgresif deniz, daha evvel karalarda mevcut olan her türlü malzemeyi toplayıp aşınmış eski kara düzlemi (**=diskordans düzlemi/hattı**) üzerinde onları yeniden istifler. Transgresyon konglomerası, taban konglomerası veya **taban çakıltaşı** adları verilen ve daha eski çökeller üzerine örten bu ilk çökeltiler içinde, genellikle karalarda yaşayan organizma kalıntıları ve bölgede mevcut olan eski kayaçların çakılları bulunur. Transgresyon olayı devam ettikçe deniz derinleşeceğinden, taban konglomerası üzerine çökelen tabakalar da derinlik artışına bağlı olarak ince taneli olurlar. Böyle bir oluşuğa **transgresif seri** adı verilir (Şekil 4.6).



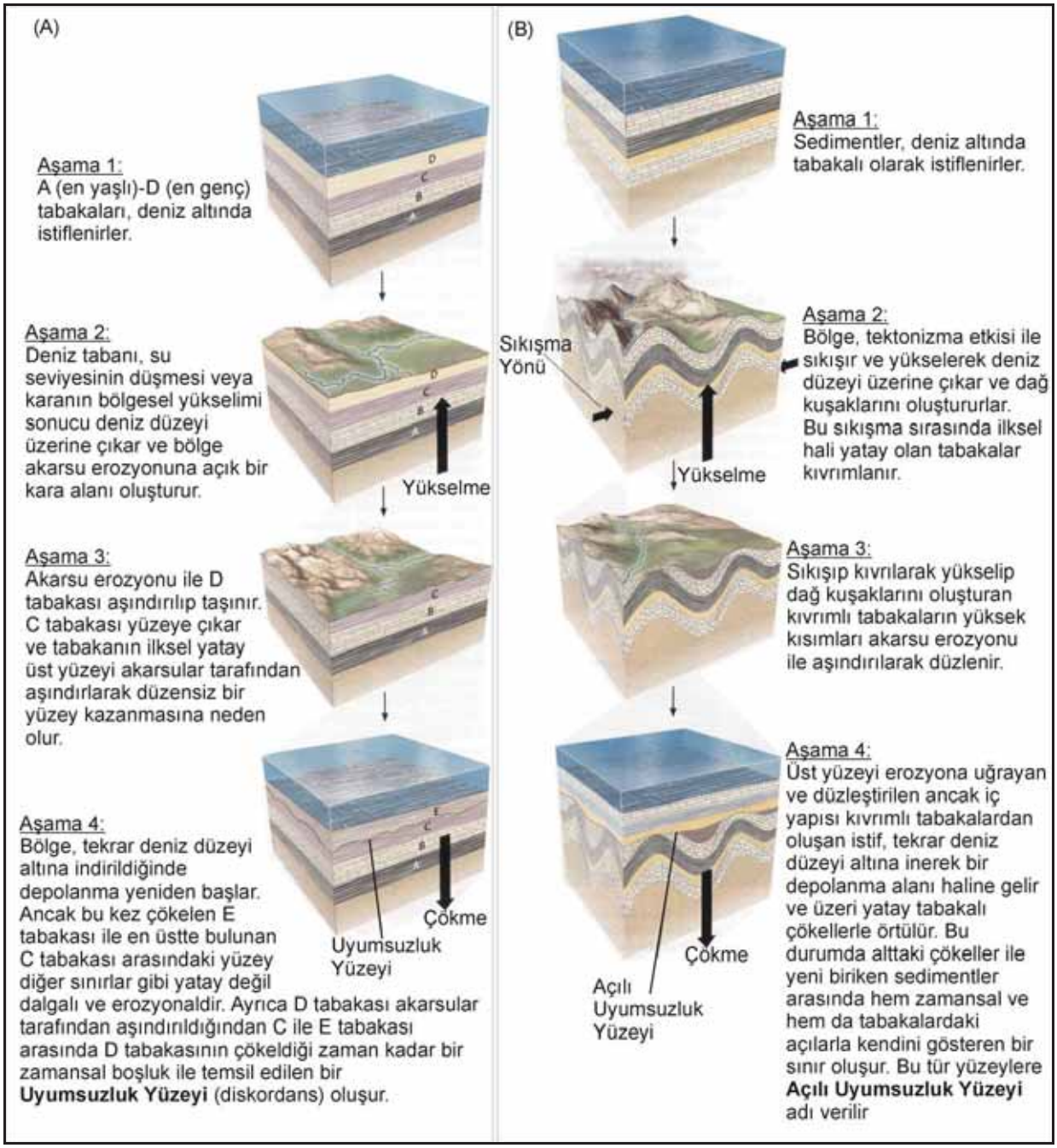
Şekil 4.6. Transgresyon (A) ve Regresyon (B).
A'da: Zaman Transgresif Kayaç Düzlemi (Z.T.K.D.) denize,
B'de: Zaman Regresif Kayaç Düzlemi (Z.R.K.D.) karaya doğru eğimlidir.

Regresyon *(regression)*, denizin herhangi bir tesir altında kalarak karalar üzerinden çekilmesidir. Gerileyen denize **regresif deniz** ve çekilen bu denizin çökelttiği tabakaya da **regresif tabaka** adı verilir. Denizin çekilmesi (gerilemesi) esnasında oluşan tabaka serisi, en altta ince taneli tabakalarla başlar ve yukarı doğru tane boyutları büyüyerek devam eder. Burada sığ deniz, göl veya karasal depolanmalar bahis konusu olur. Regresyon devam ettikçe deniz sığlaşacağından çökelen oluşuklar da doku bakımından bazı özellikler gösterir ki, böyle bir formasyona da **regresif seri** adı verilir. Yani, regresif seride transgresif serinin tersine, kil, silt gibi ince taneli kırıntılardan oluşan tabakalar altta, üste doğru kumlu tabakalar, en üst seviyesinde ise çakıllardan oluşan bir dizilim vardır (Şekil 4.6).

Diskordans düzlemi oluşumu Şekil 4.7'de de gösterildiği gibi daha önce denizel depolanma alanı olan bir bölge, farklı jeolojik zamanlar içerisinde karadaki yükselmeden veya deniz düzeyindeki çekilmeden dolayı kara hâline gelerek bir aşınma alanı oluşturabilir. Bu durumda daha önce bu alana depolanan sedimentler, bu kez akarsular tarafından aşındırılarak başka depolanma alanlarına taşınacaklardır (Şekil 4.7.A, Aşama: 1,2,3). Tektonizmadan korunmuş, daha önce çökelmiş ve yatay tabaka konumlarını koruyan aşınan bölge tekrar alçalıp deniz istila ettiğinde, üzerlerini yeni çökeller yine yatay olarak örtecektir. Yani, eski ile yeni çökeller arasında geçen sürede zamansal olarak bir boşluk oluşacak, ancak çökeller birbirlerine paralel dizilimli ve altta yer alan çökellere ait aşınan düzlem ise erozyonal aşınma nedeniyle dalgalı ve pürüzlü olacaktır. Bu düzleme **açısız diskordans hattı** denmektedir. (Şekil 4.7.A - Aşama 4).

Daha önce karada bir aşınım alanı olarak gelişen bölge, yine jeolojik dönemler içerisinde tektonizma etkisi ile sıkışıp kıvrımlanıp yükselerek dağ kuşaklarını oluşturacaktır. Sıkışma ile tabakalar ilk yatay konumlarını kaybederek kıvrımlı yapılar gelişecektir. Bunu takip eden hızlı bir erozyon sonucu yüzeyi pürüzlü, ancak oldukça düzleşmiş, iç yapısı kıvrımlı kalmış, yataydan farklı açılı tabakalı istifler üzerine, denizin yükselerek istila etmesiyle yeni bir denizel depolanma alanı oluşacak, yeni çökellerin orijinal ilk konumları yatay ya da yataya yakın durumda olacak ve tabakalar hâlinde çökelmeye başlayacaktır. Kıvrımlı tabakalar ile yeni çökelen yatay tabakalar arasındaki sınır, açısal bir uyumsuzluk yüzeyi oluşturacaktır. Bu yüzeye açılı uyumsuzluk

yüzeyi ya da **açılı diskordans hattı** denir. (Şekil 4.7, 4.8). Uyumsuzluk yüzeyleri, istifin çökeldiği ortam ve buna bağlı olarak sediment karakterindeki değişim ile kendini gösterebileceği gibi jeolojik dönemler boyunca, yerkürenin dinamiğine bağlı olarak gelişen deformasyonlar nedeniyle tabakalarda oluşan kıvrımlar sonucu, tabaka açılarında izlenen uyumsuzluklar olarak görülmektedir.



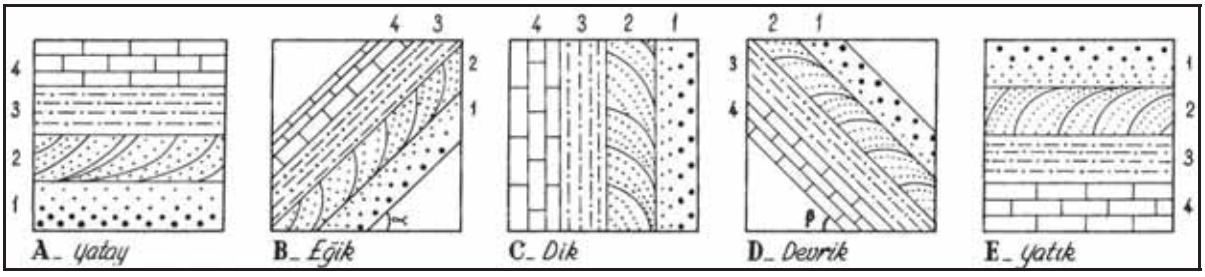
Şekil 4.7. (A) Açısız uyumsuzluk ve (B) Açılı uyumsuzluk (açılı diskordans) yüzeylerinin oluşum aşamaları (*Press v*d., 2004).



Şekil 4.8. Açılı uyumsuzluk (açılı/açısal diskordans) yüzeyi ve doğadan bir örnek.

4.2.1. Tabakalı kayaçlarda deformasyon izleri, tabaka doğrultu ve eğimi

Sedimenter kayaçlar depolanmaları sırasında kazanmış oldukları ilksel tabaka şekillerini, jeolojik dönemler boyunca gelişen tektonik etkenlere karşı nadiren koruyabilirler ve bu kayaçların oluşturdukları tabakalar genelde yatay konumlu ilksel durumlarını kaybederek tabakalar eğilmiş, kıvrılmış, kırılmış olarak karşımıza çıkarlar. Kayaçların oluşturdukları bu tür geometrik yapılar, yapısal jeolojinin konuları içinde incelenir. Büyük alanlarda bölgesel ölçekte litosferin yapısını ve bu yapıyı doğuran evrimi inceleyen jeoloji branşı ise **tektonik** *(tectonic)* olarak adlandırılır. **Tektonik deformasyon**, yapı ve şekil değişikliği anlamına gelir ve tabakaların yatay durumdan farklı bir yapı kazanmaları olayıdır. Yerküredeki büyük ölçekte kayaçlar üzerinde değişik yönlü basınç ve gerilmelerin neden olduğu tektonik deformasyonlar sonucu tabakalar ilksel yatay konumlarını kaybederek yatayla 90° den düşük (eğik tabaka), 90° (düşey tabaka), 90° den büyük (devrik tabaka) ve 180° lik (yatık veya ters tabaka) açı yapacak konuma gelebilirler (Şekil 4.9. A,B,C,D,E). Devrik ve ters tabakaların belirlenmesi için, önce tabakaların üst ve alt yüzeylerinin belirlenerek, bunların ve dolayısıyla istifin terslenmiş olup olmadığının kanıtlanması gerekir.

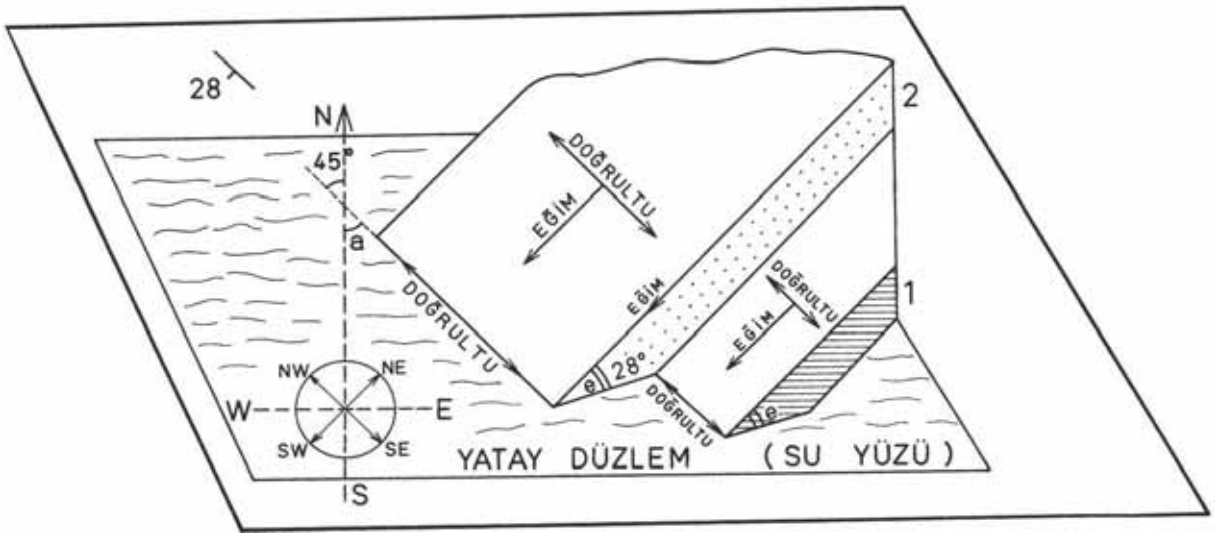


Şekil 4.9. Tabakaların yatay düzlemle yaptıkları açılara göre adlandırılmaları.

Doğrultu *(strike)*: Eğimli bir tabaka düzleminin, yatay düzlemle yaptığı ara kesit çizgisine doğrultu denir. Yatay düzlemi su yüzeyi kabul edersek, eğimli tabaka düzleminin durgun suya (hayalî olarak) daldırıldığında, suyun tabaka yüzeyi üzerinde bıraktığı ıslaklık çizgisi tabakanın doğrultusudur.

Doğrultu açısı: Doğrultu çizgisinin kuzey ile yaptığı dar açıya denir. Doğrultu açısı 0° ilâ 90° arasında bir değer alır.

Eğim *(dip)*: Bir düzlemin yatay düzleme doğru bakması hâline o düzlemin eğimli olması hâli denir. Bu durumda tabaka düzlemi ile yatay düzlem arasında kesin bir açı vardır, yani tabaka düzlemi ile yatay düzlem birbirlerini keserler. Aksi takdirde tabaka yatay düzleme paralel olmuş olur ki, bu tür tabakalara yatay tabakalar adı verilir. Eğimli tabakanın baktığı coğrafik yöne **eğim yönü** denir. Eğim yönü, doğrultu yönüne daima diktir. Eğimli bir tabaka düzleminin doğrultusuna dik düşey bir düzlem içinde yatay düzlemle yaptığı dar açıya da **eğim açısı** denir. Eğim açısının değeri 0° ilâ 90° arasında değişir. Bu tabakanın gerçek eğim açısıdır ve bir tabakanın sadece bir tane gerçek eğim açısı değeri vardır. Bu tanımlamalara göre K45B olarak doğrultusu belirlenmiş olan bir tabakanın yatayla olan arakesitinin, kuzey ile oluşturduğu dar açının batı yönünde ve 45° lik bir açı yapmış olduğu anlaşılır. Benzer şekilde 28GB olarak ölçülen tabaka eğim açısı, söz konusu eğimli tabakanın yatayla yapmış olduğu dar açının 28° olduğunu ve tabaka yüzeyinin ise güneybatıya doğru baktığını ifâde eder (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Tabaka doğrultu ve eğimi.

4.3. Kıvrımlar

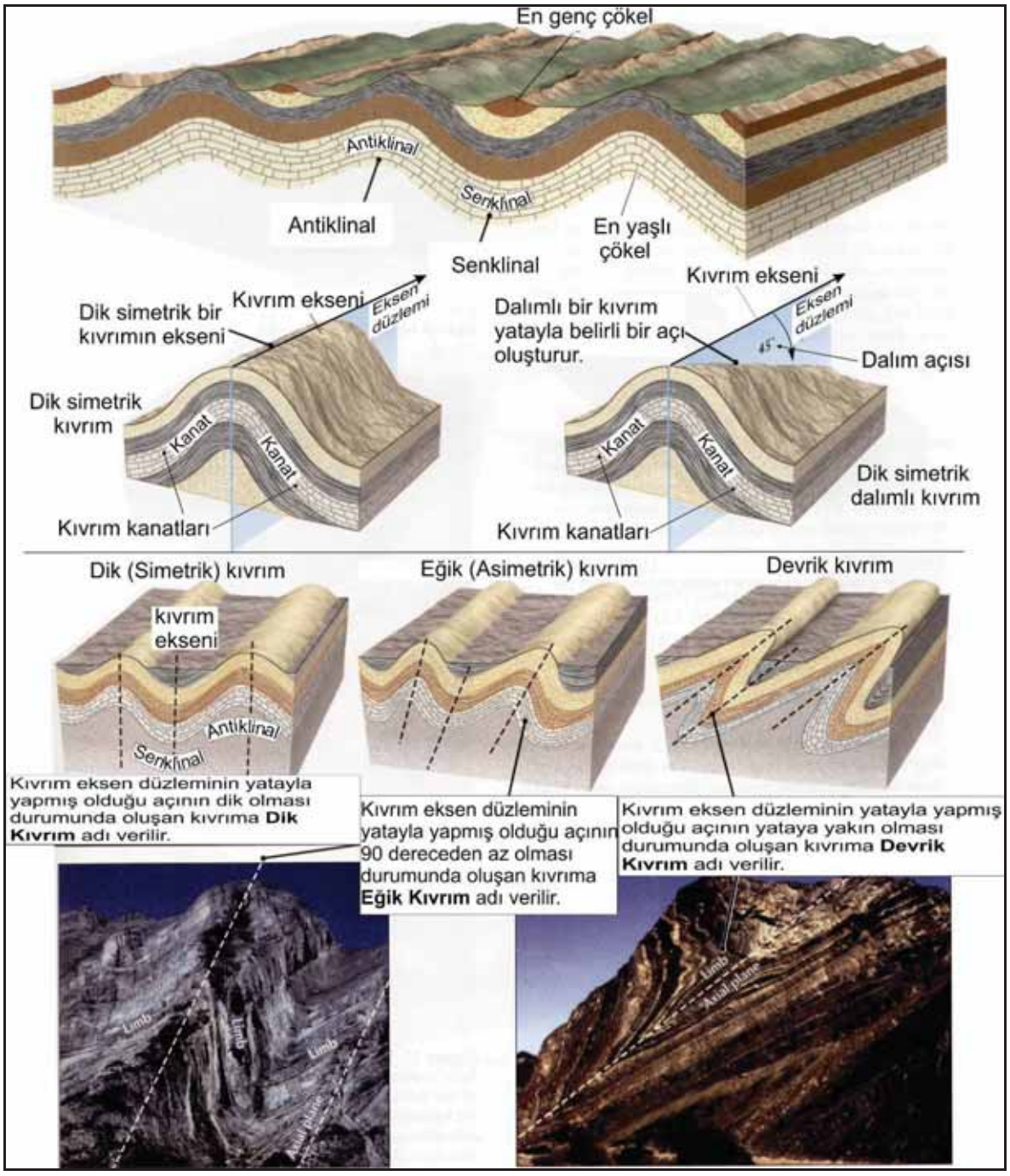
Kıvrım *(fold)***,** plâstik ve yumuşak tabakalarda veya herhangi bir düzlemsel yapıda deformasyon etkisi altında kırılmaya uğramadan görülen bükülmedir. Tektonik kuvvetlerin etkisiyle oluşan bu bükülme işi veya işlemine de **kıvrımlanma,** bir kıvrımın her iki tarafına **kanat** *(flank)* denir. Kıvrımlanma, basitçe yatay bir tabaka grubunun kanatlarının aşağı veya yukarı doğru bükülmesi olarak tanımlanabilir.

Tektonik kuvvetler etkisiyle, tabakaların iki kanadının aşağıya doğru bükülüp birbirlerinden zıt yönlere doğru eğimli kıvrımlanarak oluşturdukları kubbe şeklinde olan tümsek (semer şeklinde bükülme) kısımlara **antiklinal** *(anticline)*; bunun tersi olarak kanatların yukarıya doğru bükülüp kıvrımlanarak oluşturdukları çanak şekilli olan çukur kısımlara **senklinal** *(syncline)* denir. Antiklinal ve senklinalin iki kanadı vardır. Senklinalde bu kanatlar aynı yöne eğik, antiklinalde ise zıt yönlere eğiktirler. Kanatlar arasındaki açıyı ikiye bölen düzleme **eksen düzlemi** *(axial-plane)*, iki kanadın birleştiği çizgiye de **eksen** *(axis)* denir. Eksen düzlemi, kıvrımlanmaya katılan çeşitli tabakaların eksenlerini birleştiren bir düzlemdir.

Birbirini izleyen antiklinal ve senklinal yapıları beraberce kıvrımlı *(folded)* yapıları oluştururlar. Kıvrım eksen düzleminin yatayla yapmış olduğu açıya bakılarak kıvrıma dik, eğik, devrik ve yatık kıvrım gibi adlar verilir (Şekil 4.11.A). Ayrıca kıvrımın kanatlarının kıvrım eksen düzlemi ile yapmış olduğu açıların eşit veya farklı olması, o kıvrımın **simetrik** veya **asimetrik kıvrım** olarak tanımlanmasına neden olur. Kıvrım kanatları ile eksen düzlemlerinin birbirine paralel tekrar etmesiyle oluşan ve eksen düzleminin yatay düzlemle yaptıkları açılar birbirine eşit ve kıvrım kanatları arasındaki açıların da 10° den daha az olarak geliştiği kıvrımlara **izoklinal kıvrım** *(isoclinal fold)* adı verilir.

Diğer kayaç türlerinde; örn. mağmatik kayaçlarda akma yapıları, metamorfik kayaçların çoğunda ise yapraklanma düzlemleri gelişir. Metamorfik kayaçlarda, metamorfik kayacı oluşturan belirli minerallerin birbirine paralel düzlemler, mercekler veya bantlar teşkil edecek şekilde, toplanmaları, sıralanmaları ile meydana gelen ve bir kayayı boydan boya katedip tekrarlanan düzlemsel yapılar (foliasyon) oluşmaktadır. Metamorfizma geçirmiş yönlenmeli

kayaçlarda da foliasyon, şistozite ve klivaj oluşumu sırasında kıvrımlı yapılar gelişir.



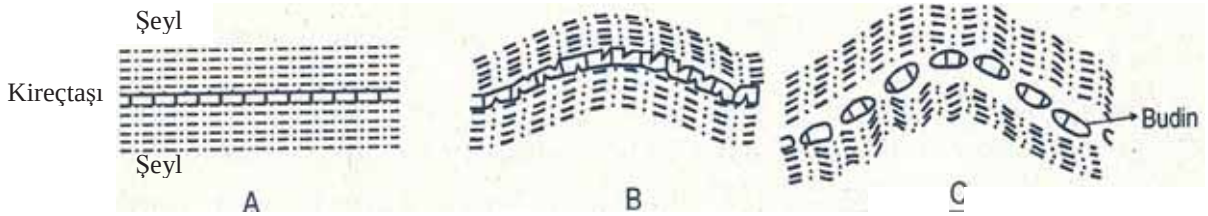
Şekil 4.11.A) Kayaçlarda görülen kıvrımlar ve türleri (*Press* vd., 2004).

Şiddetli deformasyon geçirmiş olan sedimenter kayaçlar ile metamorfik kayaçlarda gözlenen '**budinaj**'lar (sucuk, badem yapısı, *boudinage structure*), nispeten daha az dayanıklı ve yumuşak kayaçlar arasında yer alan sert yapılı kayaçların sıkışıp yer yer kırılarak, boğumlu bir hâlde sucuk yapısına benzer

parçalara ayrılması sonucu oluşturdukları, sucuğa ya da bademe benzeyen parçaların her birine **budin** *(boudin)* adı verilir. Yaygınca benimsenen bu görüşe göre; budinaj oluşabilmesi için genellikle sert ve dayanıklı bir tabakanın, kendisine oranla daha az dayanıklı veya yumuşak karakterli iki tabaka arasında bulunması ve bunların hep birlikte yapısal kuvvetlerin de etkisi ile deforme olması gerekir. Örnek olarak marn, şeyl ya da ***çamurtaşları** içerisinde bir kireçtaşı bandının bulunması, budinaj yapısını oluşturabilir (Şekil 4.11.B). Ancak yeni görüşler; arazi ve laboratuar bulguları, yumrulu kireçtaşı (budin) oluşumlarının, erken diyajenez evresinde yani sedimentlerin taşlaşması sırasında, kayaçlar henüz yumuşak kıvamda iken; sıkışma, yüklenme, basınç erimesi (örn. karbonat) ve kısmen de tektoniğin müşterek etkisiyle meydana geldiğini göstermektedir (Önalan, 1990).

[Çamurtaşı,** *(mudstone):** Çökelme sırasında, ince taneli (0.0625 mm - 0.0025 mm) silt ve kilden (çamur malzemesi) oluşan, düzenli bir dilimlenme veya ince tabakalanma göstermeyen zayıf dayanımlı sedimenter kaya, laminasız siltli kiltaşı;

Şeyl, *(shale)***:** Çökelme sırasında, taneleri silt ile daha çok kil boyutunda *(clay size)* ince tanelerin karışımından oluşan ve birbirine paralel düzlemler boyunca kolaylıkla ayrılabilen, 1 cm'den daha ince tabakalardan (laminasyon) oluşmuş çamurtaşı, zayıf dayanımlı sedimenter kökenli kaya, laminalı siltli kiltaşı), (*Dausien,* 1974)**]**.



Şekil 4.11.B) Budinaj yapısı. Yatay tabakaların (A), beraber kıvrımlanmaları (B) sırasında kıvrım sonucu (C), yumuşak kaya (şeyl, çamurtaşı vb.) arasında yer alan daha sert kayada (A= Kireçtaşı→ C= Yumrulu kireçtaşı) gelişen budin "badem" yapıları (Karaman, Kibici, 2008).

Örnek olarak İstanbul bölgesindeki Devoniyen yaşlı sedimenter çökellerin üç ayrı seviyesinde, yumuşak marnlar arasında, mavimsi gri renkli derin denizel (deniz derinliği > 800 m) ortamda, bir taşınma olmadan yerli yerinde çökelmiş yumrulu kireçtaşlarına rastlanmıştır. Bu kireçtaşı seviyeleri, genellikle 5-6 cm'den kalınsa ondüleli, daha ince ise yumrulu kireçtaşı yapısını aldığı gözlemlenmiştir (Önalan, 1990). Günümüzde, taş ocaklarından çıkartılan bu

tür kayalar, YTÜ, Beşiktaş Yerleşkesi örneğinde de görüldüğü üzere taş duvar yapımında, yapı taşı olarak kullanılmışlardır (Şekil 4.11.C).



Şekil 4.11.C) YTÜ, Beşiktaş Kampüsü bahçesi taş duvar istinat yapısı (08.05.2008).

Şekil 4.11.C'de yer alan taş duvarda kullanılan yapı taşlarında, badem (budin) yapıların yakından görünüşleri Şekil 4.11. D, E, F ve G'de yer almaktadır.



Şekil 4.11.D) Yumrulu kireçtaşlarında görülen budinaj (bademli) yapılar. YTÜ Beşiktaş Kampüsü taş duvarında kullanılan, taş ocaklarından getirilmiş Devoniyen yaşlı gri renkli yumrulu kireçtaşı. Çökelme evresinde yerinde oluşan şeyl-kireçtaşı ardalanmasında, kalınlık oranlarına göre gelişen ondülasyonlu ve bademli yapılar. En tipik budin yapısının (=yumrulanma), 2 cm - 3 cm kalınlığındaki kireçtaşı ile aynı kalınlıktaki şeyl ya da marn ardalanmalarının olduğu seviyelerde geliştiği gözlenmekte (08.05.2008).



Şekil 4.11.E) Budinaj yapısı. Mavi-gri renkli yumrulu kireçtaşı (Devoniyen). Taşın alt seviyesindeki gri şeyl ve marnlar arasında yer alan kireçtaşı bandı kalınlığı 5 cm - 6 cm'yi geçtiğinden ondüleli, taşın üst kesimlerinde ise bant kalınlığı daha ince olduğundan yumrulu "badem" yapı gelişmiştir (08.05.2008).



Şekil 4.11.F) Yumrulu kireçtaşları (08.05.2008).



Şekil 4.11.G) Laminasyon ve budinaj yapısı. Kaya oluşumu sırasında henüz plâstik kıvamda iken, kıvrımlanmaları, laminasyonlar ve yumru gelişimleri (08.05.2008).

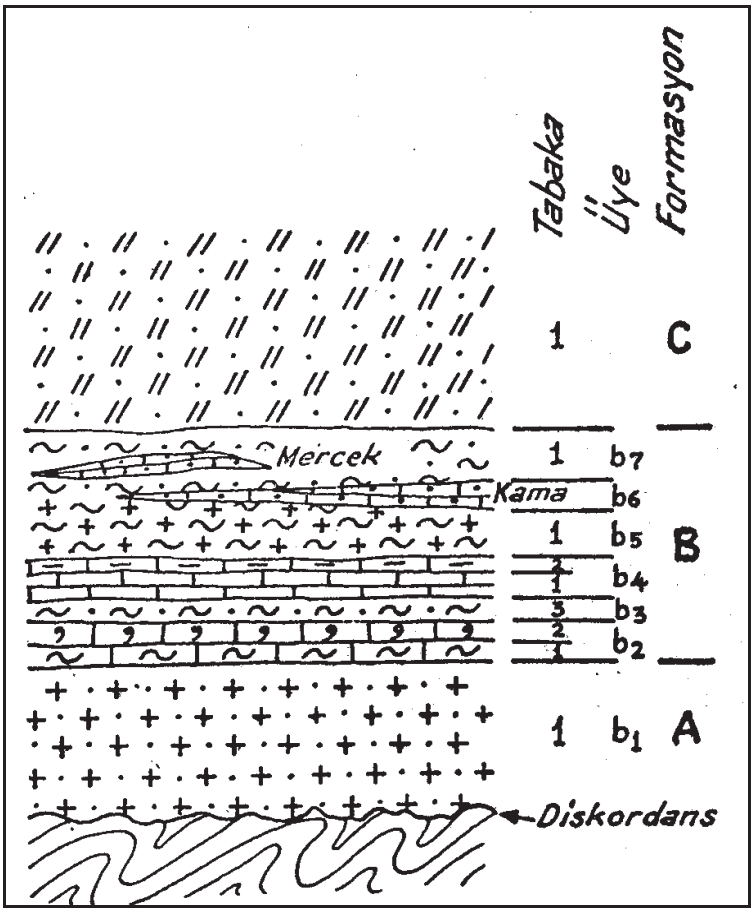
4.4. STRATİGRAFİ

Stratigrafi *(stratigraphy)*, Yer kabuğundaki belli bir alan ve bölgedeki kayaların, tabakalı ve sedimenter kayaçların dizilimlerini, birbirleriyle olan ilgilerini inceleyen, formasyonlarından, bileşimlerinden, nitelik, istiflenme, yaş ve korelasyonlarından söz eden bir jeoloji dalıdır. Stratigrafik dizilimin incelenmesi sonucu, o alanda birikmiş olan sedimenter kayaçların yaşlıdan gence doğru sıralanması yoluyla söz konusu depolanma alanının zaman içerisindeki evriminin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu amaçla depolanma alanında birikmiş olan sedimentlere ait tabakaların, aralarındaki sedimentolojik ve yapısal ilişki, üst-alt ilişkisi veya kesen-kesilen ilişkisinin incelenmesi sonucu, alttan üste doğru olan dizilimleri ve dolayısıyla ortamın jeolojik evrimi belirlenebilir. Ayrıca her bir tabakanın çökeldiği dönemde yaşayan organizmalara ait fosillerinden yararlanılarak, tabakaların çökeldikleri dönemler ve birbirleriyle olan ilişkilerinin zamansal boyutunun da belirlenmesi mümkündür. Bu veri demetleri içerisinde stratigrafi: **Kaya stratigrafi birimleri (litostratigrafi)**, **Zaman-kaya stratigrafi birimleri**, **Jeolojik zaman birimleri** ve **Biyostratigrafik birimler** olmak üzere dört kısımda incelenebilir.

4.4.1. Kaya stratigrafi birimleri

Fosilleri veya zaman sınırlarını dikkate almaksızın kayaçların, litoloji veya yapı şekilleri ile tanımlanan ve tanınan stratigafi birimidir (=litostratigrafi). Burada kayaçların tabakalanma sıraları, arazide görüldüğü gibi tariflenip, istiflenmeler olduğu gibi yansıtılır. Sedimenter kayaçlar, bir sedimentasyon (çökelme) havzasında genellikle de sularla taşınan kırıntılı gereçlerin üst üste çökelmesiyle oluşurlar. Zaman dikkate alındığında, tabaka-tabaka çökelen kırıntılı gereç, sedimentleri meydana getirir ve en son çökelen sediment veya tabaka, eğer sonradan tektonizmayla tabakalanma bozulmamış ise tabiatıyla en üsttedir ve alttakilerden daha gençtir. Çökelen her kayaç, komşu alt ve üstteki litolojilere nazaran farklı ve belirli bir özel karakterlere sahiptir. Genellikle çökelmede herhangi bir değişiklik veya çökelen malzeme çeşitliliği ve diskordanslar, bu sedimentleri ayrı birimler hâline koyar. Organik kalıntıların bu ayrılmada rolü yoktur. Burada önemli olan durum, her litolojinin homojenliğidir. Yanal devamlılık, doku, yapı, renk, morfoloji ve sedimentasyon şekli de kayaç biriminin ayrımında önemli rol oynarlar (Baykal, 1967). Çökelen

sedimentler orijinal olarak ilk konumları çoğunlukla yatay ya da yataya yakın durumdadırlar. Kaya stratigrafi birimleri; **tabaka, üye, formasyon** ve **grup** olarak kısımlara ayrılırlar (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Tabaka (*layer*), üye (*member)*, formasyon (*formation*), kama (*wedge*) ve merceği (*lens*) gösteren bir sediment grubu. 1, 2, 3 tabakaları; b_1, b_2, b_3 … üyeleri; A, B ve C ise formasyonları belirtirler (Baykal, 1967).

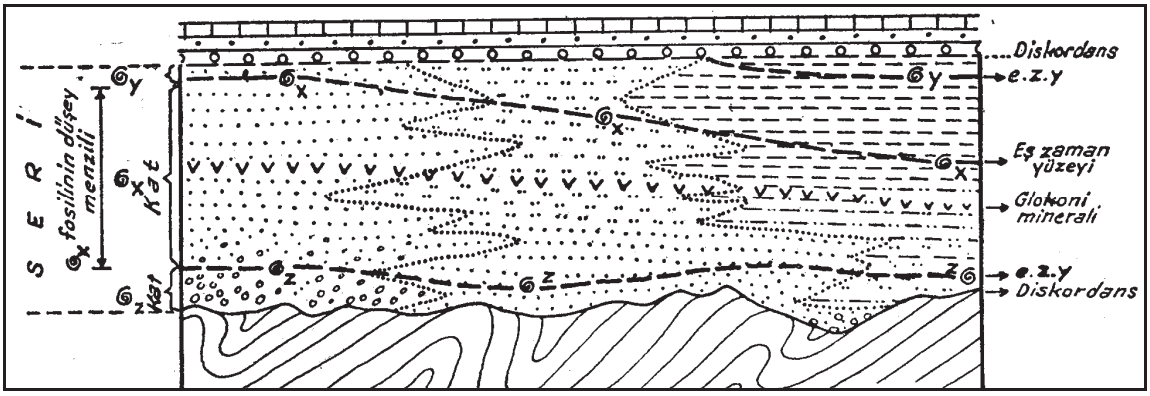
Tabaka: Çökelme havzasında alt ve üstteki litolojik oluşuklardan özel karakterleriyle ayrılan en küçük kaya birimidir. Genellikle tabaka, 1 cm'den daha kalın olur. Bunun daha incesine **"lamina"** denir. **Üye:** Az çok birbirine benzeyen ve üst üste gelen tabaka topluluğuna üye ismi verilir. Standart bir kalınlığı yoktur. Zira zamanla ilgili değildir. Bir taraftan incelip kaybolursa **"kama"**, iki taraftan incelip kaybolursa **"mercek"** ismini alır. **Formasyon:** Genel olarak üst üste gelmiş birbirine benzeyen üyelerin toplanmasından meydana gelmiş bir litoloji birliğidir. Bu terim sedimentasyonun temel birimi olarak düşünülmüştür. Burada da zaman ve standart bir kalınlık bahis konusu değildir. Bir metreden binlerce metre kalınlığa erişebilir. Bir formasyonun kalınlığı paleocoğrafik şartlar altında değişebilir. Formasyonlar, en bâriz olarak

diskordanslarla sınırlanmışlardır. Ya hâkim bir litolojiye sahiptir ya da birkaç litolojinin tekrarlanmasından meydana gelmiştir. Farklı litoloji birimlerini içerdiği takdirde bu birimler arasında dikey geçişler görülür. Böylece formasyonun diğer birimlere nazaran daha heterojen bir topluluk şeklinde bulunduğu anlaşılır. Bu takdirde formasyonu ayırmak için anahtar seviyelerin tespiti gerekir. Formasyonlar, ya litolojik birimi bölgedeki bir coğrafik isme veya doğrudan doğruya formasyon kelimesini yine coğrafik isme ekleyerek adlandırılır. Homojen hallerde birinci, heterojen durumda olan formasyonlara da ikinci tip adlandırma uygulanır (örn. Midyat kalkerleri, Kartal formasyonu, Trakya formasyonu vb). **Grup:** Müşterek özellikleri içeren iki veya daha fazla ve üst üste bulunan oluşuklara (formasyonlara) grup ismi verilmektedir. Bu da yine bir kaya birimi olduğu için zaman, canlı ve kalınlıkla ilgisi yoktur. Grup'un da sınırları, belirgin anahtar seviyeler ve diskordanslarla belirtilir. Adlamada, litoloji karakteri çok karışık olduğu için, sadece bölgedeki uygun bir coğrafik isimden veya hâkim litoloji biriminden faydalanılır (örn. Bitlis grubu, Serpantinli grup vb. Baykal, 1967).

4.4.2. Zaman kaya stratigrafi birimleri

Bu birimler belirli jeolojik zaman aralıklarında, litolojik fark gözetilmeden çökelmiş olan sedimentleri kapsar. Zaman aralıklarında çökelen sedimentler; **kat, seri, sistem, üst sistem** şeklinde zaman-kaya stratigrafi birimleri olarak sınıflandırılırlar. **Kat** *(stage)***:** En kısa bir zaman aralığında teşekkül etmiş (oluşmuş, biçim kazanmış) çökelti topluluğudur (Şekil 4.13). Kat sınırlarının tespitinde eşzaman yüzeyler esas olup bunlar da fiziksel, kimyasal ve biyolojik şartların etkisiyle belirtilir. **Seri** *(serie)*: Kat'tan daha kalın ve daha belirli sınırlarla ayrılmış olan kayaç topluluğudur. Bu sınırlar, deniz istilâsı (transgresyon), deniz çekilmesi (regresyon) veya fiziksel, kimyasal ve biyolojik olay etkileri ile belirtilir. **Sistem** *(system)*: Seri'nin üstünde olmak üzere belirli bir jeolojik zaman aralığında oluşmuş kayaç topluluğudur. Sistem büyüklüğü standartize edilmemiştir. Sistemin zaman aralığı 25-90 milyon sene arasında değişmekle birlikte, ortalama olarak 50 milyon sene olarak kabul edilebilir. Sistem adlamasında da yersel isimlerden, bölge adlarından (örn. Kambriyen, Devoniyen) veya litolojik özelliklerden (örn. Karbonifer=Kömür dönemi, Kretase=Tebeşir dönemi) istifade edilir. **Üst sistem** *(erathem)*: En büyük zaman-kaya birimidir.

Meydana geldiği “zaman ismiyle” adlandırılır. Bu dönemler, yeryüzünde geçmiş olan çok önemli kıyamet benzeri olay etkileriyle sınırlanırlar (örn. Mesozoyik dönem). Genel olarak zaman-kaya birimleri, belirli ve standart kesitlere dayanır ve sınırlar her tarafta, aynı bir zaman göstergesini belirttiği için birimler eşzaman aralıklar içinde oluşmuş demektir. Böylece meydana gelen sınır yüzeylerine “eş zaman yüzeyler” veya izokron yüzeyleri adı verilmiştir. Fosil, litoloji, tabaka istiflenme şekli, diskordans, erozyon, regresyon, transgresyon, volkanik faaliyet ve paleoklimatoloji, “eş zaman yüzeyleri” tespitinde önemli roller oynarlar.



Şekil 4.13. Kat, seri, fosil menzili ve eşzaman yüzeyleri. Katlar yanal geçişlidir. Seri, iki transgresyon ve iki diskordans ile sınırlıdır.

4.4.3. Jeolojik zaman birimleri

Jeolojik zaman birimleri, kesiksiz devam eden zaman esas alınarak ayırtlanmıştır. Burada bir duraklama veya aralık düşünülemez. Litoloji veya fosillerle bağlantılı olmayıp, bunlar zamana tâbidir. Zaman aralıkları bir yerde bir çökeltiye karşılık geldiği hâlde başka bir bölgede bir erozyona veya çökelmede duraklamaya veyahut başka bir jeolojik olaya karşılık gelebilir. Deniz ve karaların hareketleri, paleocoğrafik, paleotektonik veriler, zaman birimlerinin ayrılmasına yardım ederler. Jeolojik zaman birimleri: **Yaş** *(age)*, **Devre** *(epoch)*, **Devir** *(period)*, **Zaman** *(era)*, **Üst Zaman** *(eon)* olarak sınıflandırılırlar.

Yaş: Kat’a tekabül eden (=karşılık gelen) zaman aralığına verilen bir terimdir. Yani bir “Kat”, bir “Yaş” esnasında teşekkül etmiştir. **Devre:** Epok adı da verilen bu terim, Seri’nin teşekkül zamanına tekabül eder, yani karşılık gelir. Radyoaktif metotlarla elde edilen verilere göre Devre için ortalama 15 milyon sene düşünülmüştür. **Devir:** Jeolojik zamanın standart temel birimi olarak

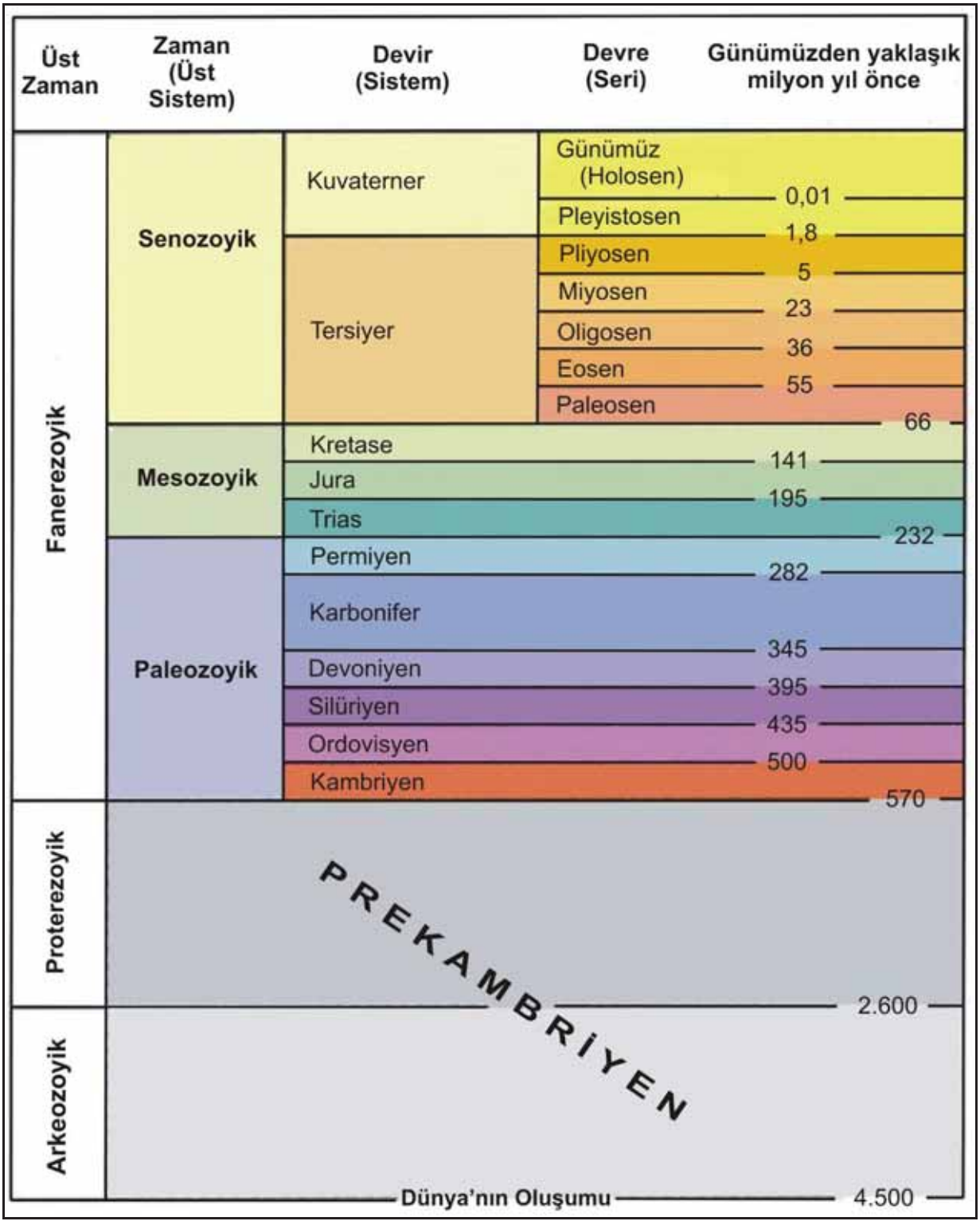
kabul edilmiş olup buna **periyot** ismi de verilir. Devir esnasında da Sistem oluşukları çökelmiştir. **Zaman:** Devir'den yüksek, önemli organik gelişim veya batım safhalarını içeren ve esaslı jeolojik olaylar ile ayrılan vakit aralığına **"Zaman"** ismi verilmiştir. Büyük ve genel regresyon ve transgresyonlar, büyük tektonik hareketler "**zaman**" birimleri içinde meydana gelmiştir. Bu esnada Üst Sistem oluşukları çökelmiştir.

4.4.4. Biyostratigrafik birimler

Düşey yönde, litolojik karakterler gözetilmeden görülen belli canlı topluluklarına **biyostratigrafik birimler** adı verilir. Diğer bir ifâde ile sedimentler içerisindeki fosillerin yaşam dönemleri dikkate alınarak yaşlıdan gence doğru istifin evriminin belirlenmesi **biyostratigrafi** olarak adlandırılır. Bu birimlerin ayrılışında kayacın rolü yoktur. Tıpkı kayaç ünitesi gibi ya da bir fosil-stratigrafi ünitesi sayılır. *Trilobit, Graptolit, Fusulin* gibi fosiller birer biyostratigrafik üniteler olarak tanınırlar. Bazen fosil-stratigrafi birimleri ile zaman kaya birimleri arasında bir ilgi mevcut olabilir. Bazı hâllerde de biyostratigrafik birim, zaman-kaya stratigrafik biriminin tamamen muadili (=eş değeri) olabilir. Biyostratigrafik birimler: zon, menzil zonu, topluluk zonu, bolluk zonu, horizon veya yatak, biyolojik provens olarak kısımlara ayrılırlar (Baykal, 1967). Ayrıca günümüzde sismik kesitlerdeki yansıma yüzeyleri ile sondaj kuyu loglarının beraberce değerlendirilmesi sonucunda istifin alttan üste ortaya çıkarılması işlemine **sismik stratigrafi** denilmektedir. Tablo 4.2'de uluslararası stratigrafik jeolojik zaman tablosunda da görüleceği üzere farklı zamanda çökelmiş birimler, çökeldikleri zaman aralığına göre jeoloji haritalarında ayrı ayrı renklerle gösterilirler. Bu haritalarda yaşlı çökeller koyu renkli, genç çökeller daha açık renklerle temsil edilirler. Buna göre, yaşlıdan gence doğru Paleozoyik döneminde çökelmiş birimler koyu-açık kahverengi; Mesozoyik döneminde çökelmiş birimler; Triyas dönemi için eflatun, Jura mavi ve Kretase dönemi için yeşil renklerle (Jura ve Kretase: Dinozor'ların yaşadığı dönem); Senozoyik Tersiyer dönemi (Paleosen, Eosen, Oligosen) koyu-açık turuncu; Miyosen ve Pliyosen koyu-açık sarı; Kuvaterner dönemi çökelleri gri; granit-granodiyorit gibi asidik mağmatik kayaçlar kırmızı; ofiyolitik birimler ise askerî yeşil renklerle gösterilirler.

Diğer tüm jeoloji dallarının da yararlandığı, gibi belli bir alan veya bölgede yer alan kayaçların stratigrafik sınıflandırması yapılmak istendiğinde, aşağıdaki "**Jeolojik Zaman Tablosu**"ndan yararlanılır (Tablo 4.2). (*Eysinga*, 1975).

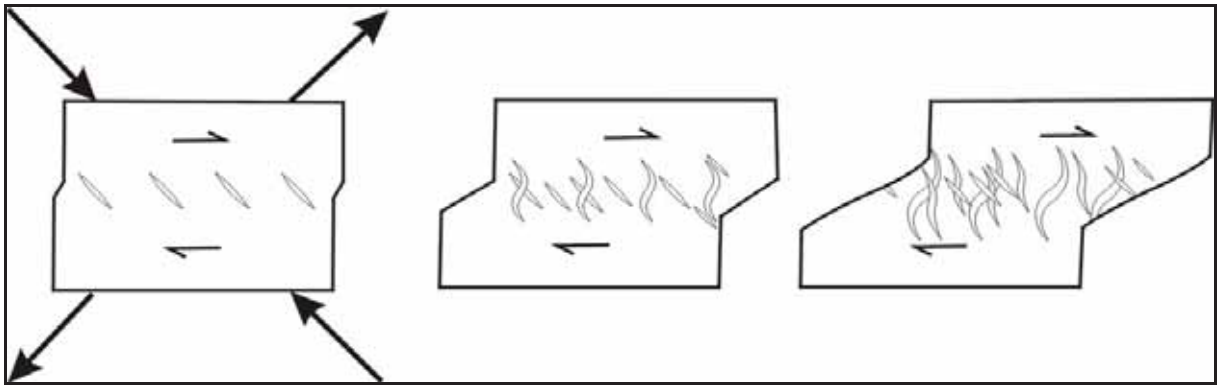
Tablo 4.2. Jeolojik Zaman Tablosu (*geological time table, Eysinga,* 1975).



4.5. Yarık, Çatlak ve Fissürler

Gözle görülebilecek miktardaki bir yer değiştirmenin (ötelenme) olmadığı süreksizliklere, açılma miktarlarına göre büyükten küçüğe sırasıyla **yarık, çatlak** ve **fissür** adları verilir. Her üç süreksizlikte de kayaç üzerindeki kırılan yüzeyler birbirlerinden uzaklaşırlar ve kırığın arası açılır. İki kırılma yüzeyi arasındaki açıklık 1 cm veya daha fazla ise oluşan kırığa **yarık**, 1 cm- 1 mm arası ise **çatlak,** 1 mm'den daha küçük ve çıplak gözle zor görülebilen boyutlarda oluşan kırık **fissür** *(fissure)*, çapı ve uzunluğu mikron mertebesinde oluşan kırık ise **mikrofissür** *(microfissure)* olarak tanımlanır.

Çatlaklar çoğu zaman birbirine paralel gruplar hâlinde gelişirler. Birbirine az-çok paralel olan çatlaklara **düzenli (sistematik) çatlaklar**, birbirine paralel bir şekilde gelişmemiş çatlaklara **düzensiz (asistematik) çatlaklar** adı verilir. Kırılma *(fracture)* gerçekleştiğinde oluşan çatlakların içleri boştur. Ancak zamanla yeraltı sularının etkisi ile çatlaklar yabancı malzemelerle (kuvars, kalsit kil vb.) dolabilir. Söz konusu dolgu malzemesi, kayaç içerisinde "damar" olarak adlandırılır (kalsit damarı, kuvars damarı vb.). Bu yapılar, yarı derinlik (damar) mağmatik kayaçlarla sadece isim benzerliğine sahiptirler. Çatlaklar, kendilerini oluşturan tektonik gerilme sistemlerine göre a) Basınç *(compression)* çatlakları, b) Çekme *(tension)* çatlakları ve c) Kesme *(shear)* çatlakları olarak üç grupta toplanır. Kayaçlar üzerindeki ayrışma-bozuşma işlemleri de ağırlıklı olarak bu tür kırık *(fracture)* yüzeyleri boyunca meydana gelir (Şekil 4.14, 4.15).



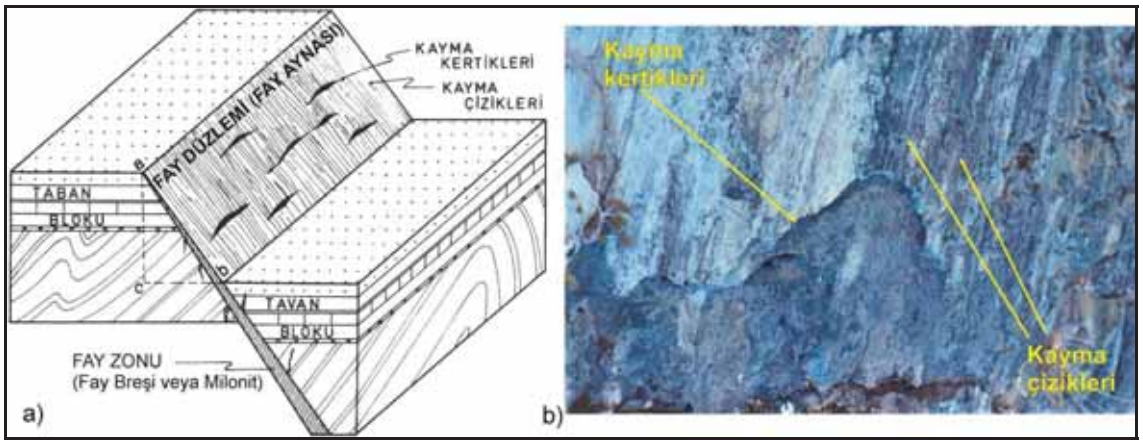
Şekil 4.14. Bir kuvvet çiftinin etkisi altında oluşan çatlaklar (tüy çatlaklar, sağ yönlü yanal atım gelişimi).



Şekil 4.15. Kayaçlarda düzenli gelişmiş süreksizlik (çatlak) takımları ve süreksizlikler boyunca gelişen ayrışmalar (*Press* vd., 2003).

4.6. Faylar

Üzerlerinde gözle görülür bir yer değiştirme meydana getiren kırıklara **fay** *(fault)* adı verilir (Şekil 4.16). Faylanma sırasında, kaymanın gerçekleşmiş olduğu yüzeye **fay düzlemi/fay yüzeyi** veya **fay aynası** *(slickenside)* denir. Bu düzlemin alt kısmında değişik kalınlıkta ezilerek parçalanmış malzemeden oluşan bir zon oluştuğundan, bu zona **fay zonu** *(fault zone)* adı verilir. Fay zonu boyunca ezilip parçalanan kayaç malzemesi, aşınmaya dayınımlı mineral içeriğinden dolayı iri boyutlarda köşeli kırıklı bir ezik zon oluşturursa bu zonda oluşan kayaca **fay breşi** *(fault breccia)*, ince taneli malzemeden oluşan killeşmiş ezik zon malzemesi oluşturursa, bu zonu oluşturan çizgili-kaygan görünümlü kayaca **milonit** *(mylonite)* denir ve bu tür zonlarda sık sık **fay killeri** gözlenir (örn. Bolu Tüneli Güzergâhı tünel açma çalışmalarında rastlanılan yüzlerce m kalınlığındaki kızıl renkli fay killeri). Fay düzlemleri boyunca düzlem üzerinde ayrıca fayın varlığını tanımlayan **kayma çizikleri** ve **kayma kertikleri** de oluşur (Dirik, 2005).



Şekil 4.16. Fay ve fayın elemanlarını gösteren blok diyagram. a) Blok diyagramda gösterilen normal fay üzerinde, fay kavramına ait tanımlar. a-c mesafesi fayın düşey atımını; c-b mesafesi ise fayın yatay atımını gösterir.
b) Fayın oluşturduğu kayma çizikleri ve kertiklerinin sahada bir kaya yüzeyi üzerinde görünümü. Kayma kertikleri ve çizikleri kaymanın yönünü belirler (b fotosu:Temmuz 1991).

Faylar, tektonik olayların etkisiyle gerilme artışı görülen bölgelerde oluşur ve atım yönlerine göre **eğim atımlı normal ve ters faylar; bindirmeler** ve **doğrultu atımlı faylar** olarak sınıflandırılırlar. Doğrultu atımlı faylar üzerinde ayrıca normal fay, ters fay, oblik normal veya oblik ters fay hareketleri de gözlenebilir.

4.6.1. Normal fay, ters fay ve bindirmeler

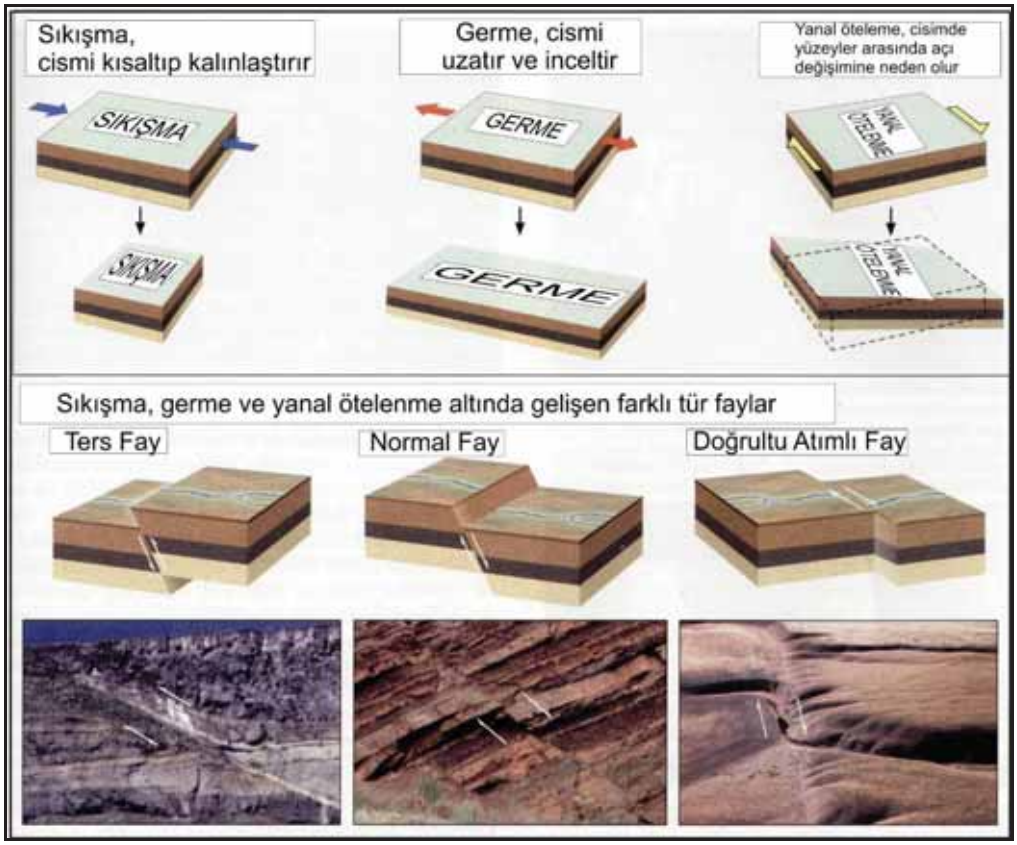
Gerilmeli bölgelerde, eğik bir fay düzlemi üzerinde kalan bloğun, düzlemin altında kalan bloğa göre aşağı doğru hareket edip kayması sonucu gelişen faya eğim atımlı **normal fay** (gravite fayı, *normal fault*); yukarı doğru hareket etmesine eğim atımlı **ters fay** *(thrust fault)* adı verilir. Her iki fay türünde blokların aşağı yukarı doğru hareketleri sırasında verev (yan) yönde de atım (ötelenme) oluşturuyorlarsa bu tür faya **verev atımlı fay** ya da **oblik fay** *(oblique-slip fault)* adı verilir. Fay düzleminin altında kalan bloğa **taban bloğu** *(footwall block)*, üzerinde kalan bloğa **tavan bloğu** *(hangingwall block)* denir (Şekil 4.17, 4.18, 4.19). Her iki bloğu ayıran fay düzleminde düşey atım gelişmiş ise taban ya da tavan bloğu söz konusu olmaz ve atımı *(fault throw)* da düşey olan bu tür faya **düşey fay** *(vertical fault)* denir.



Şekil 4.17. Eğim atımlı normal fayın arazide görünümü. Düşey atım birkaç metredir. Muğla İli, Milas Karayolu kenarı (30.08.2010).

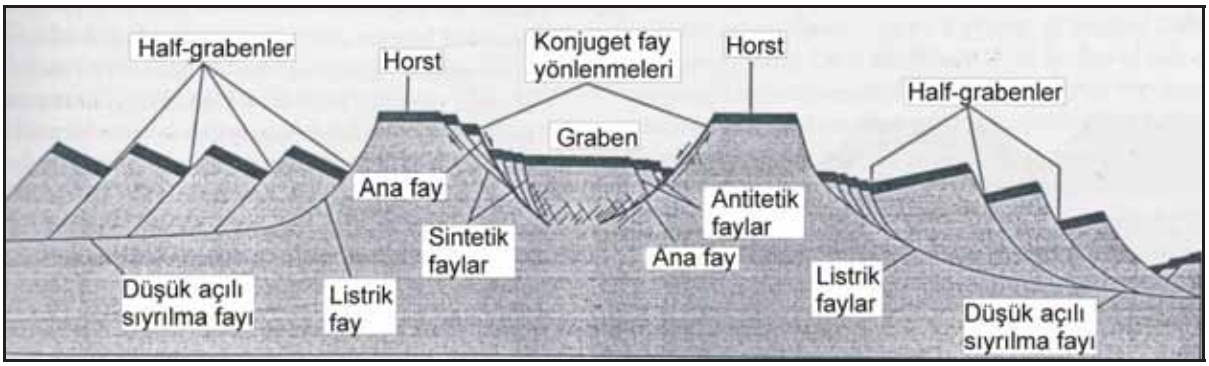


Şekil 4.18. Eğim atımlı normal fayın arazide görünümü. Kırşehir İli, Mucur İlçesi, Geycek Köyü civarında metamorfik kayaçlardan oluşan ve dağ dorukları boyunca Rüzgâr Enerji Santrallerinin (saatte 2,2 ve 3 MW'lık RES'ler) yapılacağı yüksek alanlarda dağı boydan boya kesen pasif nitelikli eğim atımlı normal fay. Düşey atım 100 m'dir. Kırşehir Masifi (Paleozoyik) olarak adlandırılan metamorfik kayalarda, açık beyazımsı şerit görünümlü kesimler som yapılı beyaz mermerlerden; beyaz mermerler ile ardalanan koyu renkli kesimler ise metapelitlerden (şist) ve kalkşistlerden oluşmaktadır. Koordinatlar: X (kuzey-güney): 4326982; Y (doğu-batı): 629839; Z (râkım): + 1.380 m (01.12.2012).



Şekil 4.19. Cisimler üzerine uygulanan değişik kuvvetler ve bunlara göre oluşan fay türleri.

Bazen, kayaçların her iki yanı da eğik düzlemli normal faylar tarafından düşürülmüş olan tavan blokları, çevrelerini sınırlayan taban bloklarına göre derin vâdiler oluşturabilirler. Her iki yanı normal faylarla sınırlandırılmış olan bu tür çöküntü alanlarına **graben** adı verilir. Bunun karşıtı olarak da her iki yanı normal faylarla sınırlandırılmış yükselti alanları **horst** olarak adlandırılır. Tüm Ege Bölgesi güney yönde yaklaşık 10 milyon sene önce açılmaya başlamış ve günümüze kadar % 50'ye ulaşan genişlikteki açılma günümüzde her bir sene başına 30 mm'ye ulaşmıştır. Bu açılma, graben-horst gelişimine neden olmaktadır. Graben ve horstlar birbirlerine komşu ve tektonik kökenli gelişmiş yapılar olup mekanik olarak birbirlerini tamamlarlar. Ege bölgesinde hâlen gelişmekte olan graben ve horstlar, yüzbinlerce yıldır süren gelişimlerinden sonra bugünkü Ege Bölgesi'nin iç kısımlarında büyük akarsu vâdilerinin ve tarıma elverişli verimli Menderes ovalarının oluşmalarını sağlamışlardır. Bu vâdiler arasında yer alan faylarla sınırlandırılmış yüksek sırtlar ile kıyılardaki koy-körfez ve aralarındaki yarımadalar, genellikle gerilme *(stress)* rejimi altında gelişen horst-graben sisteminin bir ürünüdürler. Horst-Graben sisteminde, ana fay düzlemi ile aynı doğrultuda, fakat zıt yöne eğimli olan ve ana faydan daha küçük boyutlu faylara **antitetik faylar**, ana fay düzlemi ile aynı doğrultuda, ana fayın eğimine paralel, paralele yakın veya ondan daha fazla eğime sahip olabilen küçük boyutlu faylara **sintetik faylar** denir. Eğer fay düzlemi yüzeye yakın kesimlerde oldukça dik, derinlere doğru düşük eğimli veya yataya yakın konumda gelişmiş ise bu tür faylara da **listrik faylar** (kavisli faylar, *listric faults*) adı verilir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Normal faylar ile gelişen horst-graben sistemi (*Twiss ve Moores*, 1992).

Sıkışmalı bölgelerde gelişen **eğim atımlı ters faylar**, eğik bir fay düzlemi üzerinde kalan bloğun, düzlemin altında kalan bloğa göre yukarı doğru

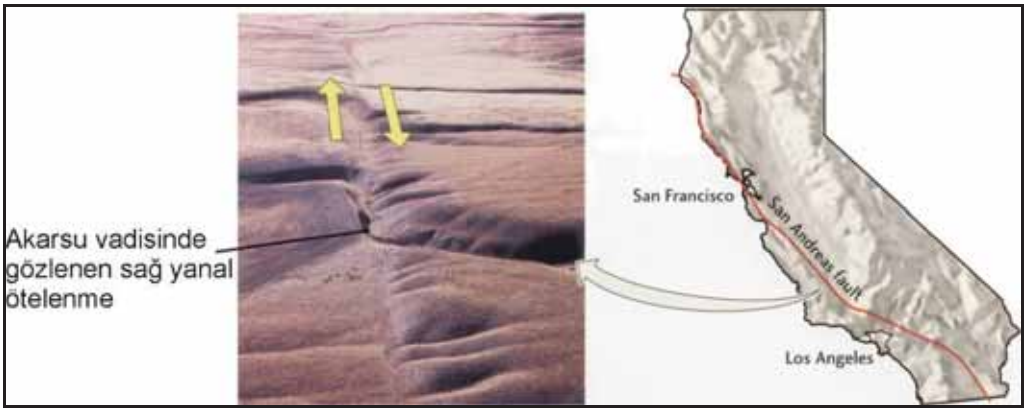
hareket etmesi, yani yükselmesi sonucu gelişirler. Ters faylar çok sayıda düzlemler boyunca gelişirler ve fay düzleminin eğim derecesi büyük olup 35° ilâ 75° arasındadır. Ters faylarda, fay düzleminin eğim derecesi 10° ilâ 35° arasında ise bu tür faya **bindirme** adı verilir. Ters fay düzlemi eğimi, yatay düzlemle 0° ilâ 10° arasında ise **örtü fayı=şaryaj** *(overthrust)* veya **nap** fayı adını alır ve atımı diğerlerinden daha fazla olup yüzlerce km'ye ulaşabilir. Şaryajlar büyük atımlı yataya yakın sürüklenim hareketleridir, yer kabuğu parçalarını kilometrelerce birbirine yaklaştırırlar ve önemli deformasyon geçirmiş dağ kuşaklarına has yapılardır (örn. Alp, Toros ve "Engizek-Nurhak Dağları Tektonik Birlikleri", Yıldırım, 1989; Yiğitbaş, 1989). Diğer bir ifâde ile nap, fay düzleminin yataya yakın olduğu ve yükselen tavan bloğunun, taban bloğu üzerinde çok uzun mesafelerde sürüklenerek ilerlemesi sonucu gelişen özel tür ters faylardır. Bu çeşit faylar ile genellikle yaşlı kayaçlar daha genç kayaçlar üzerinde sürüklenme nedeniyle ezik zonlar oluştururlar ve allokton nitelikte (**allokton**=bulunduğu yerden başka yerde oluşmuş, *allochthonous*) onları tektonik dokanakla örterler. Büyük ve tektonik dokanaklı örtü kütlesi (nap) zamanla yer yer aşınarak aşınma kalıntısı daha ufak birçok parçalara bölünür ki, nap artığı bu küçük parçalara **klip,** *(klippe)* adı verilir. Şaryaj örtüsü ile kaplı bir bölgede erozyon ile şaryaj örtüsünün altından yer yer açığa çıkan ve yüzeylenen daha genç kayaların görüldüğü yerlere ise **tektonik pencere** denmektedir. Örnek olarak İstanbul Karadeniz sahilinde Asya Yakasında Şile, Avrupa Yakasında Boğaziçi Sarıyer-Zekeriyaköy Sırtı civarında görüldüğü gibi Paleozoyik yaşlı grovak çökelleri Üst Kretase yaşlı volkanik birimlerin üzerine sürüklenerek (şaryaj) bunları örtmüş, sürüklenimle her iki formasyonda ezik-ayrışmış-bozuşmuş zonlar oluşmuş ve bu ezik zonların aşınarak oluşturdukları dere yataklarında da zemin yüzeyinde görülen yaşlı Paleozoyik grovakları altında, daha genç Üst Kretase volkanitleri ile sedimentleri açığa (tetonik pencere) çıkmıştır. Bu şaryajın belirlenebilen uzunluğu yaklaşık 100 km amplitüdü ise 5 km'dir. Nap'lar sıkışmalı bölgelerde geliştiğinden kayaçlardaki tabakaların da, ilksel şekillenmeleri kıvrılarak bozulur ve **kıvrımlı yapılar** gelişir. Bu tür fayların yükselen ve kıvrımlanan tavan blokları yeryüzündeki dağ kuşaklarını oluştururlar. Akdeniz kıyıları boyunca yer alan eski okyanusal kökenli ofiyolit karmaşığı içinde yer alan büyük dağ boyutundaki kireçtaşı-mermer bloklarının da içinde yer aldığı Toros Dağları birlikleri ile Güneydoğu ve Doğu

Anadolu'daki yüksek dağlık alanlarda görülen ters fay ve bindirmeler, sıkıştırma ürünü sonucu gelişen yapılardan oluşmaktadır (Yılmaz, Yiğitbaş, Yıldırım, 1987). Bu tür faylı ve naplı yapıların gelişmesine neden olan etken ise Afrika Kıtası'nın kuzeye doğru senede birkaç cm ilerlemeye devam etmesi ve Arap Platformu'nun saat yönü tersi istikametinde Anadolu Kıtası'nı KKB yönünde sıkıştırmasından kaynaklanmaktadır. Bu sıkıştırma, Anadolu'da **doğrultu atımlı faylar** gelişerek, fay zonlarını ve bu aktif fay zonları da "**1. Derece Deprem Bölgeleri**"ni oluşturmuşlardır.

4.6.2. Doğrultu atımlı faylar

Doğrultu atımlı faylar *(strike-slip faults)*, fay düzlemi boyunca blokların birbirlerine oranla yanal yönde hareket etmesi sonucu oluşurlar (Şekil 4.21). Bu tür faylarda bloklar birbirlerine göre sağa veya sola doğru hareket ederler ve düşey atımları çok azdır. Fayın hareket yönü, dere, yol, duvar gibi daha önce ötelenmemiş olan bir doğrusal hattın, faylanma sonrası göreceli olarak hangi tarafa doğru ötelenmiş olduğunun belirlenmesi yoluyla bulunur. Buna göre, gözlemcinin karşısında duran bloktaki obje (yol, duvar vs.) fay hareketinin ardından sağa doğru kaymışsa, söz konusu fay, sağ yanal doğrultu atımlı fay; sola doğru kaymışsa, sol yanal doğrultu atımlı fay olarak adlandırılır.
Yılda yanal yönde yaklaşık 10 mm ilâ 20 mm arası hareket eden Kuzey Anadolu Fayı KAF [*North Anatolian Fault, dextral (right-lateral) strike-slip fault*] ve yılda yanal yönde yaklaşık 10 mm hareket eden Doğu Anadolu Fayı DAF, [*(East Anatolian Fault, sinistral (left-lateral) strike-slip fault*] örnek olarak verilebilir.

Dünyadaki en önemli fay zonlarından birisini; Amerika'da bulunan **San Andreas Fayı**, diğerini ise ülkemizde doğuda Karlıova doğusundan başlayıp, Anadolu'yu Karadeniz kıyısına paralel olarak katederek Marmara Denizi içerisine ve oradan da Ege Denizine doğru kıvrılarak ulaşan **Kuzey Anadolu Fayı** (KAF) oluşturur (Şekil 4.21, 4.22). Her ikisi de sağ yanal doğrultu atımlı nitelikte olan kıtasal transform faylar olup oluşturdukları 7 ve üzerindeki büyüklüğe sahip depremler nedeniyle son derece yıkıcı özelliğe sahiptirler.



Şekil 4.21. Doğrultu atımlı faylara örnek: Sağ Yanal Doğrultu Atımlı *San Andreas* Fayı; *a right lateral strike-slip fault : San Andreas Fault*, (*Press* vd., 2003).



Şekil 4.22. Doğrultu atımlı faylara Türkiye'den örnek: Sağ Yanal Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Sol Yanal Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca batıya kayan Anadolu Bloğu.

Bir fay düzlemi doğada, oluşan gerilmelerin yönü, farklı mukavemetteki kayaçlarda oluşan kırılmaların doğrultusu ile mükemmel paralellik göstermediğinden, bu gerilme sonucu gelişen doğrultu atımlı faylar da genellikle tek bir yönde yanal atım göstermezler. Bu durum fayların bir kısmında değişik miktarlarda gözlenen ikinci nitelikli ve farklı yönlerde (örn. bir doğrultu atımlı fay üzerinde ikincil düzeyde gelişen ters fay bileşenleri) gelişen atımların oluşmasını sağlayabilirler. Odak derinliği genellikle 5 km - 20 km arasında değişen ve sığ odaklı depremleri oluşturan Kuzey Anadolu Fayı, Anadolu boyunca sağ yanal hareketinin yanı sıra, bu harekete eşlik eden ters veya normal fay bileşenli ötelenmeleri ve yanal atımın oluştuğu ana faya birleşen saç örgüsü benzeri görünümlü tâli fayları da birlikte geliştirmiştir. Yanal atımlı

bu faylarda, kayaçların farklı dayanımı nedeniyle fay çizgisi boyunca görülen bükümlerde, dağ boyutundaki kaya blokları birbirlerini sıkıştırır ya da birbirlerinden ayrılacak şekilde serbestleşerek basınç ve serbestleşen bölgeleri oluştururlar. Serbestleşen bölgelerde genellikle baklava biçimli "**çek-ayır havzaları**" *(pull-apart basins)* meydana gelir ve bu yerler yaşam için gerekli bereketli ova ve su havzalarını oluştururlar [örn. Gönen, Manyas, Uluabat, Karacabey, Bursa, Erzincan Ovaları vb.].

4.7. TOPOĞRAFİK - JEOLOJİK HARİTALAR ve KESİTLER

Mühendislik uygulamalarında, tabakalar başta olmak üzere süreksizliklerin derinde nasıl bir geometriye sahip oldukları, en az jeolojik araştırmalardakiler kadar büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, başta inşaat ve harita mühendisliği bölümleri olmak üzere, değişik uygulamalı kollarda, söz konusu yapıların 2 ve 3 boyutlu görüntülerinin birer projeksiyonu olan jeolojik haritalar ve kesitlerinin doğru algılanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece tabaka ve süreksizlikler hakkında edinilen bilgilerin, bir jeoloji-mühendislik jeolojisi harita ve kesitleri üzerine uygulanması ve yapılara olan etkilerinin belirlenmesi mümkün olur.

Her şeyden önce; topoğrafik, jeolojik harita ve kesitlere yönelik olarak bilhassa inşaat ve harita mühendisliği çalışma ve uygulamalarında sıkça karşılaşılan kavramlar vardır. Mühendislik hizmet ve uygulamalarında yer alan bu ortak terimlerin açıklamaları bu bölümün sonunda 4.9'da yer almaktadır.

Yukarıdaki tariflerde de belirtildiği üzere, yeryüzünün veya bir parçasının belli bir orana göre küçültülerek ve belli işaretler kullanılarak yatay düzlem üzerinde gösterilmesine **harita** *(map)* denir. Coğrafik, meteorolojik, topoğrafik ve jeolojik haritalar, değişik amaçlara yönelik hazırlanmış haritalardır. Yeryüzünün plân veya harita gibi yöntemlerle gösterilmesi için kullanılan büyütme ve küçültme oranına **ölçek** *(scale)* denir. Ölçeği ifâde etmek için kullanılan bu oranda, paydanın değeri ne kadar büyük ise ölçek o kadar küçüktür. Ölçekte, Pay'daki değer, Payda'daki değerin harita üzerindeki aynı birimden karşılığıdır. Yani Pay= Haritadaki uzunluk, Payda = Arazi üzerindeki gerçek uzunluktur. Bir haritada; ölçek [çizgisel ve kesir (oransal) ölçek], kuzey

işareti, **lejand** (=simgeler ve açıklamalar; *legend*), enlem/boylam değerleri ve haritanın adı (kullanım amacı, pafta adı) bulunması gerekli elemanlardır.

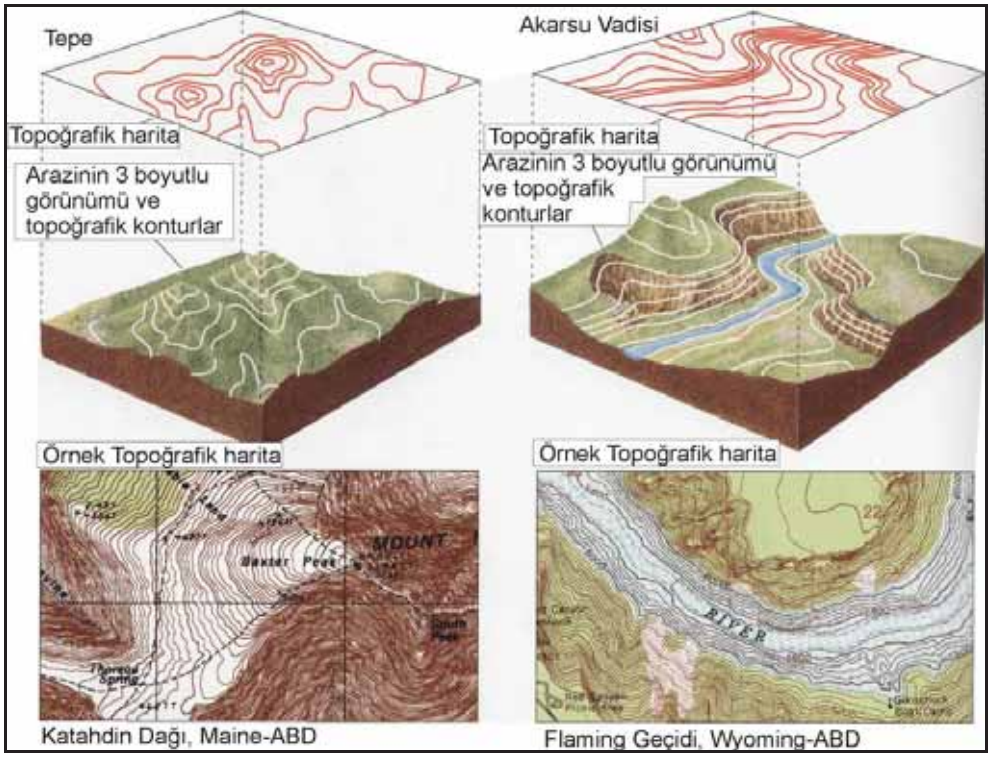
Yeryüzü ile ilgili uygulamalı bilimlerin temel verilerinden birini topoğrafya ve jeoloji haritaları oluşturur. Herhangi bir arazi yüzeyinin veya bölgenin meydana getirdiği fiziki (geometrik) şekil **topoğrafya** *(topography)*; gözlenen arazi şeklinin biçimi ve değişik formları ile ilgili özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi **morfoloji** *(*=şekilbilim, biçimbilim, dış yapı; *morphology)* olarak tanımlanır. Topoğrafya haritaları, bir bölgedeki 3 boyutlu yüzey şekillerini 2 boyutta sunan veri tabanlarıdır. Bu haritalarda 2 boyuta inen yüzey şekillerindeki yükseklik değerleri, yüzey şekillerinin geometrisini ifâde eden yükseklik konturlarının yanına sayısal değer olarak yazılır. Yükseklik boyutu sayısal ortamda ifâde edilip belli bir ölçekle küçültülen topoğrafik haritalar, yeryüzü uygulamaları için kullanılan temel veridir. Diğer bir ifâdeyle, bir arazi parçasının morfolojik (şekilsel) yapısının belli bir ölçek içinde eş yükselti eğrileri yardımıyla yatay düzlem üzerinde gösterilmesi ile elde edilen haritalara **topoğrafik haritalar** (*topographic map*s) denir. Topoğrafik haritalarda, deniz seviyesine *(sea level)* göre yüksekliği göstermeye yarayan çizgilere **eş yükselti eğrileri** (**kontur, münhani çizgisi,** *contour line*) adı verilir. Diğer bir ifâde ile kotları bilinen noktaların aynı kotlu (kesirsiz olanlar) noktaları birleştirerek oluşturulan eğriler eş yükselti eğrileridir. Topoğrafik haritalar üzerinde koordinatlar, yerleşim yerleri, yollar, dere, tepe isimleri, su kaynakları ve bitki örtüsü, uçurum, mağara gibi özel morfolojik yapılar, yazı ve kendilerine özgü simgelerle işaretlenmişlerdir. Topoğrafik haritalar sayesinde yeryüzü şekilleri, ölçekli bir biçimde büro ve arazi çalışmaları için kullanılabilecek hâle gelmektedir. Denizlerde kullanılan ve üzerinde deniz tabanı derinliklerini (**batimetri**, *bathymetry*) gösteren eş yükselti eğrilerinin bulunduğu haritalar **batimetrik harita** (deniz dibi derinlik haritası) olarak adlandırılır. Bu haritaların hazırlanışı, temelde topoğrafya haritaları ile aynıdır. Ancak batimetri haritalarını topoğrafya haritalarından ayıran en önemli özellik, kontur değerlerinin derinlik (negatif) değerlerinden oluşuyor olmasıdır. Türkiye'de, günümüzde orta ve küçük ölçekli topoğrafik haritalar, Türk Silahlı Kuvvetleri, Harita Genel Komutanlığı tarafından yapılmakta, 2000 yılından itibaren de kabartmalı topoğrafik haritalar üretilmektedir. Jeoloji mühendislerince bir arazi yüzeyinde çalışılarak, topoğrafik haritalar üzerinde, arazide yer alan jeolojik

birimlerin ve sınırlarının ayırtlanıp, yapısal unsurların simgeler ve ilgili açıklayıcı bilgiler (lejand; *legend*) ile çizilip gösterilmesiyle oluşturulan haritalara **jeolojik harita** *(geological map)* adı verilir. Arazi gözlemlerine dayanan ve üzerinde jeolojik bilgiler işaretlenmiş olan haritalar olarak tanımlanan jeolojik haritalar, topoğrafik haritaları taban haritası olarak kabul eder. Jeoloji haritalarında, jeolojik birimlere ait sınırlar, yapısal unsurlar, tabaka ve diğer süreksizliklerin doğrultu ve eğim *(strike and dip)* değerleri detaylı olarak işlenmektedir.

Topoğrafik ve jeolojik haritalar kullanılarak, mühendislik jeolojisi haritaları, hidrojeoloji haritaları ve benzeri özel amaçlı haritalar oluşturmak da mümkündür. Temel, tünel, baraj, yol inşaatı gibi mühendislik çalışmalarında; heyelân, bozunma ya da yerleşime uygunluk gibi belirli bir amaca yönelik olarak yapılan özel amaçlı jeoloji haritalarına **mühendislik jeolojisi haritaları** *(engineering geology maps)* adı verilir. Mühendislik jeolojisi haritaları özel amaçlı jeoloji haritaları olduklarından, bu haritalarda sahanın jeolojik unsurlarının tümünün gösterilmesi yanında, incelenen yöredeki kayaçların amaca yönelik olarak (zemin+kaya) jeomorfolojik (=yerşekil), hidrojeolojik, jeo-mühendislik özelliklerin ya da gerektiğinde bozunmanın derecesinin vb. tanımlandığı haritalardır. Bir bölgede yapılacak olan herhangi bir uygulama (örn. bir yapının inşaatı) için, öncelikle bölgenin topoğrafik ve jeolojik özelliklerinin yapılacak uygulamaya uygunluğu araştırılır. Meselâ, bir baraj veya tünel inşaatında, barajın kurulacağı uygun alanın seçiminde, kurulacak barajın zemin problemleri ve su tutabilme kapasitesi en başta vâdi morfolojisinin ve bölgenin jeolojik ve tektonik yapısının iyi bilinmesinden geçer. Bu amaçla topoğrafik ve jeolojik harita yapmak, inşaatın yapılacağı alanlarda topoğrafik ve jeolojik kesit *(geological cross section)* almak birinci derecede önem kazanmaktadır. Topoğrafik harita üzerinden bir yüzey kesit (profil) almak için:

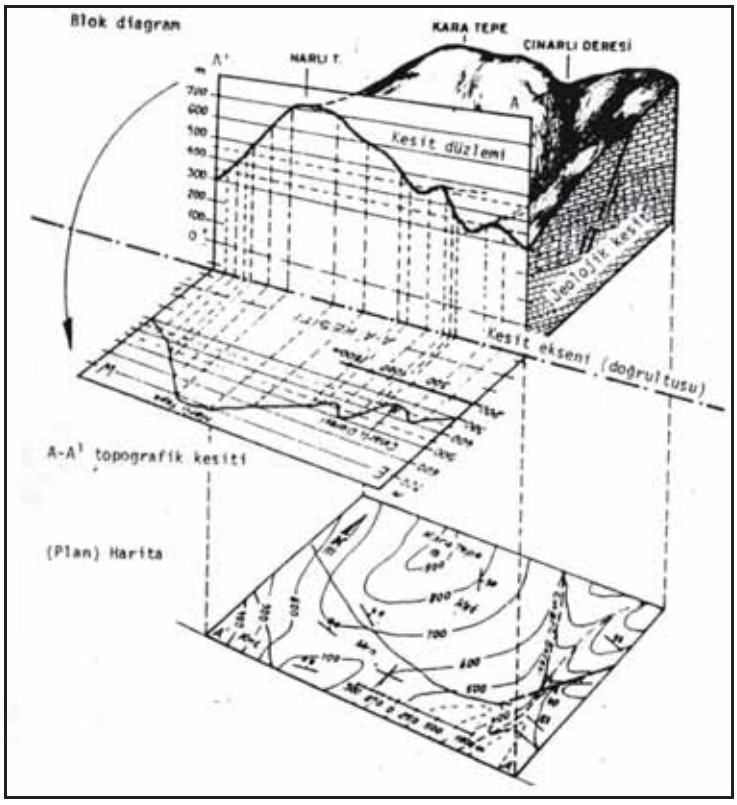
1. Kesitin alınacağı hattı kesen topoğrafik konturlar *(topographic contours)* bir kâğıt şeride, yükseklik değerleri ile birlikte işaretlenir.

2. Kâğıt şerit üzerindeki kesişme noktaları, yükseklik değerlerine göre seçilmiş bir ölçekte, milimetrik kâğıda işlenir ve noktaların birleştirilmesi sonucu profil elde edilir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Topoğrafik konturlar ve morfolojik anlamı.

Oluşturulan topoğrafik kesit üzerine (Şekil 4.24), jeolojik bilgilerin de taşınması ve yüzeyden alınan bu bilgiler ışığında yeraltı jeolojik yapısının yorumlanarak oluşturulabilmesi için:

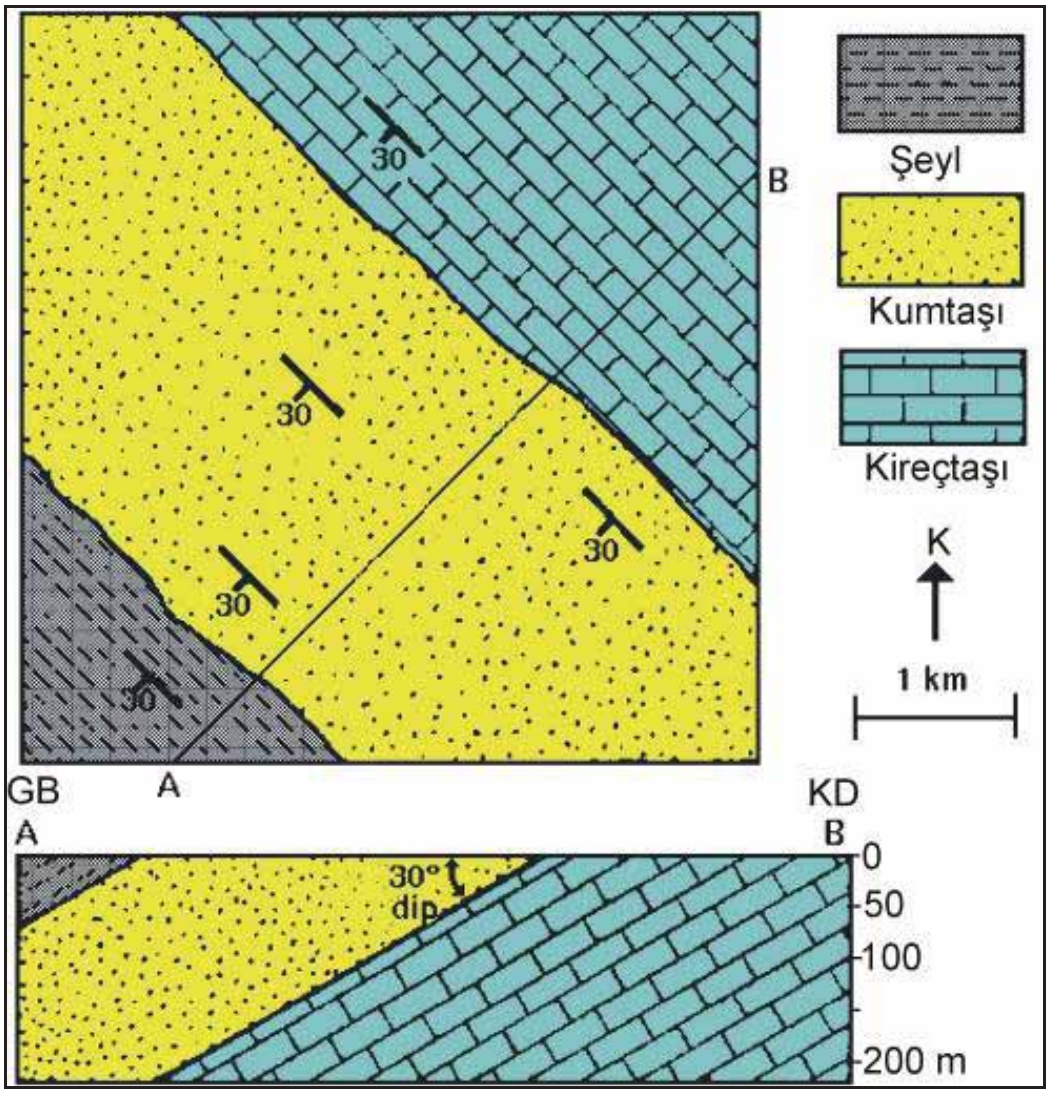


Şekil 4.24. Topoğrafik harita üzerinden kesit alınması.

1. Alınan topoğrafik kesit hattı boyunca, bu defa aynı hattı kesen jeolojik formasyon sınırları kâğıt şeride işaretlenir.

2. Jeolojik haritadan, kâğıt şerit üzerinde işaretlenen jeolojik birimlerin sınırları, milimetrik kâğıda aktarılır. Jeolojik sınırlar, topoğrafik kesit üzerine düşey olarak iz düşürülerek jeolojik sınırların profil (kesit, yandan görünüş) üzerindeki yerleri belirlenir.

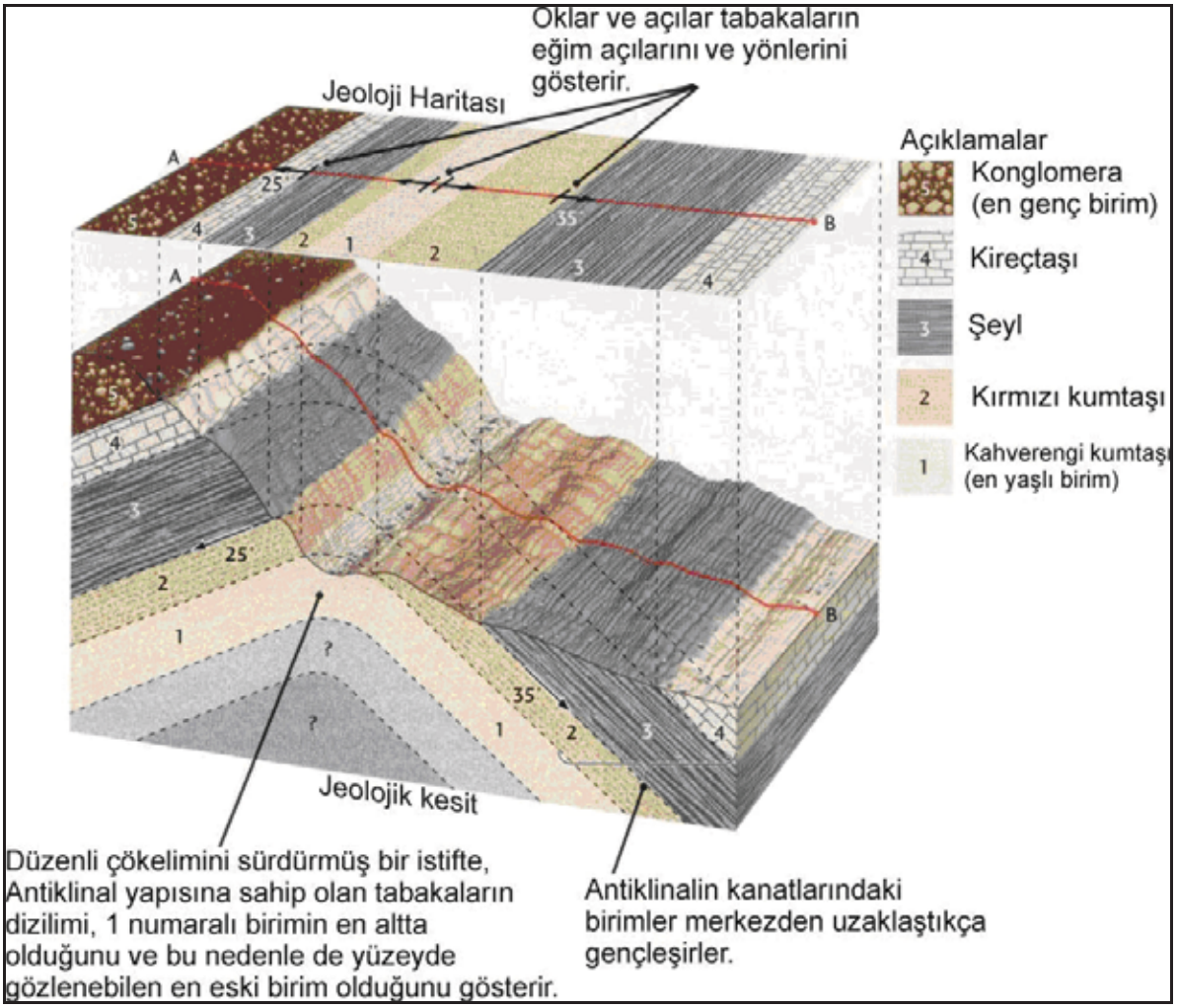
3. Farklı çökelleri ayırt eden jeolojik birimlerin sınırlarının zemin yüzeyinden derinlere doğru devamlarının belirlenmesi amacıyla, topoğrafik kesit üzerinde belirlenen jeolojik sınırları oluşturan işaretlenmiş noktalardan bir açı ölçer yardımıyla, jeolojik haritada verilen eğim yönü ve eğim derecesi (doğrultuya dik alınan kesitlerde değiştirilmeden) kesite aktarılır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Bir jeoloji haritası üzerinde tabaka doğrultularına dik bir hat boyunca jeolojik kesit alınması.

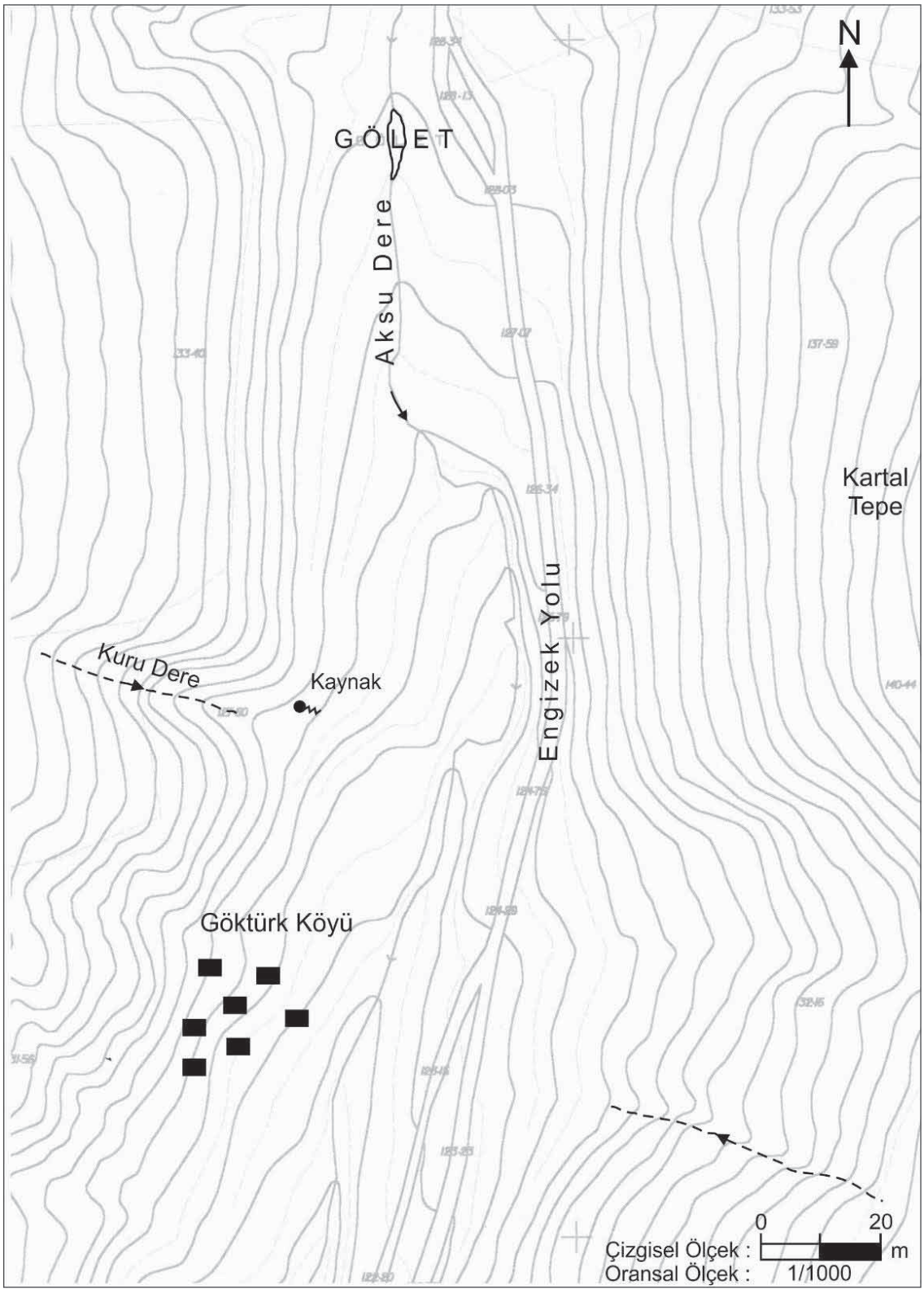
4. Jeolojik birimlerin tabaka doğrultu ve eğimlerine göre derinde oluşturabilecekleri muhtemel kıvrımlar (antiklinal-senklinal) ve jeoloji haritasında kesit doğrultusunu kesen (varsa) faylar ile jeolojik birimlerin birbirleri ile olan alt-üst ilişkileri dikkate alınarak ünitelerin derine, yerin içine doğru olan uzanımları belirlenerek kesite çizilir.

Şekil 4.26'da yeryüzünde mostra vermiş birimlerin tabaka doğrultu ve eğimleri ile yaşlıdan gence doğru olan dizilimleri, oluşturdukları antiklinal yapısı ve bunun bir jeoloji haritası üzerindeki izdüşümü gösterilmektedir.

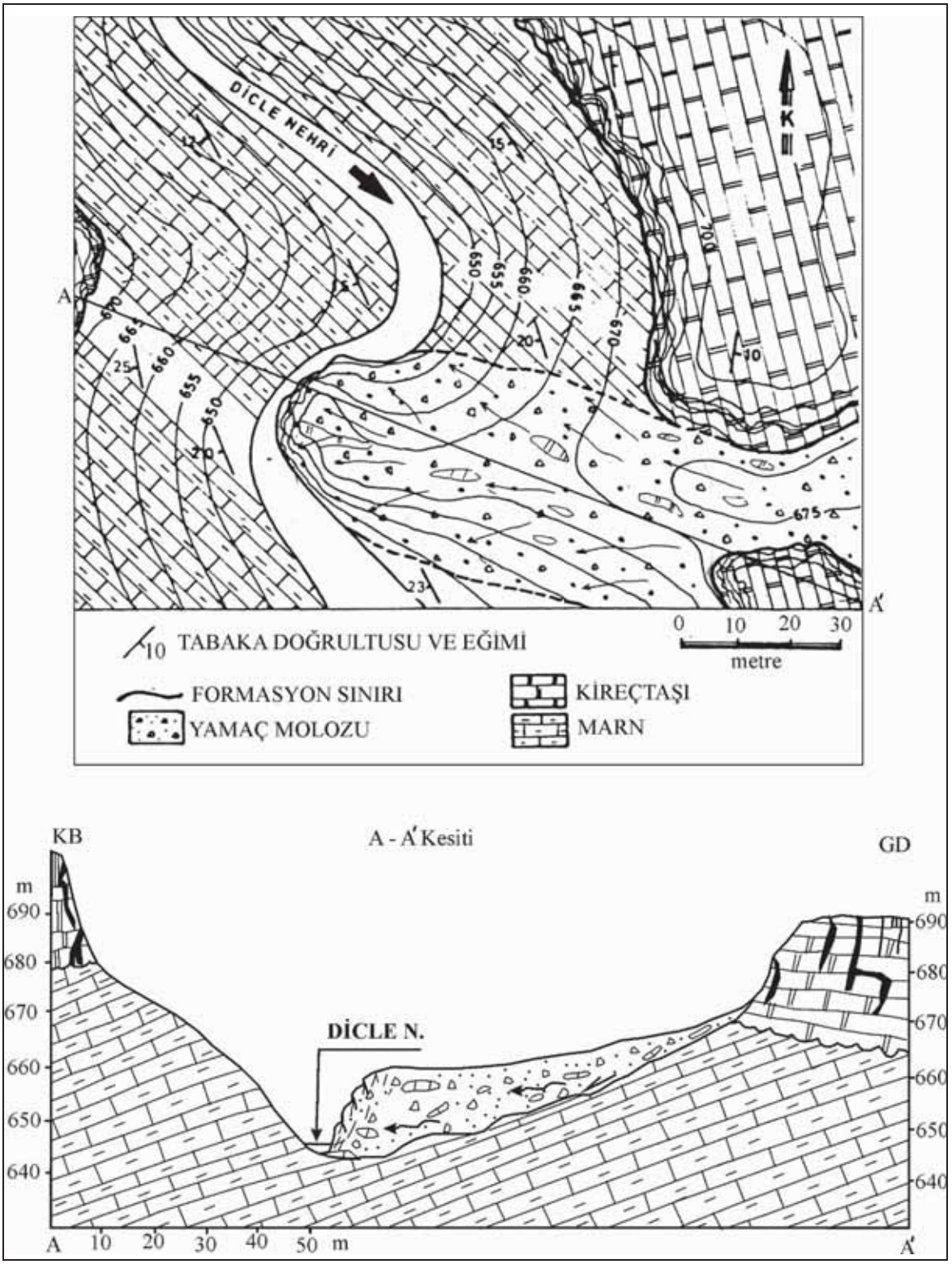


Şekil 4.26. Jeolojik harita ve kesitine ait bir örnek.

4.8. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:



4.8.1. Topoğrafik Harita Örneği.



4.8.2. Jeoloji Haritası ve Kesiti.

4.8.3. Bir Jeolojik Zemin Kesitinde Stratigrafik Dizilimin Değerlendirilmesi:

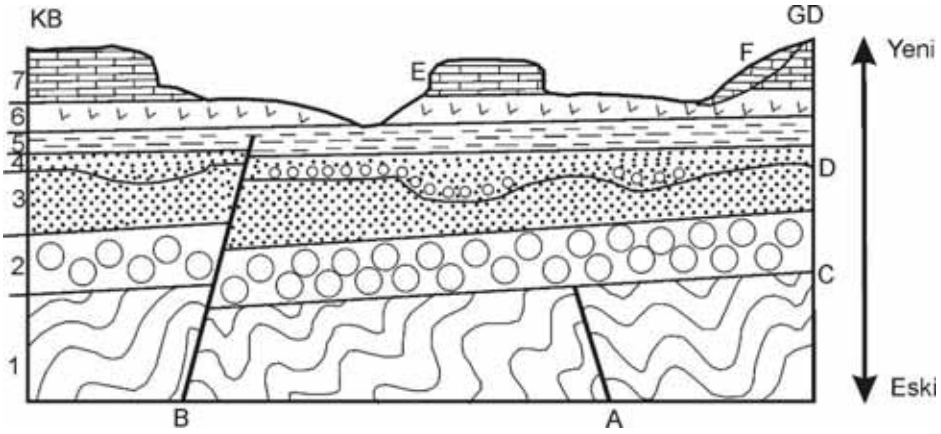
Aşağıda Örnek Şekil 4.8.3'de verilen jeolojik zemin kesitinde, sedimenter kayaçlar alttan üste doğru sırasıyla ünite 1'den ünite 7'ye kadar

sıralanırlar. Bu sıralanımda jeolojik geçmişe bakıldığında, yatay tabakalara sahip bu çökel dizisinde en altta bulunanı en yaşlı, en üstte bulunanı ise en genç çökelleri oluşturur. Ancak yine aynı kesitte görüldüğü gibi söz konusu birimlerin çökelmeleri sırasında “A” ve “B” fayları; “C”, “D” ve “E” erozyonal dönemleri ve güncel “F” heyelânı gelişmiştir. Söz konusu olguların birbirlerini kesmeleri ve örtmelerinden yararlanarak jeolojik kesitte görülen stratigrafik dizilimin ve bağıl yaş ilişkisinin açıklanabilmesi mümkündür.

Buna göre bölgede ilk olarak 1 numaralı ünite (çökel dizisi) çökelmiş, söz konusu ünitenin deformasyona uğrayıp kıvrımlı bir yapı kazanmasının ardından gelişen “A” fayı, 1 numaralı üniteyi kesmiştir. Bu olayların ardından 1 numaralı üniteyi ve “A” fayını kesmiş olan “C” erozyonal dönemi başlamıştır. 1 No’lu ünitenin erozyon ile oluşmuş üst yüzeyini oluşturan “C” açısal diskordans hattı üzerine, transgresif olarak 2 No’lu ünite çökelmiştir. Bu durumda “A” fayı 1 numaralı üniteyi kestiği için bağıl olarak bu üniteden genç, 2 No’lu ünite tarafından örtüldüğü için bu üniteden yaşlıdır.

2 No’lu ünitenin çökelme dönemi, herhangi bir kesikliğe uğramadan devam etmiş ve 3 numaralı ünite de çökelebilmiştir. 2 ve 3 numaralı ünitelerin çökelmeleri sonrasında ortamın karasallaşması sonucu tekrar aşınma (erozyonal) dönemi başlamış, 3 No’lu ünitenin üst seviyesi aşınarak bir diskordans düzlemini oluşturan “D” hattı gelişmiştir. Kesikliğe uğrayan bu çökelme dönemini takiben oluşan engebeli erozyonal yüzey üzerine 4, 5, 6 ve en genç 7 numaralı üniteler herhangi bir zaman veya çökelme kesikliğine uğramadan düzenli olarak (konkordan) çökelmiştir. Ancak 5 No’lu ünitenin sedimentasyonu (çökelim) sırasında “B” fayı aktivite kazanmış ve ilk 4 üniteyi kesmiştir. Bu nedenle, “B” fayı bu ünitelerin tamamından gençtir. Ancak bu fay 5 numaralı ünite içerisinde aktivitesini kaybetmiş ve bu ünitenin alt sınırını keserken üst sınırını etkilememiştir. Bu nedenle, “B” fayı, bağıl olarak 5 numaralı ünite ile yaşıttır, ancak bu ünitenin çökelme işlemi tamamlanmadan aktivitesini yitirmiştir. 5, 6 ve 7 numaralı ünitelerinin çökelme işleminin ardından yükselerek tekrar karasal ortama geçen bölgede tüm birimleri aşındıran “E” erozyonal dönemi başlamıştır. Erozyon 6 ve 7 numaralı üniteleri aşındırmış, ancak 5 numaralı üniteyi güncel durumda henüz aşındıramamıştır. Söz konusu erozyon, mevcut güncel topoğrafyayı oluşturmuştur. “E” erozyonu gibi güncel nitelikli başka olgu ise “F” heyelânıdır. “F” heyelânı, en son çökelen

6 ve 7 numaralı ünitede meydana gelmiştir. Heyelânın, “E” erozyonu tarafından oluşturulan yamacın üzerinde meydana gelmiş ve henüz aşındırılmamış olması, söz konusu heyelânın bu alandaki en güncel ve genç aktiviteyi oluşturduğunu göstermektedir. Ancak devam etmekte olan “E” erozyonu, zamanla “F” heyelânı malzemesini aşındırarak yok edeceğini söylemek mümkündür.



4.8.3. Bir çökel dizisinin jeolojik geçmişindeki bağıl yaş ilişkisi.

4.8.4. MAKALE: İstanbul’un jeolojisi, güncellenmiş jeoloji haritası, stratigrafisi ve Tersiyer çökellerinin tipik geoteknik parametreleri (Yıldırım vd., 2010):

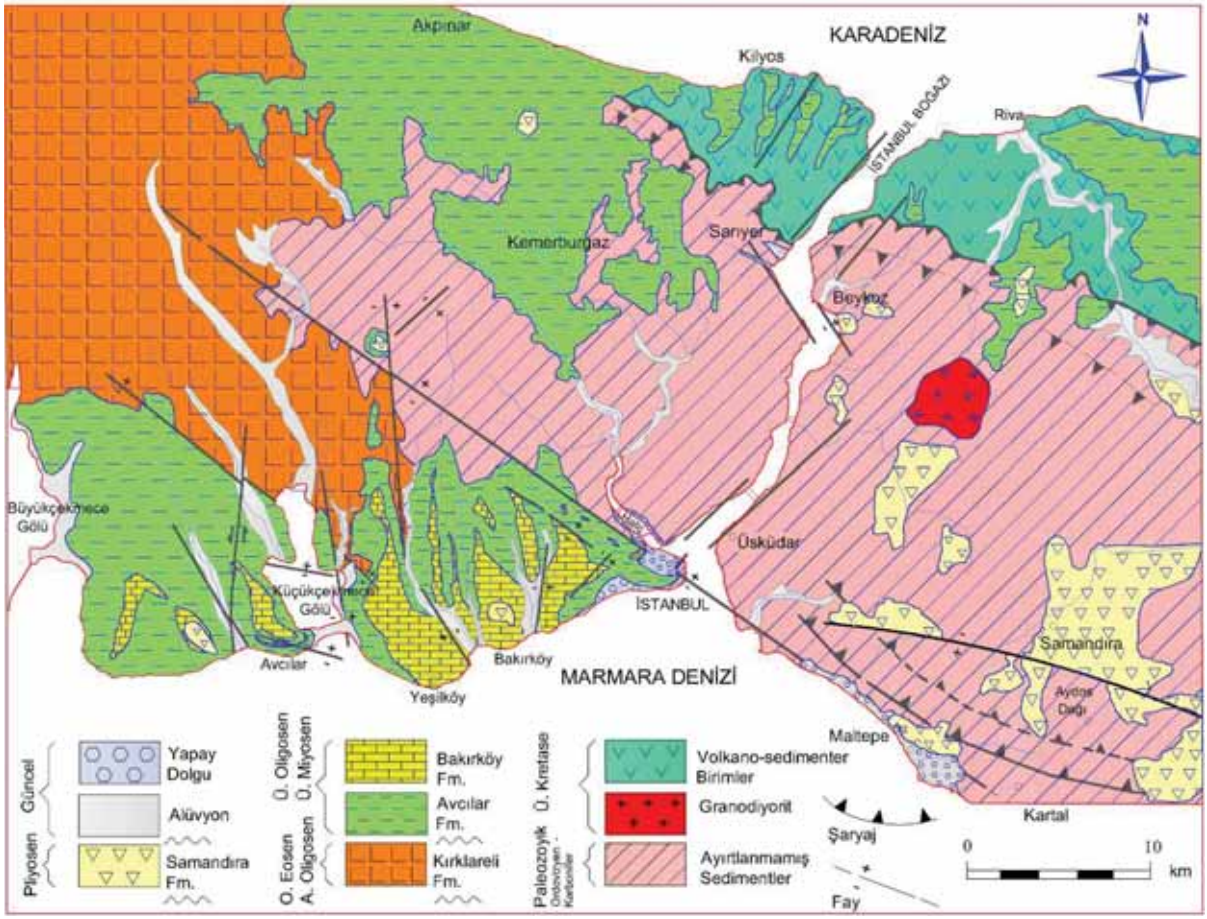
İstanbul’un Tarihî Yarımada’yı oluşturan Avrupa Yakasında görünür temelde Alt Karbonifer yaşlı, kumtaşı (grovak), silttaşı ve kiltaşlarından oluşan *fliş fasiyesinde çökelmiş ve Trakya formasyonu olarak adlandırılan grovak-şeyl-silttaşı-kiltaşı ardalanmalı istifinden oluşan çökel kayalar yer almaktadır (4.8.4.1). Paleozoyik yaşlı grovaklar ile daha alt seviyelerini oluşturan kireçtaşı, çört, kuvarsit ve arkozik kumtaşları çökelleri, İstanbul’un Karadeniz sahil kesimlerinde (örn. Sarıyer ve Şile) Üst Kretase yaşlı volkanik birimler üzerine sürüklenmiştir (şaryaj). Şaryaj uzunluğu yaklaşık 100 km, sürüklenim genişliği ise 5 km’ye varmaktadır. Üst Kretase yaşlı birimler altta konglomeralar ile başlayıp üste doğru gri-yeşil renkli kumtaşı-şeyl (Sarıyer fm. Bozhane üyesi= Karadeniz dağları-Yemişliçay fm. eşdeğeri), daha üstte bazaltik andezitik lav ve yaygın gözlenen aglomeralarla (Sarıyer fm. Garipçe üyesi, Keskin vd. 2003) devam edip en üst seviyeleri de volkanik kökenli kırıntılılar (Sarıyer fm. Kısırkaya üyesi= örn. Kocaeli Yarımadası ve Karadeniz sahillerinde görülen ve eşdeğerleri olan Maestrichtiyen yaşlı çörtlü kalkerler) devam etmektedir. Üst Kretase yaşlı bu volkano-sedimenter birimler, birincil konumları Paleozoyik (Devoniyen) yaşlı temel üzerine (transgresif, örn. Adapazarı kuzeyi-Kandıra arası) diskordan olarak oturmaktadır.

***[Fliş** (*flysch)* **:** Türbiditik akıntılarla derin deniz dibinde kıta yamacında yelpaze şeklinde çökelmiş kumtaşı-şeyl-kiltaşı ardalanmalı istif**]**.

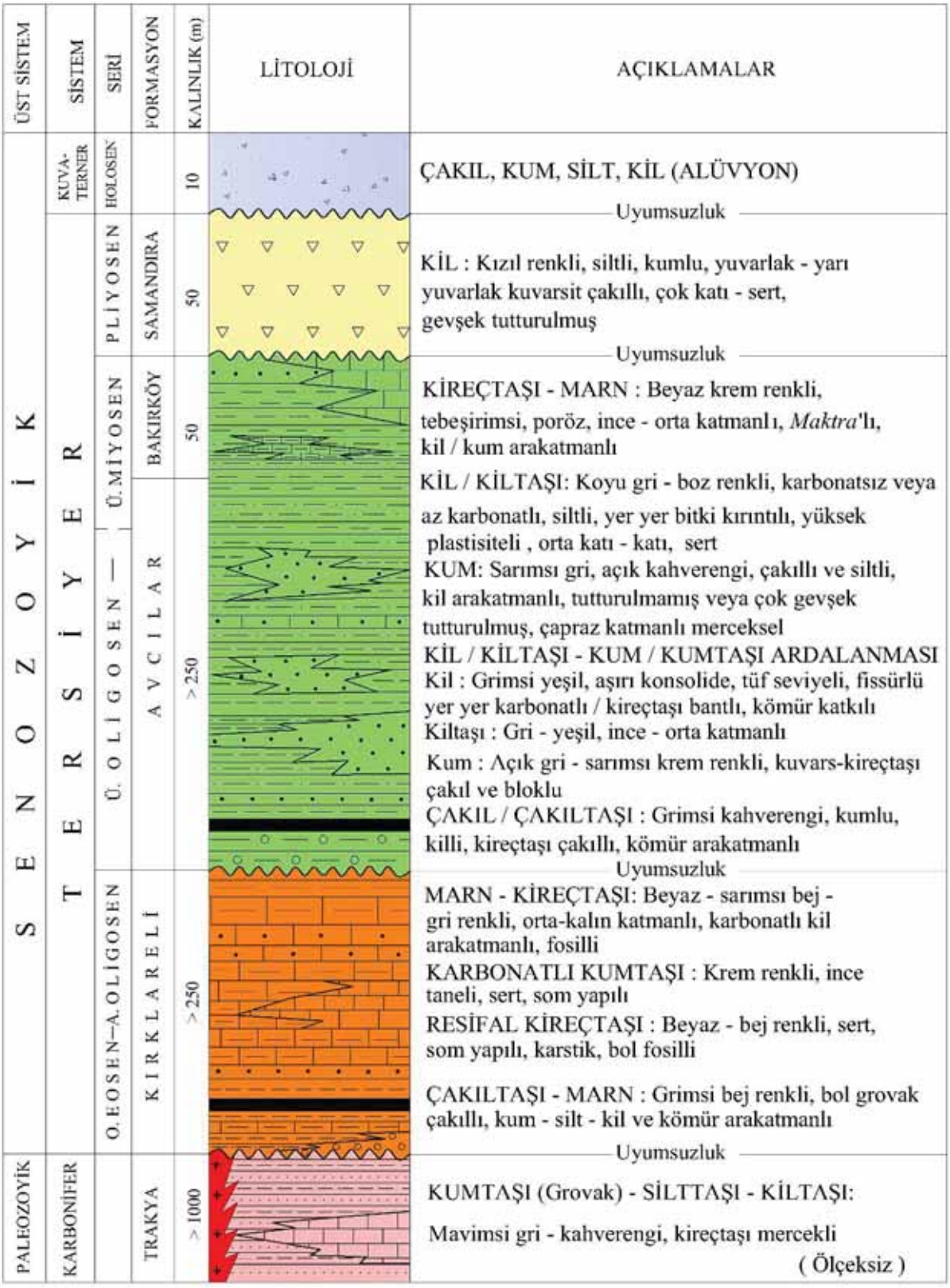
İstanbulun güneyinde Tarihi Yarımadanın bulunduğu kesimlerde ise Paleozoyik yaşlı grovaklar üzerine Orta Eosen-Alt Oligosen döneminde hâkim litolojisi marn-kireçtaşı olan Kırklareli formasyonu (Soğucak ve Ceylan formasyonları) diskordan çökelmiştir. Bölgede gerçekleştirilen arazi gözlemlerine göre, Trakya ve Kırklareli formasyonu üzerine ise hakim litolojisi gri-yeşil renkli aşırı konsolide kil ve

kömür ara katkılı killerle ardalanan kum merceklerinden oluşan “Avcılar formasyonu” diskordan oturmaktadır [Örnek Şekil 4.8.4.2 (Yıldırım vd., 2010)].

Kalınlığı 250 m’yi aşan ve Üst Oligosen döneminde transgresif olarak bir taban çakıltaşı ile başlayan Avcılar formasyonu, üste doğru kum/kumtaşı-kil/kiltaşı ardalanmasından oluşmaktadır (Yıldırım vd., 2010). Gri yeşil tonlardaki renklerle tanınabilen Avcılar formasyonu istifi, daha üst seviyelerde çoğunlukla karbonat kayalarından oluşan ve yer yer 50 m kalınlığa ulaşan beyazımsı krem renkli marn, *Maktra* fosilli (Küfeki Taşı) Bakırköy formasyonuna dereceli olarak geçmektedir (Şekil 4.8.4.2 ve 4.8.4.3). Avcılar formasyonu, başta Avcılar, Büyük/Küçük Çekmece, Güngören İlçeleri olmak üzere, İstanbul’un tarihî Yarımadası ve Asya Yakası Karadeniz kıyısında geniş alanları kaplamaktadır. Bakırköy formasyonu ve diğer daha yaşlı formasyonlar üzerine, kızıl-koyu kahverengi, çok sıkı, iri yuvarlak kuvars çakıl katkıları içeren, kumlu ve siltli killerden oluşan daha genç (Pliyosen) karasal ortam ürünü Samandıra formasyonu olarak adlandırılan akarsu çökelleri diskordan olarak örtmektedir (Yıldırım vd. 2010; Şekil 4.8.4.2 ve 4.8.4.4). Belirtilen tüm formasyonları, en üstte yer alan ve dere yataklarını oluşturan güncel alüvyal çökeller diskordan örterler (Şekil 4.8.4.5). Formasyonların geoteknik parametreleri ise Tablo 4.3’de verilmiştir. Özellikleri ve sınırları doğru tanımlanarak yapılan jeolojik haritalarda yer alan formasyonlar, parsel bazında belirlenen geoteknik etütlere ışık tutacak ve mühendislik özelliklerinin de hesaplarda karıştırılması engellenebilecektir. Ayrıca zeminlerde gerçekleştirilecek mühendislik faaliyetlerinde daha doğru büyüklükler kullanılması sağlanabilecek, mikrobölgeleme çalışmalarında ve yerleşime uygunluk haritalarının üretiminde de daha doğru sonuçlara ulaşılacaktır.



Örnek Şekil 4.8.4.1) İstanbul ve çevresinin güncellenmiş jeoloji haritası (Yıldırım vd., 2010).



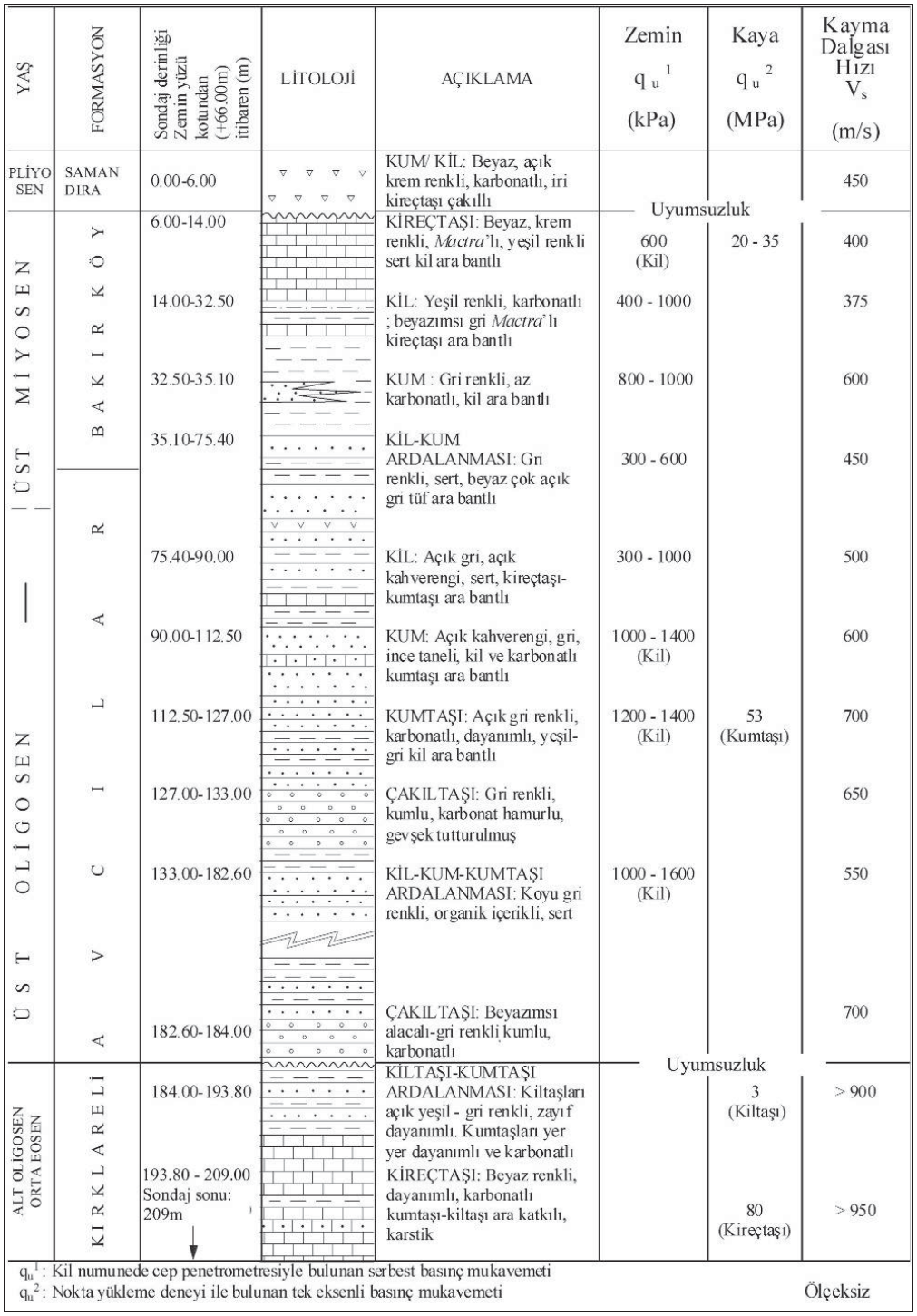
Örnek Şekil 4.8.4.2) İstanbul ve yakın çevresi Tersiyer çökellerinin güncellenmiş stratigrafik sütun kesiti (Yıldırım vd., 2010).



Örnek Şekil 4.8.4.3) Avcılar formasyonu. Bakırköy formasyonu kireçtaşlarıyla dereceli geçişli ve kireçtaşlarının altında yer alan gri renkli ve kumtaşı ara katkılı tipik grimsi yeşil rengiyle tanınabilen orta katı-katı ve sert kıvamlı Avcılar formasyonu killeri (29.03.2007).



Örnek Şekil 4.8.4.4) Bakırköy formasyonu (Ü. Miyosen) çökelleri üzerine diskordan oturan Samandıra formasyonu (Pliyosen) çökelleri. Avcılar formasyonu killeri üst seviyelere doğru Bakırköy formasyonuna ait gri kil ara katmanlı beyazımsı krem renkli kireçtaşlarına normal geçiş göstermekte üzerlerine ise zemin yüzeyine kadar kızıl renkli çakıllı killerden oluşan ve 20 m kalınlığa ulaşan Samandıra formasyonu (önde yer alan sondaj sandığı karotları) çökelleri diskordan oturmaktadır. Çok nadir görülen bu iki formasyon ilişkisi, 29.03.2007 tarihinde birinci yazar tarafından Ambarlı Limanı doğusunda yer alan lojmanlar civarında yapılan sondajlarda tespit edilmiştir **[**IBB-OYO sondajı No: 820 244 Koordinatları: X (N-S)= 4538397.60; Y (E-W)= 389697.21; Sondaj noktası kotu Z (râkım) = +13,00 m**]**.



Örnek Şekil 4.8.4.5) İstanbul, Avrupa Yakası, Küçük Çekmece zemin etüt sondajı logu. Bir zemin (derin sondaj: 209 m) etüt sondajı logu ve birimlerin mühendislik özellikleri. Sondaj, Küçükçekmece ilçesi belediye binası (E5 Karayolu) bitişiğinde 2006 yılında yapılmış olup sondaj logu birinci yazar tarafından hazırlanmıştır. Sondaj yeri: X (N-S): 4541271.33; Y (E-W): 398464.07; Z (râkım=kot: +68,00 m).

209 m derinliğe ulaşan D 930279 No'lu bu sondaj, İBB tarafından Mart 2007 tarihinde zemin etüt amaçlı yapılan ilk derin sondajlardan birisini oluşturmaktadır. Sondajda, jeofizik (PS *logging*) ölçümlerden bulunan ve özellikle dinamik çalışmalarda çok önemli bir parametre olan, bilinmesi durumunda zemin veya kaya ortamının birçok geoteknik özelliği hakkında fikir veren V_s (kayma dalgası

hızı) değerleri, zemin yüzeyinden itibaren, kalınlıkları ne olursa olsun Bakırköy formasyonu ve onun altında yer alan Avcılar formasyonunun tamamı boyunca, 760 m/s'den daha düşük çıkmaktadır. Mühendislik açısından da litolojiye bakılmaksızın ana kaya olarak kabul edilen değer ise yine 760 m/s'dir. Bu değerlere jeolojik tanımlamada sağlam kaya olarak kabul edilen Kırklareli veya Trakya formasyonu litolojilerinin rastlanıldığı derinliklerden itibaren ulaşıldığı görülmüştür. Dolayısıyla, mühendislik ve jeolojik açıdan tanımlaması yapılan sağlam kaya ortamının başladığı derinlikler (zemin yüzünden 184 m derinlikte) birbirleriyle uyuşmaktadır.

Tablo 4.3. İstanbul Tersiyer çökellerinin tipik geoteknik parametreleri.

Formasyon Adı / Katmanlar		RQD (%)	γ_n (kN/m^3)	e	w (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	k (cm/s)	C_c	m_v (m^2/kN)	q_u[1] (MPa)	SPT N	V_s (m/s)
Samandıra		-	-	-	15-25	24-55	13-28	11-27	-	-	-	0.15-0.3	13-45	200-300
Bakırköy	Kireçtaşı	≤15	19.5-23.5	0.05-0.3	5-10	-	-	-	-	-	-	2-50	>50	300-500
	Aşırı Konsolide Kil	-	~18.0	-	25-30	45-70	15-25	30-45	10^{-8}	0.16	$2.7x10^{-4}$	0.3-0.6	20-30	250-300
Avcılar	Aşırı Konsolide Kil	-	18.0-20.0	0.4-1.0	15-40	40-100	20-40	20-60	10^{-7}-10^{-8}	0.15	$2.5x10^{-4}$	0.2-0.6	>30	300-600
	Organik İçerikli Kil	-	16.5-19.5	1.0-1.6	45-60	99-110	40-50	60-65	-	0.19	$3.5x10^{-4}$	0.08-0.2	15-30	250-300
	Kum Ara Katmanları	-	18.5-19.5	-	15-30	-	-	-	-	-	-	-	>30	300-400
Kırklareli	Kireçtaşı	≤25	18.5-23.5	~0.25	-	-	-	-	-	-	-	3-80[1]	>50	>760

[1]Nokta Yükleme Deneyi ile elde edilen değerler

γ_n: Tabii birim hacim ağırlık; e: Boşluk oranı; w: Su muhtevası; w_L: Likit limit; w_P: Plastik limit; I_P: Plastisite indisi; k: Permeabilite; C_c: Sıkışma indisi; m_v: Hacimsel sıkışma katsayısı; q_u: Serbest basınç mukavemeti; V_S: Kayma dalgası hızı

4.9. Mühendislik Çalışma ve Uygulamalarına Yönelik Sıkça Karşılaşılan Bazı Kavramlar, Terimler ve Deyimler:

Ada: Dört tarafı sokak, cadde, meydan, demiryolu, akarsu vb. doğal ya da yapay engellerle çevrilmiş bir veya daha fazla parselden (yapılı veya yapısız) oluşan arazi parçasıdır.

Aplikasyon (uygulama): Haritadaki ya da plândaki bilgilerin zemine işaretlenmesi için yapılan işlemlerin tümüdür. Diğer biri ifâde ile bir plân ya da projenin uygulanacağı yer üzerinde, iki (x, y) ya da üç (x, y, z) boyutlu olarak belirlenmesi, yol ekseninin araziye uygulanmasıdır.

Avan proje: Projenin uygulamadan önceki, kesinleşmemiş hâli. Ön tasarı, ön proje.

Ayrık düzen: Hiçbir yanından komşu binalara bitişik olmayan yapı düzenidir.

Bina derinliği: Binanın ön cephe hattı ile arka cephe hattının en uzak noktası arasındaki dik hattın uzaklığıdır.

Bina yüksekliği: Binanın kot aldığı noktadan saçak seviyesine kadar olan mesafedir **(Şekil 4.9.1)**.

Bitişik düzen: Bir ya da birden fazla komşu parsellerdeki binalara bitişik olan yapı düzenidir.

Blok düzen: İmar plânı ya da ilgili yönetmelikte cephe uzunluğu, derinliği ve yüksekliği belirlenmiş tek yapı kütlesinin bir ya da birden fazla parsel üzerine oturduğu bahçeli yapı düzenidir.

Bodrum kat: Zemin katın altındaki katlardır.

Çap: Bir parselin ve üzerindeki binaların zemindeki konumunu, sınırlarını ve boyutlarını göstermek için hak sahibine verilen belgedir.

Düzeltme: Hata ile ters işaretli olup gerçek değer ya da kesin değerden ölçü değerinin çıkartılması ile bulunur.

Fizibilite: Bir yatırım projesi uygunluğu için yapılan araştırmalar.

Gabari (yükseklik sınırı): Yasal bir yapının ruhsat verilen en çok yüksekliği veya tünel köprü gibi karayolu yapılarının uzunluk, genişlik ve yüksekliklerini belirleyen ölçüler.

Harita: Yeryüzünün ya da bir parçasının, belli bir orana göre küçültülerek düzlem üzerine çizilen plândır. Harita; bir arazi parçasının belli bir projeksiyon sistemine göre küçültülerek belirli ve benzer işaretlerle gösterilmesidir şeklinde de tarif edilebilir. Doğruluk, noksansızlık, amaca uygunluk, açıklık ve anlaşılabilirlik, kolay okunabilirlik ve estetik, haritalarda aranılan belirli özelliklerdir. Haritalar kullanılma amaçlarına göre; orijinal haritalar (topoğrafik haritaların tamamını teşkil eden haritalar); coğrafya haritaları (atlas, duvar haritaları gibi, küçük ölçekli haritalar); özel amaçlı haritalar (topoğrafik haritalar esas alınarak

üzerlerine arzu edilen bilgilerin aktarıldığı haritalar, örn. jeoloji, mühendislik jeolojisi haritaları); kadastro haritaları (daha ziyade parsellere ilişkin meydana getirilen haritalar olup topoğrafik detayların fazla aranmadığı haritalar) olarak tasnif edilirler.

Hata: Bir büyüklüğün ölçü değeriyle kesin değeri arasındaki farktır. Ölçü değerinden, gerçek değer ya da kesin değerin çıkartılması ile bulunur. Ölçüm, hesap ve çizim işlerinde yapılabilecek, kabul edilebilir en çok hata miktarına da **hata sınırı** (tolerans sınırı) denilir.

Hava fotoğrafı: Plânlamayı kolaylaştırmak üzere haritalama, parselleme, bilgi toplama ve çeşitli kriterlere göre yorumlama amaçlarıyla belli bölgelerin ve alanların havadan çekilen fotoğrafları.

İmar adası: İmar plânlarında, etrafı yollarla çevrili bir ya da daha fazla imar parselini kapsayan arazi parçasıdır.

İmar çapı: Bir arsanın imar plânına ve imar yönetmeliğine göre nasıl kullanılabileceğini bildiren, belediyece düzenlenerek, isteği üzerine arsa sahibine belirli bir harç karşılığı verilen çaplı belgedir. Bu belgede, imar parselinin veya yapılacak binanın boyutları, yola uzaklığı, kat sayısı vb. bilgiler yer alır.

İmar parseli: Üzerinde yapı kuralları uyarınca yapı yapılmasına ruhsat verilen ve yapı yapmaya elverişli, altyapılı toprak parçası.

İmar plânı: Bir şehrin doğal ve sosyal yapısını veri olarak alan, bu veriler arasındaki mekân ilişkilerini ve gelecekteki arazi kullanımına ait esasları gösteren, standart topoğrafik kadastral haritalar üzerine çizilen plânlardır. İmar plânları, nâzım imar plânı ve imar uygulama plânı olmak üzere iki gruba ayrılır.

İmar uygulama plânı: Hâlihazır ve kadastral durumu gösteren haritalar üzerine, nâzım imar plânı esaslarına göre çizilen, çeşitli bölgelerdeki yapı adalarını, yollarını, inşaat düzenlerini, alt yapı tesislerini ve uygulama için gerekli diğer bilgileri gösteren plândır. Bu plânlar, 1/1.000 ya da daha büyük ölçekte yapılırlar.

Kadastro adası: Kadastro yapıldığı zaman, var olan adadır.

Kadastro çapı: Kadastro müdürlükleri tarafından verilen, kadastro parsellerinin sınırlarını, yüzölçümünü, sahibini vb. bilgileri gösteren belgedir.

Kat alanları katsayısı (KAKS; emsal): Yapının bütün katlardaki alanları toplamının parsel alanına oranından elde edilen sayıdır. Katlar alanı; bodrum kat, asma kat, çekme ve çatı katı ve kapalı çıkmalar dahil kullanılabilen bütün katların ışıklıklar çıktıktan sonraki alanları toplamıdır. Açık çıkmalar, iç yüksekliği 1.80 m.yi aşmayan ve yalnızca tesisatın geçirildiği tesisat galerileri ve katları, ticarî amacı olmayan ve yapının kendi ihtiyacı için otopark olarak kullanılan bölüm ve katlar, yangın merdivenleri, asansörler, kalorifer dairesi, kömürlük, sığınak, su deposu ve hidrofor bu alana katılmazlar. Kullanılabilen katlar deyiminden konut, işyeri, eğlenme ve dinlenme yerleri gibi oturmaya, çalışmaya, eğlenmeye

ve dinlenmeye ayrılmak üzere yapılan bölümler ile bunlara hizmet veren depo ve benzeri alanlar anlaşılır.

Kat yüksekliği: Binanın herhangi bir katının döşeme üstünden bir üstteki katının döşeme üstüne kadar olan mesafesidir.

Kesit (profil): Yeryüzündeki şekillerin düşey bir düzlem üzerindeki izdüşümleridir.

Kırmızı kot: Karayolu güzergâhı üzerinde, onaylanan yol profiline göre, bitmiş yolun kaplama üst kotudur.

Kroki: Bir arazi parçası ile üzerindeki doğal ve yapay tesislerin kuşbakışı görünümünü gösteren, yaklaşık ölçekli çizilmiş basit taslak bir plândır.

Nâzım imar plânı: Hâlihazır durumu gösteren haritalar üzerine çizilen, kentin gelecekteki konut, ticaret, sanayi bölgelerini, yeşil alanları, ulaşım ağlarını vb. diğer arazi kullanışlarını ana çizgileriyle gösteren, detaylı bir raporla açıklanan ve raporu ile beraber bir bütün olan plândır.

Normal kat: Zemin ve bodrum katların dışında kalan kat veya katlardır.

Pafta: Belirli bir bölümleme düzenine uygun olarak çizilen harita veya imar plânlarının, birbirleriyle kenarlaşabilen parçalarından her biridir. Büyük ölçekli haritalarda standart pafta boyutları 70 cm $\times$ 90 cm dir. Pafta kenarlarında 5'er cm boşluk bırakılır. Pafta, 10 cm aralıklarla karelere bölünür.

Parsel: Belli bir amaçla ayrılıp sınırlandırılmış, imara uygun, mülkiyet hakkına konu olan arazi parçalarının her birisine parsel adı verilir. Parsel, üzerine yalnız bir bina yapılabilecek arazi parçasıdır.

Parselasyon: İmar adalarının, imar plânı ve imar yönetmeliği esaslarına uygun biçimde ve büyüklükte düzgün parsellere ayrılması için yapılan işlemdir.

Parsel cephesi: Parselin üzerinde bulunduğu yoldaki cephesidir. Köşe başına rastlayan parsellerde geniş yol üzerindeki kenar, parsel cephesidir. İki yolun genişliklerinin eşit olması hâlinde dar kenar parsel cephesidir.

Parsel derinliği: Parsel ön cephe hattına arka cephe hattı köşe noktalarından indirilen dik hatların uzunluklarının ortalamasıdır.

Plân: Yeryüzündeki şekillerin yatay bir düzlem üzerindeki izdüşümleridir. Plânlar belli bir ölçeğe göre çizilirler. **Tesviye** eğrileri (eş yükselti eğrileri) ile donatılmış plâna **"tesviye eğrili plân"** adı verilir.

Plânkote: Arazi yüzü karakteristik noktalarının ve belli sıklıklarla belirlenen noktaların, konum ve yükseklik değerlerinin gösterildiği, büyük ölçekli özel haritadır.

Proje: Bir yapının gerçekleştirilebilmesi için gerekli plân, kesit, görünüş gibi çizimlerin tümüdür.

Rekreaktif alanlar: Halkın, eğlence ve dinlenme ihtiyaçlarını karşılamaya dönük, açık olarak düzenlenen, oturma ve yemek yerleri, yemek pişirme yerleri, çeşmeler, oyun ve açık spor alanları, açık gösteri alanları ve yeşil bitki örtüsü bulunan alanlardır.

Saçak seviyesi: Binaların son kat tavan döşemesi üst kotudur.

Siyah kot (tabiî zemin): Arazinin hafredilmemiş ve doldurulmamış doğal durumu (hâli) veya karayolu güzergâhı üzerindeki herhangi bir noktanın doğal arazi kotu.

Son kat: Çatı altında bulunan normal katların en üstte olan katıdır.

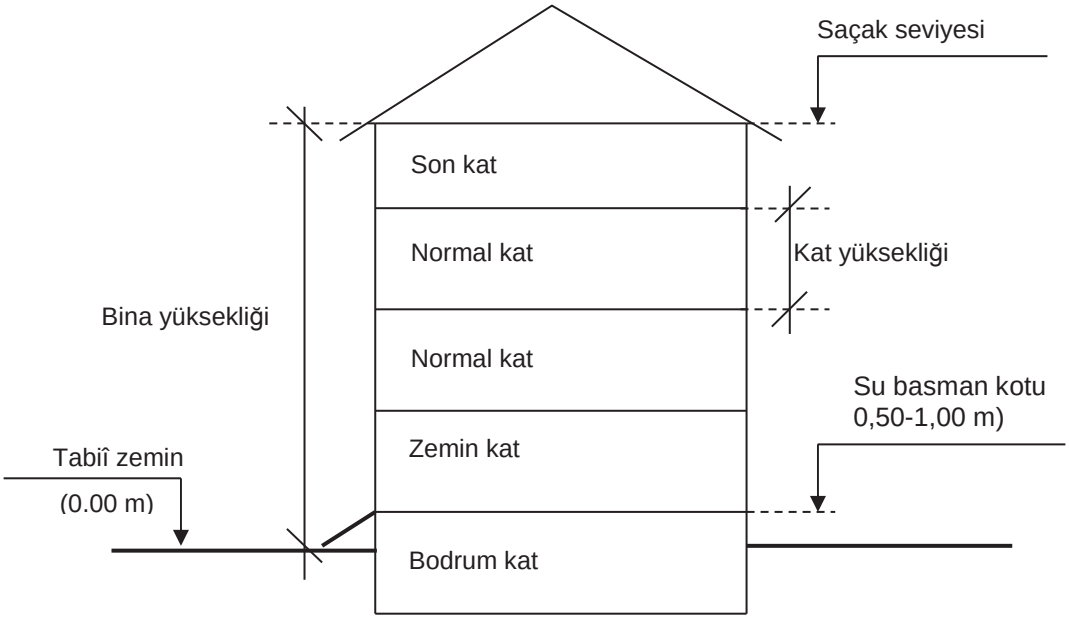
Taban alanı: Yapının parsele oturacak bölümünün yatay izdüşümünde kaplayacağı alandır.

Taban alanı katsayısı (TAKS): Binanın zemine oturduğu alanın, imar parseli (=arsa) alanına oranıdır.

Yükseklik (kot): Yeryüzündeki bir noktanın, çekül doğrultusunda başlangıç yüzeyine (geoid) olan uzaklığıdır. Kısaca, herhangi bir yatay düzlem, kıyas düzlemi olarak alındığında, elde edilen yüksekliklere kot denir.

Yükseklik eğrili harita: Plânların üzerine, aynı yükseklikteki noktaların birleştirilmesiyle elde edilen eğrilerin çizilmesiyle oluşan plânlardır.

Zemin kat: İmar plânı ve yönetmelikte öngörülen kat adedine göre alttaki kattır.



Şekil 4.9.1) Bina katlarına ilişkin tanımlamalar (Çağdaş, 2012).

4. Bölümün Özeti

Herhangi bir çökelme havzasında çökel kayaçların, tanelerin tabiî şartlar altında, tane büyüklüğü, renk ve sertlik bakımından birbirinden farklı yataklar hâlinde çökelme havzası yüzeyine paralel olarak üst üste istiflenmesine tabakalanma (*stratification)*, iki komşu tabaka arasındaki sınır düzlemine tabakalanma düzlemi *(bedding plane)*, süreksizlik olarak da nitelendirilen bu düzlemler ile ayrılmış olan çökel birikimlerine tabaka *(bed)* denir.

Eğimli bir tabaka düzleminin, yatay düzlemle yaptığı ara kesit çizgisine tabakanın doğrultusu, doğrultu çizgisinin kuzey ile yaptığı dar açıya ise tabaka doğrultusu açısı denir.

Tabaka eğimi; bir düzlemin yatay düzleme doğru bakması hâline o düzlemin eğimli olması hâli denir. Bu durumda tabaka düzlemi ile yatay düzlem arasında kesin bir açı vardır, yani tabaka düzlemi ile yatay düzlem birbirlerini keserler. Aksi takdirde tabaka yatay düzleme paralel olmuş olur ki, bu tür tabakalara yatay tabakalar adı verilir. Eğimli tabakanın baktığı coğrafik yöne eğim yönü denir. Eğim, tabaka doğrultusuna daima diktir. Eğimli bir tabaka düzleminin doğrultusuna dik düşey bir düzlem içinde yatay düzlemle yaptığı dar açıya eğim açısı denir. Bu tabakanın gerçek eğim açısıdır ve bir tabakanın sadece bir tane gerçek eğim açısı değeri vardır.

Kıvrım; plâstik ve yumuşak tabakalarda veya herhangi bir düzlemsel yapıda deformasyon etkisi altında kırılmaya uğramadan görülen bükülmedir. Tektonik kuvvetlerin etkisiyle uzun bir dönemde oluşan bu bükülme işi veya işlemine de kıvrımlanma denir.

Stratigrafi**;** yer kabuğundaki belli bir alan ve bölgedeki kayaların, tabakalı ve sedimenter kayaçların dizilimlerini, birbirleriyle olan ilgilerini inceleyen, formasyonlarından, bileşimlerinden, nitelik, istiflenme, yaş ve korelâsyonlarından söz eden bir jeoloji dalıdır. Stratigrafik dizilimin incelenmesi sonucu, tabakaların alttan üste doğru olan dizilimleri ve ortamın jeolojik evrimi belirlenebilir. Stratigrafi; kaya stratigrafi birimleri, zaman-kaya stratigrafi birimleri, jeolojik zaman birimleri ve biyostratigrafik birimleri olmak üzere dört kısımda incelenmektedir.

Yer kabuğunun yapı taşları olan kayaçların bünyelerinde, oluşumları sırasında ve sonrasında zayıflık düzlemleri veya zonları olarak tanımlanan

süreksizlikler oluşur. Özellikle mühendislik uygulamaları açısından büyük öneme sahip olan süreksizlikler; tabaka, fay, yarık, çatlak, fissür, mikrofissür ve foliasyon gibi adlarla anılırlar. Süreksizliklerin tümü mühendislik uygulamalarında önemli problemler yaratabilecek zayıflık zonlarıdır ve mühendislik çalışmalarında dikkate alınmaları gerekir.

Süreksizliklerden bir diğerini oluşturan aktif faylar, deprem meydana getirmelerinden dolayı ayrıca bir öneme sahiptirler. Faylar, atım yönlerine göre; eğim atımlı normal ve ters faylar, bindirme fayları ve depremde büyük hasarlar oluşturabilen doğrultu atımlı faylar olarak sınıflandırılırlar.

Bir arazi parçasının morfolojik yapısının (aşınma ile topoğrafyayı oluşturan kayaların dış yapısı) belli bir ölçek içinde eş yükselti eğrileri yardımıyla yatay düzlem üzerinde gösterilmesi ile elde edilen haritalara topoğrafik harita; bu tür haritalarda, deniz seviyesine göre yüksekliği göstermeye yarayan çizgilere ise eş yükselti eğrileri adı verilir. Bu amaçla istenilen bir doğrultuda, jeoloji haritalarından topoğrafik ve jeolojik kesitler elde edilerek, bu kesitlerde yer alan bilgiler yardımıyla söz konusu alanın jeolojik yapısı ve geçmişi hakkında da bilgi edinilmesi mümkün olmaktadır. Jeolojik haritalar; arazi gözlemlerine dayanan ve üzerinde jeolojik bilgiler işaretlenmiş olan haritalardır.

Temel, tünel, baraj, yol inşaatı gibi mühendislik çalışmalarında; heyelân, ayrışma ya da yerleşime uygunluk gibi belirli bir amaca yönelik olarak yapılan özel amaçlı jeoloji haritalara “Mühendislik Jeolojisi Haritaları” adı verilir. Mühendislik Jeolojisi Haritaları, özel amaçlı jeoloji haritaları olduklarından, sahanın jeolojik unsurlarının tümünü göstermesi yanında, incelenen yöredeki kayaçların jeomorfolojik, jeo-mühendislik, hidrojeolojik özellikleri veya gerektiğinde bozunmanın (ayrışma) derecesinin de tanımlandığı haritalardır.

Jeoloji ve mühendislik jeolojisi harita, kesit ve raporları; araştırılan bölgede kayaçların cins ve zemin özelliklerinin belirlenmesini, uygun güzergâhların seçilmesini, en uygun sondaj yer ve derinliklerinin belirlenmesini sağladığından, bu çalışmaları takip eden diğer mühendislik çalışmalarının da emniyet bakımından ve ekonomik anlamda başarısını sağlamakta son derece yardımcı olmaktadırlar.

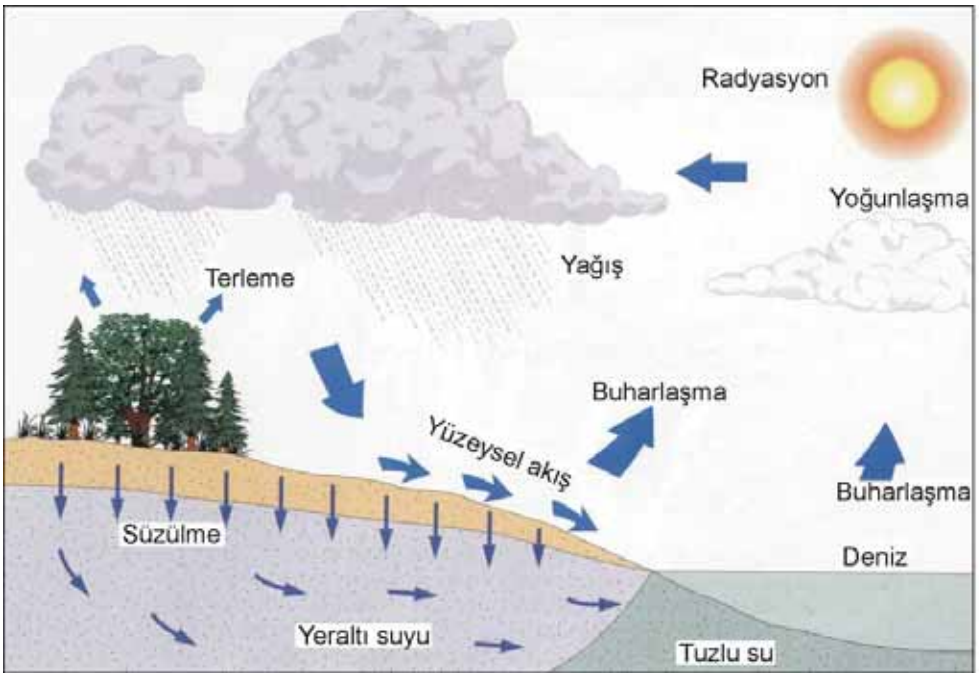
5. BÖLÜM: YÜZEYSEL AKIŞ

5.1. Giriş

Dünyamızdaki suların yeryüzü, yer altı ve atmosferdeki bulunuş tarzlarını, dağılımını, hareketini, fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklerini inceleyen bilim dalına **hidroloji** (**su bilimi**, *hydrology*) adı verilir. Bu bilim dalının inceleme konularının başında gelen **hidrolojik döngü** *(hydrological cycle)* ise dünyayı oluşturan su kütlesinin (% 97'si tuzlu su, % 3'ü tatlı su), yeryüzü, yer altı ve atmosfer arasındaki döngüsüne verilen genel addır. Bu döngüde, yeryüzünde bulunan okyanus-deniz-göl gibi geniş su alanlarından buharlaşma veya bitkilerden terleme yoluyla atmosfere katılan su, bulutlar vasıtasıyla taşınarak yağmur kar gibi değişik yağış biçimlerinde yeryüzüne geri dönmesi (yüzey suları), yeraltına süzülüp (yeraltı suları) kaynak ve akarsu olarak tekrar çıkması, bir göl veya denize akması gibi hareketlerin tümünü oluşturur ve bu döngüyü dünyanın dönme ekseninin eğikliği yanında yörüngesinin de güneşe en ideal uzaklıkta olması ve güneş etrafında dönmesiyle sağlar (Şekil 5.1). Hidrolojik döngünün yeryüzü boyunca kara alanlarında meydana gelen bölümüne **yüzeysel akış** adı verilir. Yüzeysel akış, doğal göller veya sunî barajlarda toplanır. Havzalar ve bataklıklar da yüzeysel akışın depolandığı yerlerdir. Yeryüzüne yağmur veya kar olarak ulaşan suyun bir bölümü, toprak tarafından emilerek yer altına iner ve yeraltı sularını oluşturur.

Yüzeysel akışa katılan sular, yeryüzü boyunca yüksek alanlardan alçak bölgelerde yer alan göl, deniz ve okyanuslara, buzul ve akarsular yoluyla taşınarak depolanırlar. Yeryüzünde alçak alanlara doğru akan sular, bu akışlarını belirli hatlar boyunca sürdürürler ve bu işlemin sonucunda akarsu şebekelerini oluştururlar. Akarsular, yeryüzüne düşen suları yüksek alanlardan göl, deniz ve okyanuslara ileten en önemli taşıyıcı unsurdurlar. Bu işlem sırasında, suyun aşındırma ve taşıma kuvvetine bağlı olarak kayaçların üst kesimlerinde ayrışmış nitelikte olan her boyuttaki kırıntılı (çakıl-kum-silt-kil) malzeme de dağlık alanlardan havzalara taşınarak depolanır. Akarsular,

taşıdıkları tatlı su nedeniyle insanlık tarihi boyunca ve günümüzde deniz kıyıları ile birlikte medeniyetlerin kuruldukları en önemli ortamların başında gelmektedir. Bu nedenle, gerek sulak alanlara yerleşim ve gerekse sudan enerji elde edebilmek için akarsular ve çevresindeki yapılaşma, tarihsel dönemlerden günümüze, giderek artan bir biçimde devam etmektedir.



Şekil 5.1. Hidrolojik döngünün aşamalarının şematik gösterimi. Hidrolojik döngü içerisinde yeryüzüne düşen yağışın, yüzeyde kalarak vâdiler boyunca alçak alanlara ulaşması işlemi yüzeysel akış olarak tanımlanır (*McGeary* vd., 2004).

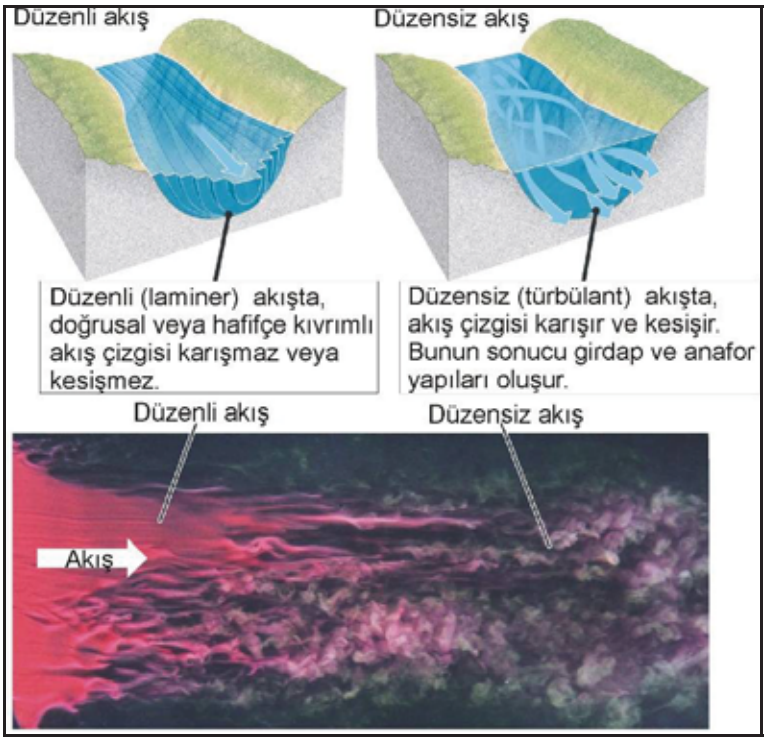
Atmosferdeki nemin (havada bulunan su buharı) ortalama % 90'ı okyanus, deniz, göl ve nehirlerden, geri kalan % 10'u ise bitki (**Flora,** *flora***:** Bir yörede yetişen bitkilerin tümü, bitki örtüsü) yüzeyindeki buharlaşmadan meydana gelmektedir. Yeraltı sularının da esas kaynağını oluşturan **yağış**; atmosferdeki su buharının katı veya sıvı (yağmur) hâlde yeryüzüne düşmesi olarak tarif edilebilir. Yağış; buharlaşma + terleme (**transpirasyon**) + yüzeysel akış ve yer altına sızmanın toplamına eşittir. Radarlarla da ölçülebilen yağış, genellikle meteoroloji istasyonlarında belli bir zamanda, atmosferden yeryüzeyine düşen yağışı direkt olarak ölçen; yazıcı olmayan yağış ölçer (**plüvyometre)** veya sürekli olarak kayıt yapan yazıcı yağış ölçerler **(plüvyograf)** ile su sütunu yüksekliği cinsinden mm olarak ölçülür. Su sütunu cinsinden ölçülen 1 mm yağış yüksekliği, birim yüzeye (1 m^2) düşen 1 kg yağışa eşdeğerdir. Sıvı ya da katı bir cismin gaz hâline geçmesine **buharlaşma** *(evaporation)* denir. Buharlaşma,

özel şekilde hazırlanmış belli standart ölçüleri olan buharlaşma tavası denen su dolu metal kaplar kullanılarak ölçülür ve bunlara **evaporimetre** adı verilir. Buharlaşma ve terleme genellikle birlikte ölçülür. İçine bitki ekilmiş yer altına gömülü tanklarda giren ve çıkan su miktarları ile buharlaşma ve terlemenin birlikte ölçüldüğü aletlere **lizimetre** *(lysimeter)* denir. **Sızma** *(Infiltration)***;** yeryüzüne düşen yağışın bir kısmının zemin içine süzülerek zemin nemini artırmasına ve daha derinlere sızarak akiferlere *(aquifer)* ulaşmasını ifâde eden bir süreçtir. Belli şartlar altında birim zamanda yer altına süzülebilecek maksimum su miktarının milimetre (mm) cinsinden ifâdesine **sızma kapasitesi** denmektedir. Zemin yüzeyinden yerin içine sızan suyun ölçümü, **infiltrometre** ismi verilen aletlerle yapılır. Ancak zemin içerisindeki su akışı çok yavaştır. Akiferin bulunduğu derinliğe ve toprağın gözenekliliğine bağlı olarak sızma suyunun akiferlere ulaşması haftalar hattâ aylarca zaman alabilir. Dolayısıyla; bir bölgedeki sızmayı denetleyen etmenler; jeolojik yapı, zeminin cinsi, dokusu, eğimi, kimyasal bileşimi, geçirgenliği, bitki örtüsü ve morfolojik yapıdır.

5.2. Akarsu Akış Sistemleri

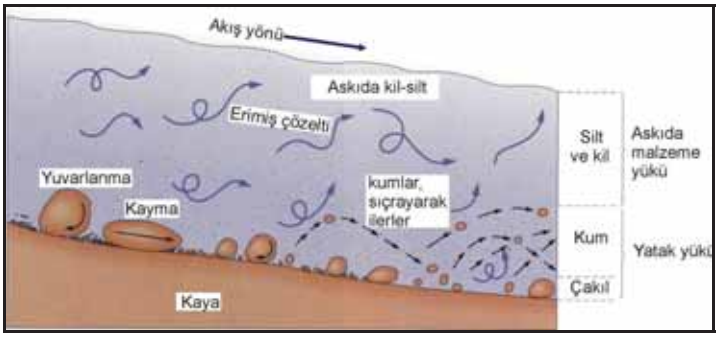
Akarsularda, düzenli **(laminar)** ve düzensiz **(türbülent, türbülânslı)** akışlar olmak üzere iki tür akış sistemi gözlenir. **Düzenli akışta** doğrusal veya çok az büklümlü birbirlerine paralel akan sıvı iplikçikleri (akış çizgileri), birbirlerine karışmaz, kesmez, akış tabakalar hâlinde ve yavaş olup hız vektörü ise akış kesitine diktir. Düzenli akışta, akıma karşı direnç, doğrudan doğruya viskozite (sıvının akmaya karşı olan direnci) ve hız ile doğru orantılıdır.

Akış hızı yüksek olan akarsularda, **düzensiz akış** gözlenir. Düzensiz akışta, sıvı moleküllerinin hareketi düzensiz ve karışık olup hız fazladır. Bu tür akışta karmaşık bir akış şekli oluşur, sıvı iplikçiklerinin yönleri zamanla değişir, akış çizgileri birbirini keser, karışırlar fakat ortalama hız aynı kalır. Sonuçta, akışta girdap ve anafor yapıları oluşur (Şekil 5.2). Bir akış sisteminin düzenli veya düzensiz olması; akışın hızına, akışın geometrisine (daha çok derinliğine) bağlıdır. Hız, kritik bir hız değerini aştığında, laminar akım rejimi, türbülent akım rejimine geçer ve bu rejimde su akımı zaman ve ortam içerisinde düzensizdir ve akıma karşı direnç artık hemen hemen viskoziteye bağımlı olmaktan kurtulmuş gibidir, ayrıca direnç de hız ile doğrudan doğruya orantılı olmaktan çıkar.



Şekil 5.2. Akarsularda gözlenen düzenli ve düzensiz akış (*Press* vd., 2004).

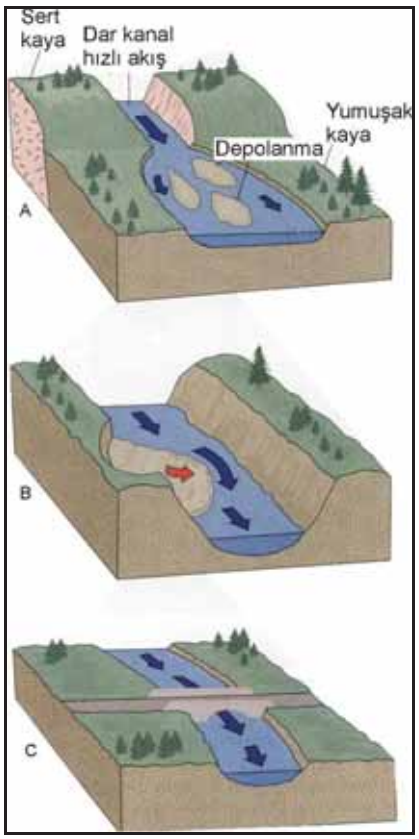
Akarsular, akış sistemlerine bağlı olarak değişen miktar ve boyuttaki kırıntılı malzemeyi aşındırıp bünyesinde taşıyabilir. Düzenli akış sistemine sahip olan akarsular sadece kil boyutlu ince ve hafif malzemeyi yüzeyden kaldırıp taşıyabilirler. Öte yandan, akış hızına bağlı olarak düzensiz akış sistemine sahip akarsular, kil boyutundan çakıl-blok boyutuna kadar her tür kırıntılı malzemeyi taşıyabilirler. Bu sistemde akış, taneleri bünyesine alarak taşıyabildiği gibi iri taneli malzemeyi kaydırarak veya yuvarlayarak da sürükleyebilir (Şekil 5.3). Akarsuyun içerisinde suyun kaldırma kuvveti ile taşınan malzeme **askıda malzeme yükü** *(suspended load)*, tabanda sürüklenenler ise **vâdi yatak yükü** *(bed load)* olarak adlandırılır (Şekil 5.3, 5.4). Akarsuyun hızı arttıkça askıda taşıyabildiği malzemenin tane çapı artar ve daha büyük miktarda bir sediment yükünü taşır. Akarsuyun askıda ve tabanda taşıyabildiği toplam sediment yüküne akarsuyun **taşıma kapasitesi** adı verilir. Akarsuların taşıma kapasiteleri, özellikle baraj inşaatlarında kullanılan ve baraj göl havzasının ne kadar hızda dolabileceğinin, yani baraj ömrünün belirlenmesinde önemli bir veri girdisini oluşturur. Akış hızını denetleyen unsurlardan bir diğeri de yapay ve doğal olarak gelişen vâdi genişliğindeki değişimlerdir (Şekil 5.5).



Şekil 5.3. Akarsu aşındırma mekanizmaları (*McGeary* vd., 2004).



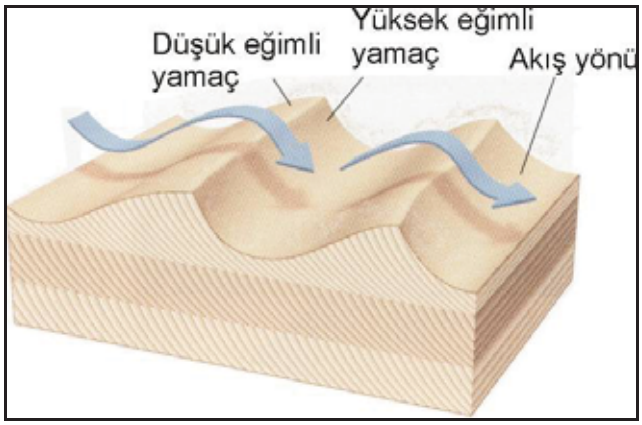
Şekil 5.4. Bir akarsu içerisindeki sediment yükü ve hareket mekanizması.



Şekil 5.5. Akarsu vâdilerinde kayaç sertliğine (A); yamaç duraysızlığına (B) ve yapay nedenlere (C) bağlı olarak gelişen vâdilerde akış hızındaki değişim (*McGeary* vd., 2004).

5.3. Akarsuyun Aşındırma-Taşıma Etkisi ve Vâdi Şekillenmeleri

Akarsular, sahip oldukları akış rejimine bağlı olarak tabandaki malzemeyi aşındırır ve bu malzemeyi akarsuyun içerisinde askıda, sıçratarak, akarsuyun tabanında sürükleyerek veya yuvarlayarak hareket ettirir. Tanelerin sıçrama işlemleri sırasındaki kırıntılı malzemenin asimetrik dizilimi, akarsu vâdisi tabanında Ripıl-mark, ***"ripple mark"*** adı verilen (bk. 4. Bölüm, sayfa 136) ve akarsu eksenine dik olarak gelişen asimetrik yükseltilerin oluşmasına neden olur (Şekil 5.6). Akıntı hızının yavaş ve düzenli olduğu alanlarda deniz tabanında bu şekillenmeler gelişmez. Ancak akıntı hızının arttığı ve düzensiz akış rejimine geçildiği bölgelerde, kum boyutlu malzemeler ileri doğru sıçrayarak sürüklenmeye (*traction*) başlarlar. Bu sürükleniş, deniz tabanında asimetrik setlerin yani 'ripple-mark'ların gelişmesine neden olur. Bu setler, akarsu yatağı tabanında çapraz tabakalanmaya neden olurlar. Daha önce değinildiği üzere; tanelerin tabaka içindeki sıralanışları tabakanın alt ve üst yüzeylerine paralel olmayıp, bu yüzeylerle açılar yapacak şekilde iseler böyle bir tabakalanmaya çapraz tabakalanma denir. Akarsuyun akış hızı arttıkça, tabanında oluşan bu tür yapıların boyutları da büyür.



Şekil 5.6. Akarsu tabanında gelişen *ripple-marklar* (*Press* vd., 2004).

Akarsu sistemi, sediment aşındırmaları yardımıyla vâdi yatağını geliştirir. Bu gelişim, vâdinin katıldığı daha büyük bir su sisteminden (deniz, göl) geriye, yüksek alanlara doğru gerçekleşir. Vâdinin, kaynağına doğru yaptığı bu gerileme ile meydana gelen gelişime **başyukarı aşınım** adı verilir. Başyukarı aşınım ve akarsu vâdisinin gelişimi, yumuşak ve kazınabilir nitelikteki zemin içerisinde göreceli olarak kolaylıkla gerçekleşirken, taşlaşma/soğuma-

katılaşma işlemi geçirmiş olan sağlam kayalarda ise bu işlem daha uzun zaman içerisinde meydana gelir.

Akarsular kaya ortamlarını üç ana başlık altında toplanabilecek nedenler ile aşındırabilirler. Bunlardan ilki, akarsuyun içerisinde bulunan ve akış etkisi ile sıçrayan veya yuvarlanarak sürüklenen kum ve çakılların çarpma ve sürtünme etkisi ile vâdi tabanı üzerinde yaptıkları aşındırmadır. Akarsu vâdilerinde meydana gelen ikinci aşınma etkisi ise kayalardaki fiziksel ve kimyasal ayrışmalardır. Kayalarda ve süreksizliklerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal ayrışma, kaya yüzeylerinde zayıflıkların oluşmasına, süreksizliklerin büyümesine ve bu yolla akarsuyun bu zayıflıklar boyunca kayaları koparark vâdisini aşındırmasına neden olur. Akarsuların kayalarda oluşturabileceği diğer aşındırma türü ise suyun kayalara şiddetli çarpma etkisi ile meydana gelir. Özellikle kayalarda herhangi bir nedenle gelişmiş basamaklanmadan kaynaklanan, akarsu vâdisindeki bir yükseklik farkı, suyun yukarıdan aşağı büyük bir hızla çarparak aşağıdaki kayayı aşındırmasına ve akarsuyun oluşturduğu kazıma (aşınım, erozyon) işlemi sonucu, bir duraysızlık oluşturarak, yamacın çökmesine ve bu yolla kayanın taşınabilecek boyutta ufalanmasına neden olacaktır.

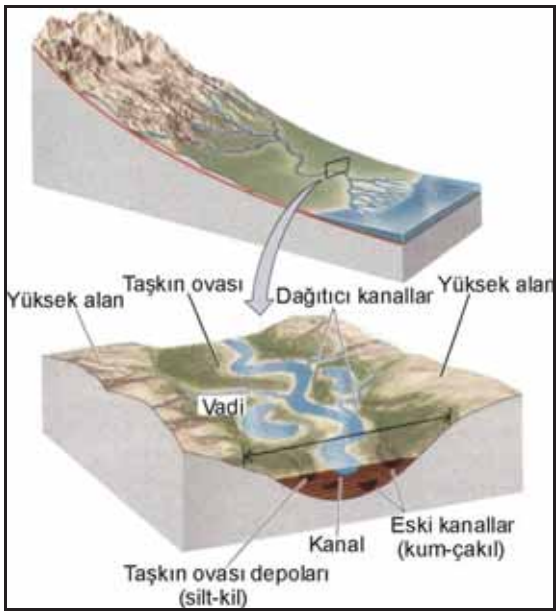
Eğer, ortam sert kaya basamaklarından oluşup, düzenli düşey/düşeye yakın çatlak takımını içerip, yüksek bir kotta yer alıyor ve de kayanın tabakalanmasının yatay, üstte aşınmaya karşı dirençli, altta veya ara seviyelerde kolay kazılabilecek tabakalar bulunuyor ise akarsu; bu tür kaya ortamlarında şelâle ve dik ***falezleri** oluşturacaktır. Aşındırma işlemi hızı, sağlam kayanın altında veya ara seviyelerinde yer alan zayıf ara katmanlara ve düşey çatlaklara bağlı olacak ve bölgede morfolojik olarak zamanla aşınmayla gerileyen, ama daima düşeye yakın bir falez yapısı korunacaktır.

***[Falez**, *(cliff)* **:** Denize inen yüksek ve dar kıyı, yalı-yar**]**.

5.4. Vâdi Şekilleri

Akarsuların, tabanlarını aşındırmaları sonucunda vâdiler oluşur. Vâdilerin tabanında güncel olarak suyun aktığı bölüme **kanal** adı verilir (Şekil 5.7). Akışın devamlı olduğu ve vâdi yapısının küçük bir bölümünü oluşturan kanal bölgesinde genelde kaba kırıntılılar (kum-çakıl-blok) çökelirler. Ayrıca vâdilerin pek çoğunda kanalların her iki yanında yataya yakın düzlükler yer

alır. Bu düzlükler, taşkın dönemlerinde su ile kaplanan ve akarsuyun getirdiği genelde kil-silt gibi ince malzeme ile kaplı olan bölümleridir.



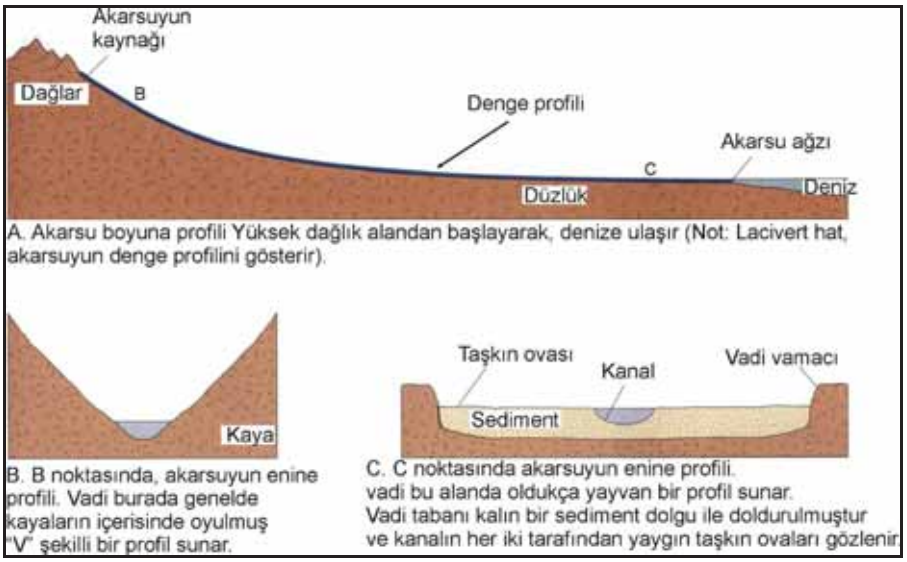
Şekil 5.7. Tipik bir vâdi kesiti ve elemanları (*Press* vd., 2004).

Bir bölgenin sularını toplayarak doğal bir yatak boyunca akan sulara **akarsu** adı verilir. Kaynağı yüksekliklerde başlayıp iki tarafından derecikler alarak alçalan akıntıların, yağmur ânı haricinde; susuzlarına **kuru dere** *(wadi)*, devamlı sulu olanlarına **sulu dere** *(aqueous stream)* ve bunların birleştiği yere de **kavşak** denir (Aytaç, 1971). Derelerin birleşmesinden meydana gelen daha büyük su akıntılarına **çay**, daha uzun ve geniş olanlarına **ırmak**, çay ve ırmakların birleşmesinden meydana gelen uzun ve geniş akarsulara ise **nehir** adı verilmektedir.

Akarsu süreçleriyle de oluşmuş, meydana gelmiş yer şekilleri **fluviyal jeomorfolojik oluşumlar** olarak tanımlanmaktadır. Akarsular, yüksek dağlık alanlardan doğarak, alçak düzlük alanlara, oradan da göl, deniz ve okyanuslara ulaşırlar. Bu gelişim içerisinde akarsu yataklarının boyuna profilleri, yüksek alanlardan alçak kotlara doğru gelişimini sürdüren bir topoğrafya gösterir. Akarsuyun ulaşabileceği nihaî olgunluk şekli olan ve **denge profili** *(profile of equilibrium)* olarak adlandırılan bu profil, pürüzsüz içbükey bir eğri görünümündedir. Bir denge profili veya dengeli profil, akarsuyun her bir noktasındaki eğimin, ancak çökel yükünü taşıyabileceği yeterlikte bulunduğu, ne yatağa çökeltme yaptığı ne de yatağın aşındırdığı bir nehir profilidir (Şekil 5.8/A). Jeomorfolojik evrimde denge profili olgunluk ve

ihtiyarlık dönemlerinde gelişir. Denge profili, denizlerin yükselip alçalmasının görülmediği ya da aktif tektoniğin bölgede uzun bir dönemde etken olmadığı sürece oldukça değişmez kalabilirler.

Tüm akarsular, tabanlarını söz konusu nihaî şekle ulaştırabilmek amacıyla yüksek alanları kazıp, aşındırdıkları malzeme ile çukur alanları doldururlar. Bu nedenle, akarsular yüksek dağlık alanlarda çoğunlukla aşındırma faaliyetlerinde bulunurlar. Bu işlem sırasında vâdi tabanını derinleştiren akarsuyun enine profili, kaya ortamında genelde "V" şekillidir (Şekil 5.8/B). Akarsuların yüksek dağlık alanlardan geçtiği yerlerde taşkın ovalarına pek rastlanmaz. Buna karşın, akarsuyun geniş düzlüklere ulaştığı alçak bölgelerde ise içerisi kalın bir sediment istifle dolu olan geniş ve yayvan kesitlere sahip oldukları ve bu alanlarda akarsu kanalının her iki yanında da geniş taşkın ovalarının geliştiği gözlenir (Şekil 5.8/C).



Şekil 5.8. Akarsuyun boyuna profili ile yüksek ve alçak bölgelerindeki enine profilleri (*McGeary* vd., 2004).

Akarsuyun dağlık alanlarda, yüksek hızlı düzensiz akış sistemi nedeniyle sahip olduğu aşındırma ve taşıma kuvveti, alçak düzlüklere ulaştığı alanlarda akış hızının düşmesi ve düzenli akış sistemine dönüşmesi nedeniyle azalır ve askıda veya sürükleyerek taşıdığı sedimentleri dağların eteklerine yığar. Bununla birlikte hızı göreceli olarak hâlen yüksek olan akarsu, bu alana yığdığı sedimentlerin kenarlarını yararak, kendine pek çok yeni vâdi oluşturmak suretiyle akışına devam eder. Bunun sonucu sediment yığınları arasında akışını sürdüren pek çok küçük akarsu vâdisinin birleşiminden oluşan ve saç

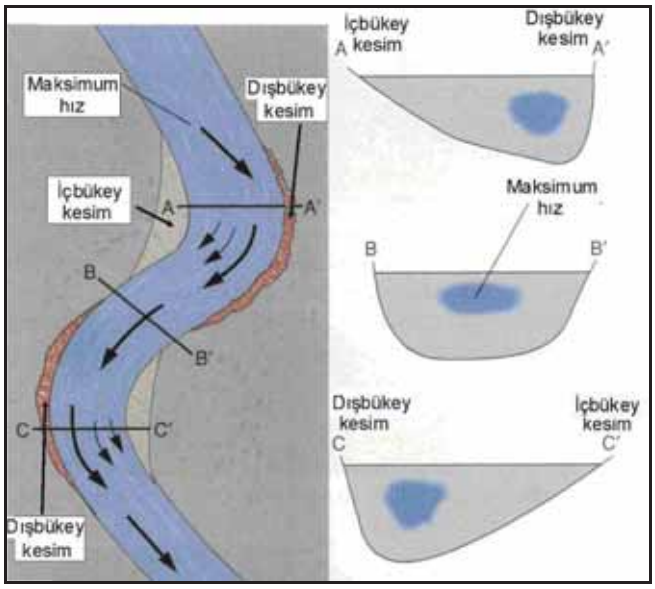
örgüsü biçimli bir akarsu vâdi şekli oluşur. Bu tür vâdi sistemlerine **örgülü tip vâdi** adı verilir (Şekil 5.9).



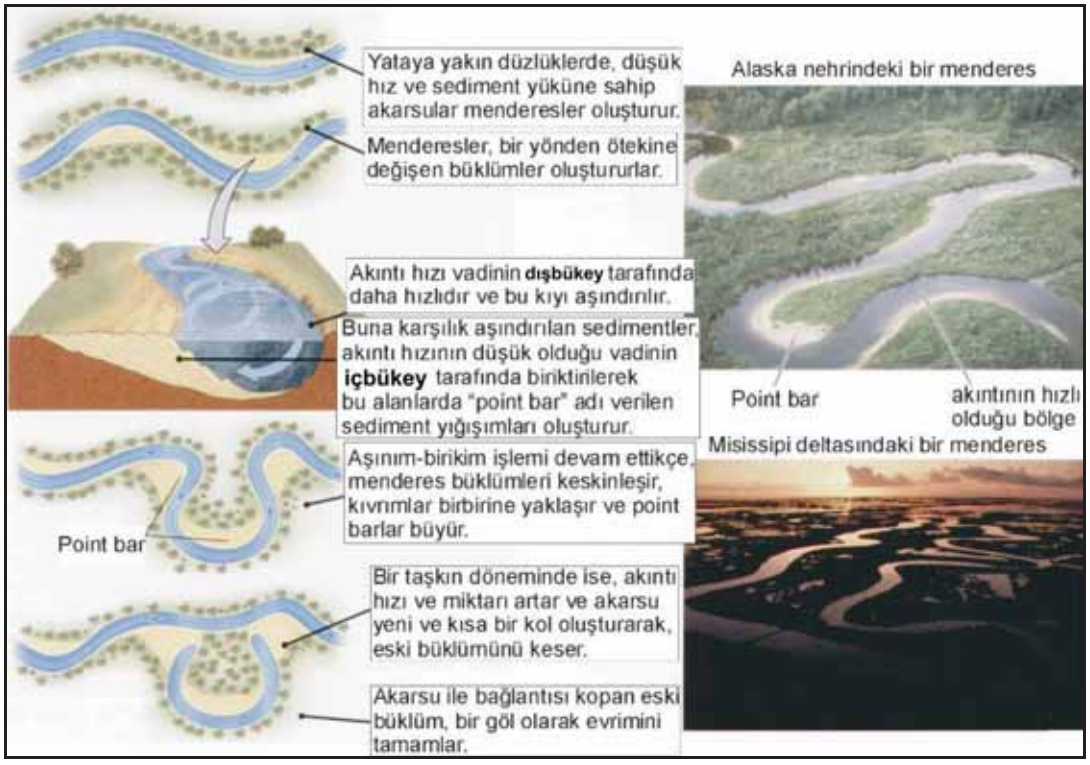
Şekil 5.9. Örgülü tip akarsu gelişimi (*Press* vd., 2004).

Bu tip vâdilerde kanal sayısı, mevsimsel olarak akış hızı ve miktarına göre artar. Akarsuyun düzlük alanlara ulaşması ile birlikte akış hızı giderek düşer ve vâdi büklümlenir. Bu büklümlenme sırasında akış hızının en yüksek olduğu suyun orta kolonu, büklümün dışbükey bölümüne yakınlaşır ve akarsu virajının dışbükey kıyısında aşınmaya neden olur (Şekil 5.10). Hızlı akışın, vâdinin dışbükey bölümünde etkili olmasına paralel olarak vâdinin içbükey yani akarsu virajının kavislerin iç kısımlarında akış hızı düşer ve bu alanlarda sediment depolanmalarının meydana geldiği sahiller oluşur ki, bu alanlara "**Uç Set**'leri" ya da **nokta yığını** ***(point bar)*** adı verilir. Bu sayede, vâdinin dışbükey kısımları **(yarma kenarı)** giderek aşınırken viraj içi bölümü de depolanma nedeniyle dışa doğru giderek kara hâline gelerek büyür, ilerler ve bu durum vâdinin kıvrımlarının giderek artan belirgin büklümlere dönüşmesine neden olur. Bu tür vâdi şekillenmesine **menderesli tip vâdi** adı verilir (Şekil 5.10, 5.11). Yatak eğimi azalmış ve daha çok alüvyal çökellerden geçen nehirlerde, point barların neden olduğu art arda ve birbirini izleyen yılanvâri "S" biçimli büklümlere **menderes** *(meander)* denir. Menderesli sistemin ileri aşamalarında büklümlerin genliği artar ve sonunda akarsu, oluşturduğu büklümü kesip "by-pass" eder ve en kısa yoldan akmaya devam eder. Kesilen parça ise evrimini bir göl olarak bir süre daha devam ettirir. Düzlük alanlarda akarsuların bu şekilde sıklıkla yatağını değiştirmesinden dolayı gelişen taşkın ovaları, akarsu

kanalının her iki yanında geniş alanlar kaplayabilir. Taşkın ovaları, mevsimsel olarak akarsu debisinde meydana gelen artıştan dolayı sularla kaplanabilir. Özellikle bu tür taşkınlarda oluşan sel felâketlerinde, bu alanlardaki yapılaşmalarda önemli can ve mal kaybı riski bulunmaktadır.



Şekil 5.10. Menderesli vâdi-akıntı hızı ilişkisi ve akarsuyun kıvrımlı ve kıvrımsız kesimlerinde oluşan en yüksek hız bölgeleri. Akarsu hızının virajlarda yavaşladığı içbükey kenar kesimlerinde sedimentlerin çökelip büyüyerek oluşturdukları **Uç Setleri** (=nokta yığını, ***point bar***; (*McGeary* vd., 2004).

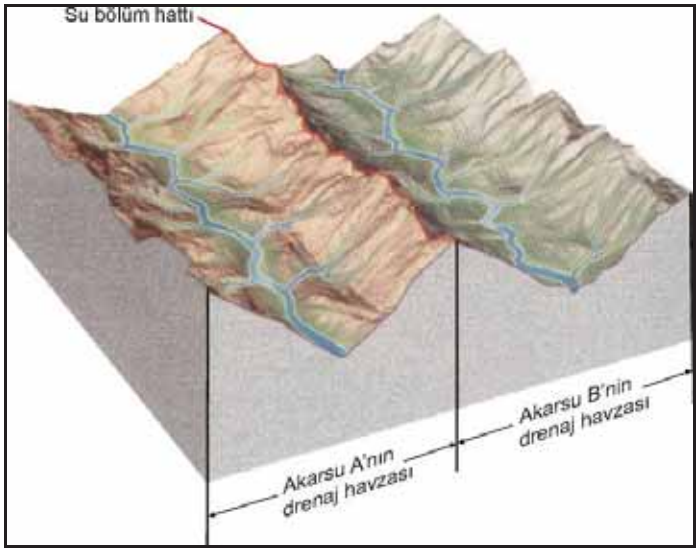


Şekil 5.11. Menderesli vâdi oluşum mekanizması (*Press* vd., 2004).

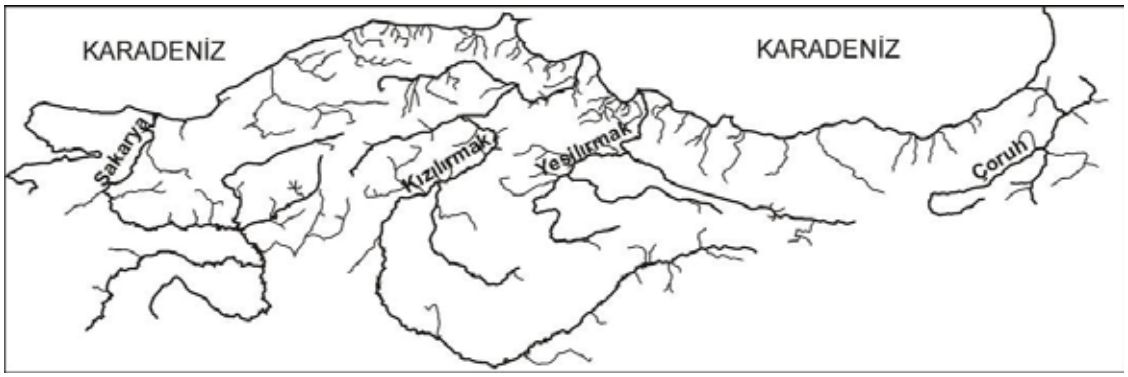
5.5. Drenaj Tanımı ve Akarsu Drenaj Sistemleri

Genel anlamda drenaj, fazla herhangi bir sıvının bulunduğu ortamdan boşaltılması ve uzaklaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Kayaçlarda, yüzey veya yeraltı sularının doğal veya yapay yollarla uzaklaştırılmasına **drenaj=akaçlama** *(drainage)*; herhangi bir insan eliyle girişim olmaksızın doğal olarak biriken yüzey sularının aşındırma sonucu oluşturdukları kuru ve sulu dere yatakları boyunca veya yer altına sızma yolu ile uzaklaşmalarına ise **doğal drenaj** *(natural drainage)* denir. Doğa, bunu kendi kendine yapar. Doğal drenajı ve drenaj sistemlerinin zeminde şekillenmesini oluşturan en önemli faktörlerin başında, su, topoğrafik durum, jeolojik yapı, litolojik özellikler (kaya türü) ve zaman gelmektedir. Bu etkenlere bağlı olarak doğal drenajda kontrol dışı taşkınlar olabilir, heyelânlar oluşabilir ve insana-çevreye büyük zararlar verebilir (Dalgıç, S. vd., 2009).

Akarsu drenaj sistemleri, yüzey sularının doğal olarak oluşturdukları yapılardır. Yüzeysel akışa geçen sular, derin alanlara doğru drene olurken (akarken) içlerinde aktıkları vâdilerini derine, geriye ve yanlara doğru aşındırarak geliştirirler. Zaman içerisinde ana akarsuya yan kolların da katılmasıyla o bölgede doğal yollarla bir akarsu yüzey drenaj sistemi kurulmuş olur. Akarsuların kollarıyla birlikte bir ağ meydana getirirler. Bu akarsulara ait vâdilerin meydana getirdiği ağa **akarsu drenajı** adı verilir. Akarsuyun kolları ile birlikte sularını topladığı bölgeye **havza,** eğer havza sularını denize taşıyabiliyorsa **açık havza**, havza suları deniz yerine bir göle ulaşıyorsa buna da **kapalı havza** denmektedir. Bir bölgeye düşen yağışın tamamını yüksek alanlardan, ana akarsu kanalına taşıyan yan kolların uzanabildiği yüksek tepelerle sınırlı havzaya da akarsu **drenaj havzası** adı verilir (Şekil 5.12). İki drenaj havzası arasında kalan ve yeryüzüne düşen yağmur damlalarını, her iki yanındaki farklı akarsu sistemlerine yönlendiren tüm yüksek sırtlar ise akarsu drenaj sistemindeki iki vâdiyi birbirinden ayıran **su bölüm hatları** *(watersheds)* olarak tanımlanırlar. Bir drenaj havzası içerisinde yer alan akarsuya ait ana ve yan kollar, beraberce **drenaj sistemini** oluştururlar. Anadolu'dan doğarak Karadeniz'e boşalan belli başlı akarsuların oluşturduğu doğal drenaj sistemleri Şekil 5.13.A'da görülmektedir.



Şekil 5.12. Akarsu drenaj havzası ve su bölüm hattı (*Press* vd., 2004).

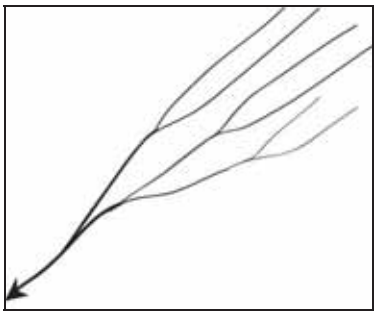


Şekil 5.13. A) Anadolu'dan doğarak Karadeniz'e boşalan ana akarsular ve oluşturdukları doğal drenaj sistemleri (akarsu sistemleri).

Akarsular, doğal olarak oluşturdukları **yüzeysel drenaj** sistemlerinde, üzerlerinde geliştikleri tabandaki yapısal ve litolojik unsurlara bağlı olarak değişik geometriler geliştirirler. İlksel yüzeyin eğim şartlarına, tektonik yapıya, litoljik karaktere ve zamanla akarsu ağında meydana gelen değişikliklere bağlı olarak akarsular farklı **drenaj tiplerini** (akaçlama tipleri) oluştururlar ve farklı drenaj tipleri; sellenme, taşkın gibi olaylarda da alınması gerekli mühendislik önlemlerinin bilinebilmesi açısından yarar sağlarlar.

Doğal Drenaj Sistemleri (tipleri): Akarsuların oluşturduğu doğal drenaj dik bir yamaçta ve muntazam eğimli yüzeyler üzerinde gelişiyor ise akarsu aynı yönde ve hızlı akacağından ana akarsuya, rahatça akıp birleşen az sayıda, ancak birbirine paralel düzenli ve düz gelişmiş yan kollar oluşacaktır.

Akarsuların dik yamaçlarda oluşturdukları bu tip doğal drenaj ağına **paralel drenaj sistemi** *(parallel drainage system)* denir (Şekil 5.13.B).



Şekil 5.13. B) Paralel drenaj sistemi.

Eğer drenaj sisteminin tabanında yer alan birimler geçirimsiz, litoloji bakımından homojen, genellikle yataya yakın bir tabakalanma gösteriyorlar ya da masif yapıda ve bünyelerinde de herhangi büyük bir fay barındırmıyorlarsa, vâdi sistemi eğim aşağı yönde, ana akarsu ve kolları bir süre sonra bir ağacın gövdesi ve kollarını andıran bir ağ meydana getirir. Yüzeysel suların oluşturdukları bu tür geometriye sahip drenaj sistemlerine **dendritik drenaj sistemi** (dal şeklinde drenaj sistemi, *dendritic drainage system*) adı verilir ve yağışlarda bu tip drenaj sistemlerine sahip arazilerde anî sellenme ve taşkın olayları sık sık görülmektedir (Şekil 5.14.A).

Drenaj sisteminin tabanında yer alan jeolojik birimler birbirlerine yakın dirençteki sağlam/çok sağlam kaya ortamını oluşturuyor ve bünyelerinde birbirlerini dik açıyla kesecek şekilde süreksizlik takımlarını barındırıyorlarsa, oluşacak akarsular, kayaçların zayıf ve kolay kazılabilen süreksizlik zonları üzerinde gelişecektir. Tipik olarak erozyona karşı eşit direnç gösteren, birbirlerini dik kesen süreksizlikleri içeren ve geniş alanlar kaplayan sağlam kayalarda oluşan bu drenaj sistemine **köşeli drenaj sistemi** *(rechtangular drainage system)* adı verilir. Köşeli drenajda akarsuyun hem ana kolu hem de ana kola birleşen tâli kollar zikzak yaparlar (Şekil 5.14.B).

Akarsu drenaj şebekesinin tabanında yer alan jeolojik birimler, aşınmaya karşı farklı dirence sahiplerse, akarsular daha kolay kazılabilen tabakaların içerisinde gelişecek ve aşınmaya dirençli olan tabakalar ise bu sistemin yüksek sırtlarını yani su bölüm hatlarını oluşturacaklardır. Tipik olarak kıvrımlı dağ silsilelerinde gelişen bu tür drenaj sistemine **kafesli drenaj sistemi** *(trellis drainage system)* adı verilmektedir. Yüzeylenen antiklinal veya senklinallerde az aşınan dayanımlı kesimler, katman (=tabaka) doğrultuları boyunca yüksek

sırt uzantılarını oluştururken, dayanımlı katmanlarla ardalanan çok aşınan dayanımsız killi düzeyler erozyon nedeniyle aşınıp tabaka doğrultularına paralel hatlar boyunca akarsu vâdi yataklarını oluşturarak, hep birlikte kafesli drenaj yapısının gelişimine neden olurlar. Kafesli drenaj sisteminde akarsuyun ana kolları birbirlerine paralel ve vâdi boyunca düz gelişirler. Birbirlerini dik kesen çatlakları içeren ve som kaya kütlelerinde gelişen köşeli drenaj sisteminde ise akarsuyun ana kolları yan kollar gibi zikzak yaparak akarlar (Şekil 5.14.C).

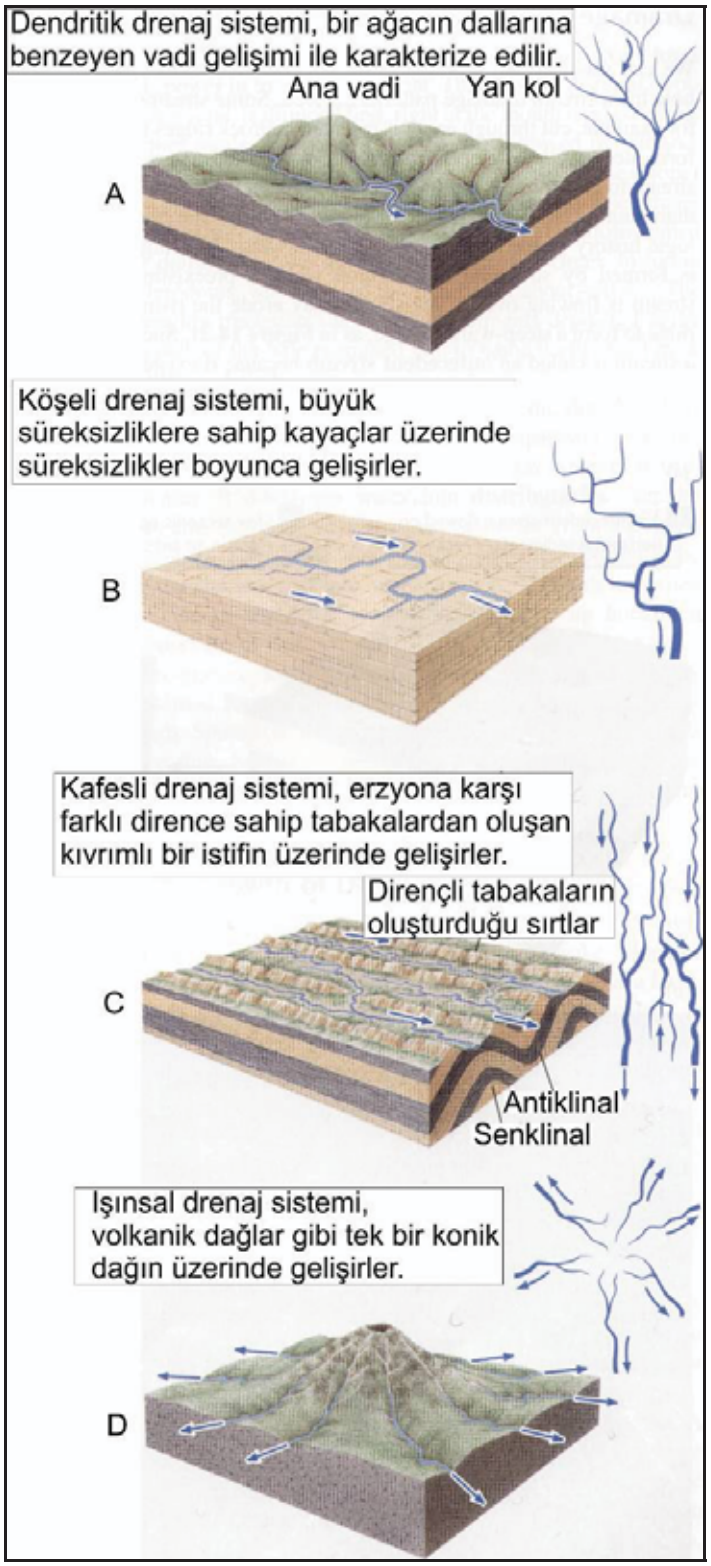
Konik şekilli volkanik dağların üzerinde yer alan akarsular, dağın tepesinden aşağı doğru konik yapıya uyumlu olarak dışarı doğru açılan bir sistem oluştururlar (Şekil 5.14.D). Alçak sahalarla çevrili yüksek kütleler üzerinde gelişen bu tür drenaj sistemlerine **ışınsal drenaj sistemi** (**radyal drenaj**, *radial drainage system*) adı verilir.

Tektonik açıdan çok etkilenmiş, derin vâdi düzlüklerini sınırlayan ve vâdiye paralel gelişmiş fayların oluşturduğu dik yamaçlar önünde vâdi düzlüğüne birleşen yüzeysel sular, sel yatakları karakterinde birikinti yelpazelerini oluştururlar. Birikinti yelpazeleri üzerinde sel yarıntıları karışık, dallanmış dentritik tipe çok benzeyen, ancak akışın dallar istikametinde olduğu ve dalların devamının gelişmediği tip**,** dengesiz bir **karışık yelpaze tip drenaj sistemi'**ni oluşturur *(deranged drainage system;* örn. Kanada bölgesinde buzulların oluşturduğu göller bölgesi).

İnsanlara ve çevreye büyük zarar verebilen, heyelânların oluşmasına neden olabilen taşkın, sellenme ve benzeri zararları önlemek için önceden tedbir alınması, biriken fazla suyun uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için insan eliyle yapılan drenaj (**sunî drenaj**, *artificial drainage*) yapıları sayesinde kara/demiryolları, hava alanları, yerüstü/yeraltı yapıları ile belirli bir arazi üzerindeki taşkınları, erozyonu, don kabarmalarını, sıvılaşma potansiyelini önlemek, zemine etkiyen basınçları azaltmak, şevlerin stabilitesini, zeminin taşıma gücünü ve kayma mukavemetini arttırmak mümkündür. Bu tür drenaj **yüzey** ve **yüzey altı** (yeraltı suyu) **drenajı** olmak üzere iki kısımda incelenir.

Yüzey suyu drenajında yüzeysel drenaj hendeği; kafa, kenar, topuk hendekleri, yüzey altı suyu drenajında ise yer altına sızan suları toplayarak kontrollü uzaklaştırmak ya da yeraltı su seviyesini düşürmek için borulu drenler (enine-boyuna dren yapıları), kılçık drenler, drenaj galerileri, yatay ve düşey kum

drenleri yapılır. Böylelikle gerek yüzeysel, gerekse yeraltı suları ortamdan uzaklaştırılır.



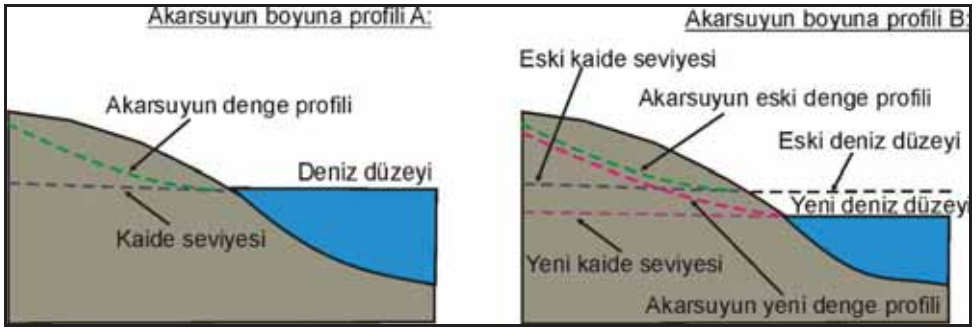
Şekil 5.14. Jeolojik yapı ve morfolojiye bağlı olarak gelişen değişik doğal drenaj tipleri (*Press* vd., 2004).

Yüzey ve yüzey altı suyu drenajı ile ilgili örnek, “9. Bölüm Kütle Hareketleri”nde verilmiştir. Düzenli katı atık depolama alanında (**deponi alanı,** *disposal area*) oluşmuş bir heyelânda, topoğrafya, jeolojik yapı ve litoloji esas alınarak seçilen yerlerde yaptırılan *****kafa hendeği ve kılçık drenlerle *(deep drainage trench)* yüzey ve yeraltı sularının uzaklaştırılması sonucunda aktif heyelânın *(active landslide)* durdurulduğuna dair diğer bir örnek 9. Bölüm’de, Kütle Hareketleri’nde yer alan “Örnek, Uygulama ve Yorumlar, 9.6.3” kısmında verilmektedir.

***[Kafa hendeği** *(top trench)*: Tabiî bir yamaçta veya yol şevinde, yüzeysel suların yamaca ya da şevlere zarar vermesini önlemek amacıyla şev ya da yamacın yukarı tarafında ve geçirimli-geçirimsiz jeolojik sınırlar da dikkate alınarak yamaca yaklaşık paralel açılan, yüzey drenaj yapısını oluşturan hendek**]**.

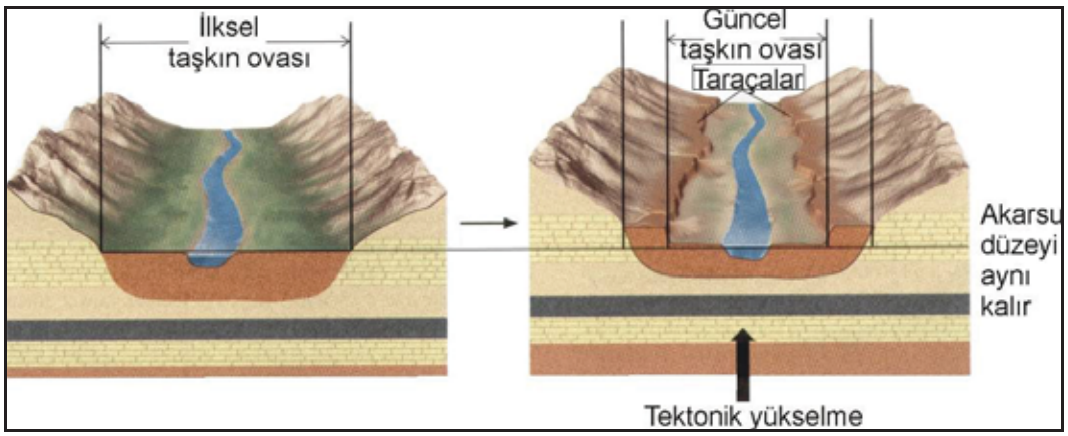
5.6. Tektonik Faktörlerin Akarsu Vâdisi Gelişimi Üzerindeki Etkileri

Akarsular ideal denge profili elde edebilmek için, içinde yer aldıkları vâdilerin yüksek olan bölgelerini aşındırır, alçak olan bölgelere bünyelerinde taşıdıkları sedimentleri bırakarak bu alanları doldururlar. Söz konusu denge profilinin belirteç seviyesini (kaide seviyesi) ise akarsuyun katıldığı daha büyük su kütlesinin (okyanus-deniz-göl-daha büyük bir akarsu-gölet) seviyesi oluşturur (Şekil 5.15A/B). Bir akarsuyun derine doğru kazabileceği en son nokta olarak da adlandırılan **kaide seviyesi (denge seviyesi)** çoğunlukla, güncel deniz düzeyi olan 0 m seviyesidir. Daha önce Bölüm 5.4’de Vâdi Şekilleri’nde de bahsedildiği gibi akarsu yatağının *(river bed or channel)*, akarsu tarafından deniz seviyesine yaklaştırılarak oluşturulan içbükey profil, denge profili olarak ifâde edilir. Akarsu 0 metre düzeyini baz alarak, buna uygun bir denge profili oluşturmaya çalışır. Kaide seviyesinin jeolojik dönemler içerisinde değişmesi durumunda ise oluşan yeni kaide seviyesine göre akarsu yeni bir denge profili oluşturur. Tektonikçe aktif bölgelerde gözlenen morfolojik yapılar, daima genç evre dönemi yapılarını sergilerler. Kuzey Anadolu veya Doğu Anadolu yanal atımlı fay zonlarında vâdiye birleşen yamaçlardaki kavisli (çengelimsi) akarsu yatakları, denge profiline ulaşmamış aktif fay zonunu belirten yapılardandır (örn. Bursa Ovasına birleşen Uludağ etekleri). İdeal bir denge profili, olgunluk evresine, ancak aktif zonların dışında kalan bölgelerde ve uzun bir zamanda ulaşabilir.



Şekil 5.15. Akarsu denge profilinin, kaide seviyesine (deniz düzeyine) göre olan değişimi.

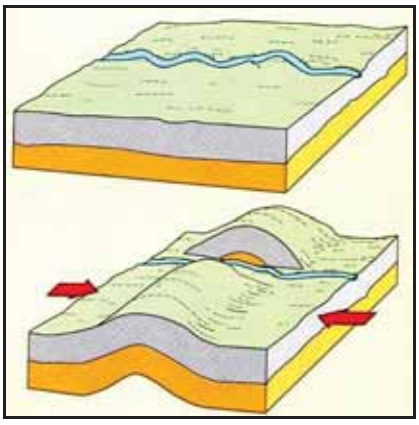
Jeolojik dönemler içerisinde temel kaide seviyesi olan deniz düzeyi, tektonik ve iklim sistemleri etkisi altında sürekli olarak değişime uğramıştır. Buna bağlı olarak akarsular da jeolojik dönemler içerisinde denge profillerini, değişen kaide seviyesine uydurabilmek için, sürekli olarak vâdilerinin içerisine yeni vâdiler kazmışlar veya vâdi tabanlarını sediment ile doldurmuşlardır. Jeolojik dönemler boyunca tektonik etkenlerle karanın yükselmesi veya iklimsel etkenlerle deniz düzeyindeki düşüşler sonucu, akarsu vâdilerinin deniz düzeyine göre yükselmeleri nedeniyle eski geniş vâdileri içerisinde daha genç ve dik yamaçlı bir vâdi kazmaları işlemine akarsuların gençleşmesi adı verilir (Şekil 5.16). Bu işlem sırasında akarsu kanalı, vâdi tabanına gömülür ve yeni bir iç vâdi oluşturur. Bu sırada eski kanalın iki yanında duran taşkın düzlükleri, yeni iç kanala göre yüksekte kalan basamaklar hâline geldiklerinden, taşkın düzlüğü vasıflarını kaybederler. Akarsu yataklarının iki kenarında, akarsu yatağından daha yukarıda yer alan, askıda kalmış bu tür eski yatak düzlüklerine **akarsu taraçası** *(fluvial terrace)* adı verilir ve bölgenin sıkışması, yükselmesiyle akarsuyun yatağını devamlı oyması sonucu oluşurlar (Şekil 5.16).



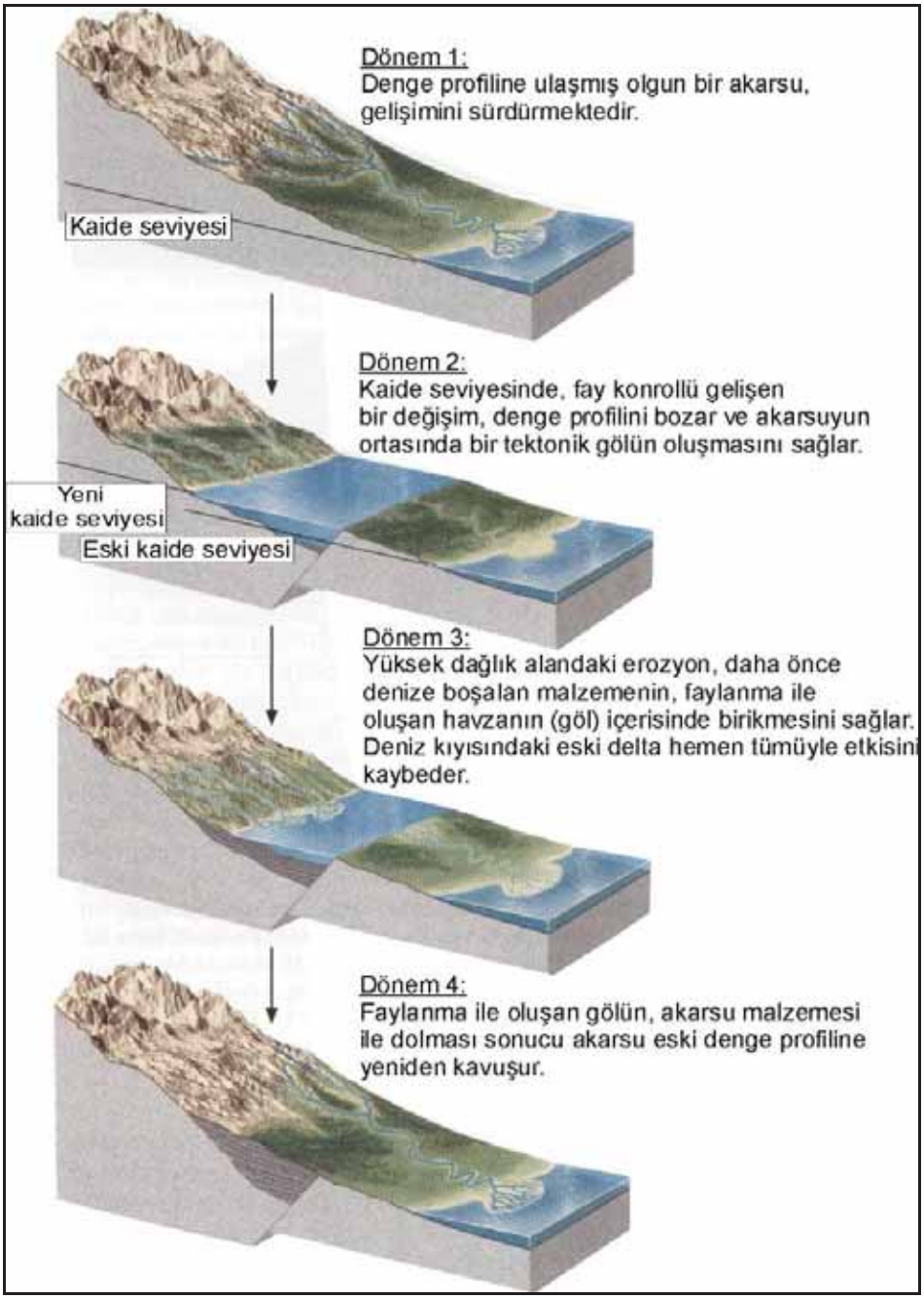
Şekil 5.16. Akarsularda gençleşme ve taraça oluşumu (*Press* vd., 2004).

Günümüzden yaklaşık 21.000 yıl öncesine kadar devam eden son buzul (*glacial*) dönemi sırasında deniz düzeyi yaklaşık 120 m kadar alçalmış ve akarsular alçalan bu kaide seviyesine uygun olarak vâdilerini kazmaya başlamışlardır. Bunun ardından günümüze kadar geçen sürede oluşan ılıman iklim, buzulları eriterek denizlerin yükselmesine neden olmuş ve deniz düzeyi bilhassa son 10.000 yılda hızla ve yaklaşık 100 m kadar yükselerek günümüz düzeyine ulaşmıştır. Bunun sonucu olarak akarsu vâdilerinin denize yakın bölümleri su altında kalmış, karada kalan bölümleri ise yükselen kaide seviyesine uygun olarak vâdilerinin büyük bir bölümünü sediment ile doldurmuştur. Günümüzde yapılan araştırmalarda, denizin -120 m'ye kadar olan derinliklerinde son buzul dönemindeki akarsuların oluşturdukları deltalara ait izler bulunmaktadır.

Tektonizmanın bölgesel ve lokal etkileri, akarsu vâdilerinin denge profili üzerinde olumsuz etki yaratır. Akarsu vâdileri, tektonik etkiler sonucu ülkenin sıkışması sonucu üzerlerinde gelişen kıvrımların yeryüzünde oluşturdukları sırtlar, akarsuyun aşındırma hızıyla eşit ya da daha yavaş yükseliyor iseler akarsular aktıkları yataklarını aşındırmak suretiyle koruyabilirler. Yatağını derinleştirerek koruyabilmiş ve akarsu ile gelişmiş dar ve derin kanyonlar oluşturmuş vâdiye **antesedant vâdi** *(antecedent valley)* denmektedir (Şekil 5.17). Hâlbuki tektonik bir etkide, akarsuların yolu üzerinde gelişen tektonik çöküntüler ilk aşamada akarsuların getirdiği sularla beslenen kesimler lokal göller hâline gelse de bu göl, uzun bir süre sonra akarsu tarafından getirilen kırıntılı sedimentle dolar ve kara hâline gelerek, akarsu girinti ve çıkıntıların olmadığı içbükey düzgün bir denge profiline zamanla yeniden kavuşur (Şekil 5.18).



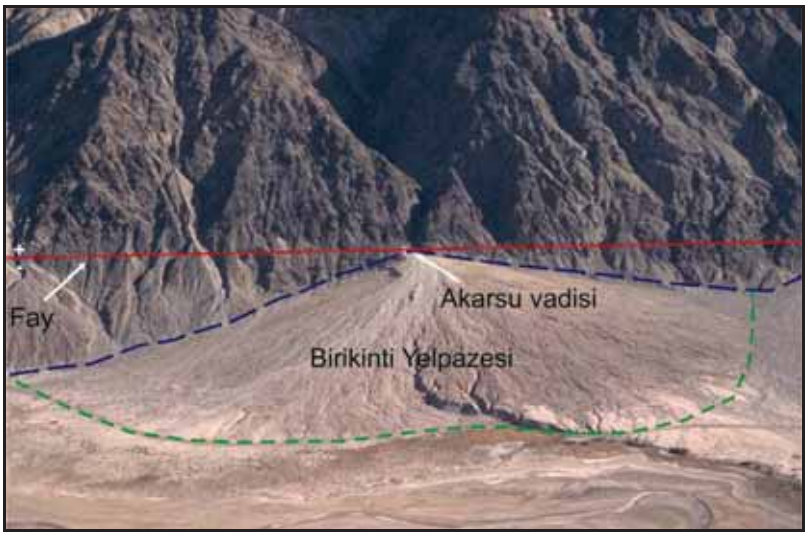
Şekil 5.17. Bir kıvrımın akarsu vâdisi tarafından kesilmesi ve antesedant vâdi **(boğaz)** oluşumu (*Plummer* ve *McGeary*, 1993).



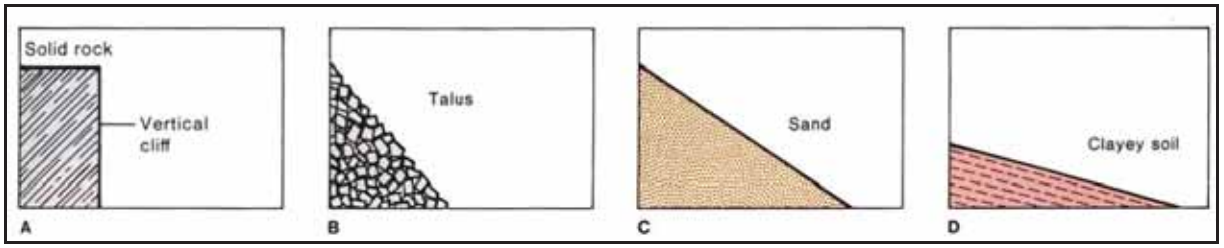
Şekil 5.18. Akarsu vâdisini kesen bir fay tarafından oluşturulan havzanın, akarsu tarafından doldurularak denge profilinin yeniden kazanılması (*Press* vd., 2004).

Fayların kayaları keserek geçtiği güzergâh boyunca oluşan ezik zonlardaki kaya kırıntıları, kaya yamaçlarında kuru ya da sulu dere yatakları boyunca sular tarafından taşınır. Suların taşıdıkları irili ufaklı kaya kırıntıları, fayların derinleştirdikleri yamaç eteklerine birikir ve yarım koni şeklindeki bu birikimlere **birikinti konileri (yamaç molozu konisi)** denir. Bu suretle çökelen kum, çakıl, blok gibi değişik boyutta maddeler; akarsuyun düzlüğe indiği yerde

bir yarım koni şeklini alırlar. Akarsuların erozyona uğratarak taşıdıkları kırıntılı kayaçlar, yaklaşık 10° den daha düşük az eğimli yataya yakın geniş alanlarda birikinti yelpazelerinin (=**alüvyon yelpazesi,** *alluvial fan*) oluşmalarını sağlarlar. Bu geniş ve yayvan oluşum, kayaçtan koparılan tanelerin cinsine, boyutu ve biçimi yanında, yamaç eğimine ve akarsuyun taşıma gücünün azalmasına bağlı olarak gelişmektedir. (Şekil 5.19.A ve B).



Şekil 5.19.A) Bir akarsu vâdisini kesen fay tarafından derinleştirilen bölgede oluşan alüvyon (birikinti) yelpazesi ve üzerinde gelişmiş karışık yelpaze tipi drenaj (*Press* vd., 2004).



Şekil 5.19.B) Kayalarda ve zeminlerde yamaç (tabiî şev) açıları. **A-** Som, sağlam/çok sağlam, çatlak içermeyen, ayrışmamış kaya yamaçları düşey/düşeye yakın dik uçurumları meydana getirirler. Bu tür kayalara som kireçtaşları, kuvarsitler ve bazaltlar örnek olarak verilebilir.

B-Kayaların parçalanmasıyla oluşan iri taneli, köşeli kaya blok ve parçacıkları kendilerini yatayla yaklaşık 45° lik bir açıyla (yamaç molozu=**talus**) tutarlar.

C- Gevşek, kuru siltli kumlu çökellerde ise yamaç eğimi açısı ~30°-35° dir.

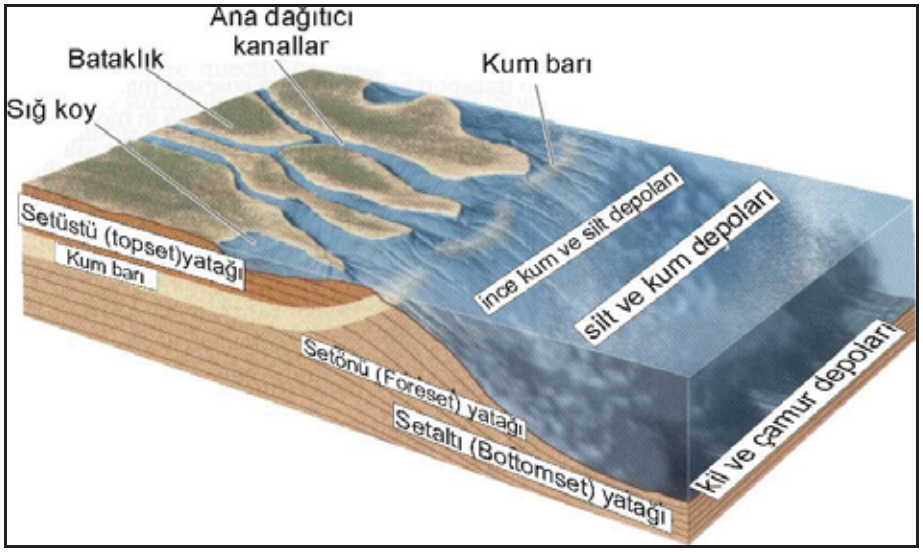
D- Kum oranının azalıp, kil oranının gittikçe arttığı zeminlerde yamaç eğim açısı giderek daha da düşer ve killi zeminler kendilerini birkaç derecelik bir açıyla tutarak kararlı (= stabil, duraylı) olabilirler. Ancak su içerikleri daha da arttıkça, kil, toprak zeminlerin yamaç eğimleri iyice azalır ve yamaç eğim açıları yatay/yataya yakın konuma (0°) gelirler.

Arazilerde oluşan ve ölçülen tabiî yamaç eğimi açıları, laboratuar deneyleriyle tespit edilen içsel sürtünme açılarına (Φ) yaklaşık olarak eşittirler.

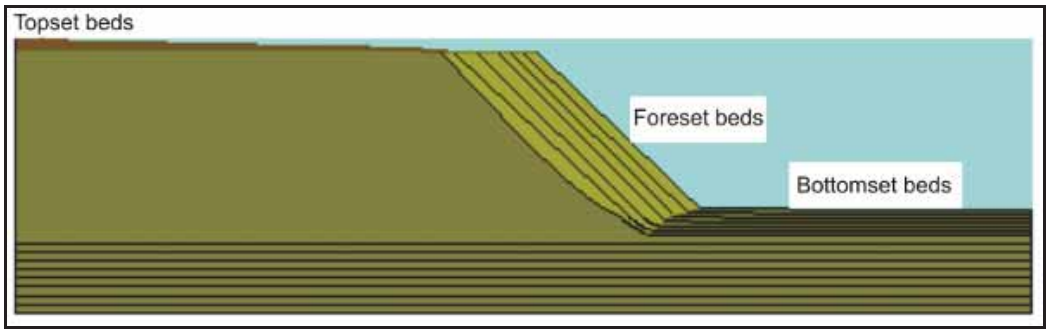
5.7. Deltalar

Akarsular, akışlarını bir göl, deniz veya okyanusa katılarak sonlandırırlar. Akarsuların bu büyük su kütlelerine katıldıkları kıyı zonları boyunca öncelikle enerjileri, kıyı hattına doğru giderek azalır ve sonunda akış tamamıyla sona erer. Bu nedenle, akarsular bünyelerinde taşıdıkları sedimentlerden, kaba taneli olanları (çakıl-kum) kara tarafında, daha ince taneli olanları (ince kum-silt) kıyı hattında ve çok ince taneli olanları (silt-kil) ise kıyıdan açığa doğru çökeltirler. Akarsular kıyı zonları boyunca, kara alanlarında yan kanalların ana kola bağlanmalarının tersine, ana koldan ayrılan ve taşıdığı su ve sedimenti kıyı zonu boyunca ve denize dağıtan, dağıtıcı kanallar oluştururlar. Bu kanallar tarafından taşınan sedimentler, kıyı zonundan denizin açığına doğru kabadan-inceye sıralanan tane boyu ile istiflenirler (Şekil 5.20.A ve B). Kıyı zonunda, akarsuyun dağıtıcı kanallar vasıtasıyla oluşturduğu sediment biriktirme alanlarına **delta** adı verilir. Deltalar *(river deltas)* akarsuların denize ulaştıkları yerlerde taşıdıkları maddeleri biriktirmesiyle oluşan üçgen biçimli alüvyal ovalardır. Delta adı, Nil Nehri deltasının şeklinin "Δ-delta" harfine benzemesinden dolayı verilmiştir (Şekil 5.21.a). Bir deltanın şeklini ağırlıklı olarak kıyı akıntıları ve dalgaları, gel-git akıntıları ile akarsuyun sediment getirim miktarı kontrol eder. Kıyı akıntıları ve dalga hâkimiyeti altında olan, yani kıyıdaki aşınım ve sürükleme etkisinin, akarsu tarafından getirilen sedimentleri süpürebilecek kadar güçlü olduğu durumlarda, delta denize doğru fazla gelişemez ve deltanın getirdiği malzeme, kıyı boyunca sürüklenerek bir plâj oluşturur (Şekil 5.21.a). Deltanın oluşabilmesi için gel-git olayının aşırı olmaması gerekir. Gel-git akıntıları karaya doğru ilerleyen ve sonra geri çekilen akıntılar olduğundan, delta gelişimini engelleyici yönde etkiye sahiptir. Bu tür akıntıların hâkim olduğu alanlarda delta ve akarsuyun kıyı zonu boyunca taşıdığı sedimentler gel-git akıntısı tarafından yıkanarak bu alanlarda bir Haliç'in gelişmesine neden olabilir (Şekil 5.21.b). Akarsu kontrolündeki delta gelişiminde ise deltanın dağıtıcı kanalları, denize doğru ilerler ve kıyıda, denizin içerisine doğru bir kuşun ayağına benzer biçimde sediment girdileri oluşur (Şekil 5.21.c). Deltaların deniz yönündeki uzantılarında, su enerjisinin yüksek olmasıyla kaba taneli sedimentlerin yatay katmanlar hâlinde sahile taşınarak üst üste biriktirildiği karayı oluşturan kıyı ve kıyıya yakın düzlükler **setüstü** *(topset)* yatakları, deltanın deniz tarafında ince kum tabakalarının,

yatay tabakalar altında açısal uyumsuzlukla yer alan ve eğimli tabakalar oluşturan deniz içi şev bölümü **setönü** *(foreset)* yatakları; deltanın açık deniz dibi düzlüğünde yer alan ve kil-çamur gibi ince taneli malzemenin yatay katmanlar hâlinde çökeldiği bölgelere ise **setaltı** *(bottomset)* yatakları olarak adlandırılır. Bu üç yatak, karadan malzeme geldikçe, deltanın oluşup büyümelerini sağlarlar.



Şekil 5.20.A) Bir deltanın elemanları ve çökelen sedimentler (*Press* vd., 2004).



Şekil 5.20.B) Deltanın oluşumu, elemanları ve sediment çökelim yerleri.



Şekil 5.21. Dalga (a); gel-git (b) ve akarsu (c) hâkimiyetinde gelişen deltalar. Örnek: (a) *Nil* Deltası-Afrika (kapladığı alan 24.000 km^2), (b) *Betsiboka* Nehri (=Kızılırmak) Deltası-*Madagaskar*, (c) *Misissipi* Deltası-ABD (36.000 km^2 ; uydu görüntüleri).

5.8. Yüzey Sularının Afetler ve Mühendislik Açısından Önemi

İnsanlara büyük oranda zarar veren, can ve mal kaybına yol açan deprem, yanardağ patlaması, heyelân, çamur akması, kaya kayması-düşmesi, deniz suyu taşması ve tsunami gibi jeolojik nedenler ile çığ, kasırga, hortum, orman yangını, kuraklık, iklim değişimi veya akarsu taşkınlarından oluşan sel gibi meteorolojik kökenli doğa olaylarının neden olduğu (önlenemeyen) afetlere **doğal afet** veya **tabiî afet** *(act of god)* adı verilir.

Deprem ve heyelân gibi yoğun yerleşim alanlarında sık sık görülen akarsu taşkınları, incelenmesi ve önlem alınması gereken doğal afetlerin başında yer almaktadır. Karalarda eğimleri yüksek olan yamaçlarda aşırı yağışlar sonucu, irili ufaklı gevşek *(loose)* malzemeyi anîden, büyük ve düzensiz hızla düşük kotlara taşıyan su akıntılarına **sellenme** denir. Taşıdığı sedimentleri su akıntısının yavaşladığı düşük eğimli alanlara doğru bırakan, aşırı su gelimi nedeniyle de düşük kotları içeren yataya yakın topoğrafyada, sellenmenin dere yatağından taşarak karalarda oluşturduğu su baskınlarına **taşkın** adı verilir. Taşkınlar da doğal afetlerden biri sayılmaktadır. Sellenme ve taşkınlar tarım ve yerleşim alanlarında aşırı yağışlarla derelerin yükselmesi nedeniyle büyük can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Tabiî bir afet olan sellenme ve oluşturduğu taşkın; aşırı yağış ile bir akarsuyun muhtelif sebeplerle yatağından taşarak çevresindeki arazilere, yerleşim yerlerine, alt yapı tesislerine ve canlılara zarar vermek suretiyle, etki bölgesinde tabiî yaşamı da menfi etkileyerek normal sosyo-ekonomik faaliyeti kesintiye uğratacak ölçüde bir akış büyüklüğü oluşturması şeklinde de ifâde edilebilir.

Taşkın alanları, periyodik olarak su baskınlarına uğrayan genellikle dere, ırmak, göl civarındaki düşük kotlu alanlardır. Zaman zaman aşırı yağış ve anî kar erimelerinden sonra su debisi artıp hızla yükselen sular, tabiî drene olduğu akarsu yatağından taşarak, akarsu yatağını çevreleyen düz araziye taşıdığı sedimentleri bırakır, bu araziye **taşkın ovası** veya **taşkın bölgesi** adı verilir. Taşkın ovası düzlükleri, genellikle akarsuların daha önce uzun süreli aralıklarla tekrarlanan taşkınlar sonucu oluşan ve genç alüvyal çökellerle kaplı alanlardır. Taşkın ovasında nehir yatağından (kanal) taşan su, yatağının da dışına taşarak geniş alanları kaplar. Burada enerji geniş alanlara dağıldığı için su hareketi

oldukça yavaş olup bu düzlük alanlarda erozyon ve sediment taşınması yerine sediment çökelimi (kırıntılı doğal malzeme depolanması) oluşur.

Doğal nedenlerle oluşan sellenme ve taşkın, kentleşmenin arttığı yerleşim alanlarının içinden veya yakınından geçen ve doğal drenajı sağlayan dere veya nehir yataklarında da zaman zaman görülmektedir. Kentleşmeye bağlı olarak hızlı nüfus artışı, yer altına sızmayı engelleyen asfalt yollar, dere yatağı debisinin aşırı yağışlarda beklenenden çok daha fazla bir şekilde yükselmesine neden olacaktır. Bunun yanında dere yakınına yapılan yapılar, derelere irili ufaklı malzemelerin atılması, dere yatağı köprü ve menfez *(culvert)* geçişlerinin gereğinden dar inşa edilmesi ile molozlarla tıkanması gibi nedenler, sellenme ile oluşacak taşkının derenin tıkanmasına ve dakikalar içinde yükselip, taşarak can ve mal kayıplarına neden olacağı tabiîdir. Zaman zaman kuvvetli ve uzun süreli yağışların yoğun yerleşim yerlerinde sellenme ve sonuçta taşkınlara neden olduğu bilinmektedir. Sellenme ve oluşturduğu taşkın zararlarının önüne geçmek için, bilhassa büyük yerleşim yerlerinde **dere *ıslahı** yapılmaktadır. Yerleşim yerlerinden geçen derelerin 100 yıllık aşırı yağış ile oluşabilecek maksimum **debinin ve taşkın sınırlarının hassas bilinmesi, dere ıslahı yapılmış olsa bile dere yatağının her iki kenarında şartnamelere uygun bir emniyet şeridinin ayrılması ve yeşil alan olarak bırakılması gerekmektedir.

***[Islah:** Bir bölgenin tümüyle yenilenmeksizin yaşam şartlarının düzeltilmesi, iyileştirme, rehabilite**;**

****Debi:** Bir akarsuyun veya akışkanın herhangi bir kesitinden birim zamanda geçen su hacmidir. Boyutu, hacim/zaman olan Debi'de genellikle kullanılan metrik birim m^3/sn dir ve yaygın göstergesi Q harfidir**]**.

Yerleşim yerlerinde dere yatağı kesitleri ve dar köprü veya menfez geçişlerinin maksimum debi dikkate alınarak yapılmadıklarında ıslah edildiği sanılan dere yataya yakın aktığı mecrada bile sellenme ve taşkın oluşturup, kilometreler mertebesinde geniş bir alana taşarak can ve mal kayıplarına neden olabilir.

Islahı doğru yapılmış dereler, tüm suyu kanalda tutar, etrafa taşma olmaz, su hareketi daha hızlı ama yapılan kanal içinde kalarak kontrollü drene edilmiş olur ve çevrede yerleşim yerlerinde, herhangi bir zarara sebebiyet vermez.

Günümüzde sel ve taşkın olayları, şehirleşmenin arttığı yerlerde, kuru veya sulu dere yataklarında zaman zaman karşılaşılmakta ileriye dönük ve mevzuata uygun yapılmayan ıslah çalışmaları ile sellenme ve taşkından maddî ve manevî zararlar oluşmaktadır. Dere ıslah çalışmaları projelendirilirken dere ıslah inşaatı, atıksu ve yağmursuyu kanalları ile bunlara ait bağlantılar yanında, dere yatağı ve çevresini içine alan bölgede 100 yılda bir tekerrür (tekrarlanma) eden aşırı yağış verileri öncelikle dikkate alınmalıdır. Böyle bir veri yok ise mevcut dere yatağı taşkın sınırının bilinmesi, uzun yıllara dayanan tüm meteorolojik veriler yanında daha önce oluşmuş taşkın sınırlarının tespit edilmesi, dere güzergâhı ve çevresinin detaylı jeolojik ve geoteknik etütlerinin yapılması gereklidir. Ayrıca yapılaşma, jeoloji, harita, çevre, hidrolik, yerleşime uygunluk ile ilgili mühendislik birimleri, resmî kuruluş ve üniversiteler ile birlikte koordineli çalışmalıdır. Öncelikle; dere Islah Şartnamesi eksiksiz, doğru hazırlanmalı ve her an denetlenerek uygulanmalıdır. Islah çalışmalarında oluşacak hata ve zararların azaltılabilmesi, sorumlulukların herhangi bir tarafa yüklenmesi ile değil; ister işveren, isterse yüklenici, denetleyici veya teknik eleman olsun, sorumlu olan bireylerin tümünü içine alacak şekilde bir şartname *(specification)* hazırlanması ile mümkün olabilecektir.

Dere ıslahında, bilhassa yoğun yerleşimin olduğu büyük şehirlerde taşkınları önlemek için yapılan dere ıslahlarında çalışma güzergâhının başlangıç noktası doğru seçilmiş olmalıdır. Örnek olarak yoğun bir yerleşim bölgesi (İstanbul) içinden geçen, kaynağından itibaren yaklaşık 20 km katettikten sonra denize ulaşan düşük eğimli veya oldukça yataya yakın bir topoğrafyada akan bir dere yatağı güzergâhı, projelendirilirken tüm uzunluğu, yani bu örnekte 20 km esas alınmalıdır. Sel rejimli (yüksek hızlı akış) olmayan, nehir rejimli (düşük hızlı akış) akarsularda, ilk ıslah çalışma noktası, güzergâhın herhangi bir bölümü olmayıp, mansaptan, yani derenin denize birleştiği yerden başlamalıdır. Ve memba (dere başlangıcı/kaynağı) tarafına doğru kesiksiz, eksiksiz ve herhangi bir bölüm atlanmadan yapılan çalışma olmalıdır. Zira yağışla artarak gelen sular, membadan mansaba doğru ilerlerken yağış havzasından ve varsa derenin kollarından (kuru ve sulu dere kolları) gelen sularla, taşkın pik debisi gitgide büyüyecek, mansap bölgesinde en büyük değerine ulaşacaktır. Sular, membadan mansaba doğru ilerlerken pik debi, dere yatağının taşıyabileceği maksimum kapasiteden daha büyük olduğunda,

derenin bütün dar kesit ve mevcut dar menfez yerlerini kısa sürede molozlarla tıkayacak, sular denize ulaşamadan, anî taşkınların meydana gelmesine neden olacaktır.

5. Bölümün Özeti

Dünyamızdaki suların yeryüzü, yer altı ve atmosferdeki bulunuş tarzlarını, dağılımını, hareketini, fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklerini inceleyen bilim dalına hidroloji (su bilimi), dünyayı oluşturan su kütlesinin, yeryüzü, yer altı ve atmosfer arasındaki çevrimine hidrolojik döngü adı verilir. Hidrolojik döngünün yeryüzü boyunca kara alanlarında meydana gelen bölümüne yüzeysel akış denmektedir. Yüzeysel akışın en önemli unsurunu akarsu sistemleri oluşturur. Akarsular, hidrolojik döngüdeki yüzey suyunu, deniz ve göl gibi daha derin bölgelere iletirken, meydana gelen akış sistemi, akarsu vâdileri boyunca sediment aşınması, taşınması ve depolanması işleminin de gerçekleşmesini sağlar. Akarsu vâdileri boyunca düzenli ve düzensiz olmak üzere iki tür akış sistemi gerçekleşir. Düzensiz sistemde, akarsular daha hızlı ve karmaşık bir sistemde akar ve daha enerjik bir ortam oluşur. Bu durum, daha büyük miktarlarda bir aşınma işleminin gerçekleşmesine neden olur. Akıntıların etkisi altında, akarsu vâdileri boyunca kırıntılı sedimentler, büyüklüklerine bağlı olarak yuvarlanarak, sürüklenerek, sıçrayarak veya su içerisinde süspanse hâlde yüzerek taşınırlar.

Yüzey veya yeraltı sularının doğal veya yapay yollarla uzaklaştırılmasına drenaj denir. Herhangi bir insan eliyle girişim olmaksızın doğal olarak yüzey sularının oluşturduğu kuru ve sulu dere yatakları boyunca veya yer altına sızma yolu ile suların uzaklaştırılması doğal drenaj, fazla suyu uzaklaştırmak için insanlar tarafından yapılan kontrollü drenaj ise sunî drenaj olarak adlandırılır.

Bir bölgede geriye, derine ve yanlara doğru aşındırma işlemini gerçekleştiren akarsu, yan kolların da eklenmesi ile bölgesel bir yayılım gösterir. Bu yayılımda ana kola bağlanan yan kollar, söz konusu bölgeye ulaşan suları, ana kola ulaştırırlar. Aynı ana kola ulaşan su damlalarının kapladığı alana drenaj havzası denir. Drenaj havzalarını sınırlayan yüksek sırtlara su bölüm hattı; bir havza içerisindeki akarsu ana kol ve yan kollarının,

bölgenin jeolojik unsurlarının kontrolü altında kazandıkları geometriye de drenaj sistemi adı verilir. Akarsular geçtikleri ortamın jeolojik özelliklerine bağlı olarak erozyon yolu ile oluşturdukları morfolojiye göre dendritik, paralel, köşeli, kafesli, ışınsal ve karışık yelpaze tipi drenaj sistemlerini meydana getirirler. Bunlar, en yaygın rastlanılan doğal drenaj sistemleridir.

Akarsuların boyuna profilleri zamanla; yüksek alanlarda daha dik, deniz düzeyine yakın olan ovalık alanlara doğru gittikçe aşındırma etkisi ile daha az eğimli ve çıkıntıların aşındırıldığı, çukurların doldurulduğu pürüzsüz iç bükey bir geometriye sahip olurlar. Akarsuların uzun bir zamanda kazandıkları ideal olan bu eğrisel profile denge profili adı verilir. Doğada tüm akarsu sistemleri, söz konusu denge profiline ulaşabilmek amacıyla yüksek alanları aşındırıp, aşındırdıkları malzemeleri alçak alanlarda biriktirirler. Söz konusu işlem sırasında vâdinin eğiminin değiştiği bölgelerde akarsu vâdisinin geometrisinde de buna bağlı değişimler gerçekleşir. Denge profilinin belirteç seviyesini (kaide/denge seviyesi) ise akarsuyun birleştiği okyanus, deniz veya göl seviyesi oluşturur. Bir akarsuyun derine doğru kazabileceği en son nokta olarak da adlandırılan kaide seviyesi çoğunlukla, güncel deniz düzeyi seviyesidir.

Tektonikçe aktif bölgelerde gözlenen morfolojik yapılar, gelişim süreçlerine geçmeye çalışan genç evre dönemi yapılarını oluştururlar. Kuzey Anadolu veya Doğu Anadolu Yanal Atımlı Fay Zonlarında görüldüğü gibi aktif fayların yanal hareketleriyle, vâdilere birleşen yamaçlardaki çengelimsi, kavisli görünümlü akarsu yatakları, aktif faylar nedeniyle denge profiline ulaşamazlar. Denge profiline ulaşamamış bu tür çarpık morfolojik yapılar aynı zamanda aktif zonun varlığını, diğer bir ifâde ile deprem bölgelerini belirten yapılardandır. İdeal bir denge profili olgunluk evresine, ancak tektonikçe aktif zonların dışında kalan bölgelerde ve uzun bir zamanda ulaşabilmektedir.

Tektonizmanın bölgesel ve lokal etkileri, akarsu vâdilerinin denge profili üzerinde çok farklı yapılar oluşturabilirler. Akarsu vâdileri, tektonik etkiler sonucu bölgenin sıkışması sonucu yeryüzeyi üzerinde gelişen kıvrımların oluşturdukları sırtlar, akarsuyun aşındırma hızıyla eşit ya da daha yavaş yükseliyor iseler akarsular aktıkları yataklarını aşındırmak suretiyle koruyabilirler. Yatağını derinleştirerek koruyabilmiş ve akarsu ile gelişmiş dar ve derin kanyonlar oluşturmuş bu tür vâdilere antesedant vâdiler denmektedir.

Yüksek eğimli alanlarda hızlı ve düzensiz rejimle akan akarsular, eğim değerinin anîden değiştiği düzlük alanlara geldiklerinde bünyelerinde taşıdıkları sedimentleri taşıyamayarak vâdi tabanına yığarlar. Bu işlem sonucunda akarsu, yığdığı sedimentler içerisinden geçebileceği yollar kazar ve ana vâdi içerisinde pek çok kanaldan oluşan örgülü bir akarsu sistemi oluşur. Yataya yakın düzlük alanlarda enerjisini iyice kaybeden akarsu bu kez farklı dayanım ortamlarından geçerken dolambaçlı nehir ve bükümleri yani menderesleri oluşturmaya başlar. Akarsuyun aşındırması, akarsu yatağı virajının dış bölgelerinde daha hızlı olup aşındırmaya devam etmesi ve akıntının az olduğu virajın iç kesimlerinde alüvyal çökellerin (point bar çökelleri) çökelip kara ortamını gittikçe büyütmeleriyle akarsu yatağı iyice kıvrımlanır, menderesler daralır ve sonunda koparlar. Akarsu, yatağını değiştirerek yeni daha kıvrımsız ve gittikçe olgunlaşan daha kısa, düz bir mecra boyunca akmaya devam eder. Menderesli sistem olarak bilinen bu tür geometriler, akarsuların düzlük alanlarda çokça oluşturdukları bir şekillenmedir.

Akarsular, deniz ve göle katıldıkları alanlarda deltaları oluştururlar. Deltalar, akarsuların denize ulaştıkları yerlerde taşıdıkları maddeleri biriktirmesiyle oluşan üçgen biçimli alüvyal ovalardır. Deltaların deniz yönündeki uzantılarında, su enerjisinin yüksek olmasıyla kaba taneli sedimentlerin yatay katmanlar hâlinde sahile taşınarak üst üste biriktirildiği karayı oluşturan kıyı ve kıyıya yakın düzlükler setüstü yatakları, deltanın deniz tarafında ince kum tabakalarının, yatay tabakalar altında açısal uyumsuzlukla yer alan ve eğimli tabakalar oluşturan deniz içinde şev bölümünde çökeldiği setönü yatakları; deltanın açık deniz dibi düzlüğünde yer alan ve kil-çamur gibi ince taneli malzemenin yatay katmanlar hâlinde çökeldiği bölgeler ise setaltı yatakları olarak adlandırılır. Bu üç yatak, karadan malzeme geldikçe, deltanın oluşup büyümelerini sağlarlar.

İnsanlara zarar veren, can ve mal kaybına yol açan doğal olaylara doğal afet adı verilir. Doğal afetlerden olan aşırı yağışların oluşturduğu sellenme, taşıdığı sedimentleri düşük eğimli alanlara doğru bırakmakta, aşırı su gelimi nedeniyle de düşük kotları içeren yataya yakın topoğrafyada, dere yatağından taşarak karalarda taşkınlara neden olmaktadır. Aşırı yağış ve anî kar erimelerinden sonra su debisi artıp hızla yükselen sular, doğal olarak drene oldukları akarsu yatağından taşarak, akarsu yatağını çevreleyen düz araziye

taşıdığı sedimentleri bırakır. Bu araziye taşkın ovası adı verilir. Taşkın ovası düzlükleri, genellikle akarsuların daha önce uzun süreli aralıklarla tekrarlanan taşkınlar sonucu oluşan genç alüvyon çökel birikimlerinden *(alluvial deposits)* oluşmaktadır. Taşkın ovasında nehir yatağından (kanal) taşan su, yatağının dışına taşarak geniş alanları kaplar, burada enerji geniş alanlara dağıldığı için su hareketi oldukça yavaş olup bu alanlarda erozyon ve sediment taşıması yerine sediment çökelimi gelişir.

Yoğun yerleşimin olduğu büyük şehirlerde büyük zararlara neden olan taşkınları önlemek için yapılan dere ıslahlarında çalışma güzergâhı doğru projelendirilmeli, tüm ilgili mühendislik birimleri iyi hazırlanmış şartnamelere uygun ve koordineli olarak çalışmalıdır. Islah edilecek derenin tüm uzunluğu bir bütün olarak ele alınmalı, ilk ıslah çalışma noktası olarak nehir rejimli akarsularda, mansaptan, yani deniz tarafından başlanılmalı ve memba tarafına doğru kesiksiz, eksiksiz ve herhangi bir bölüm atlanmadan devam edilmelidir.

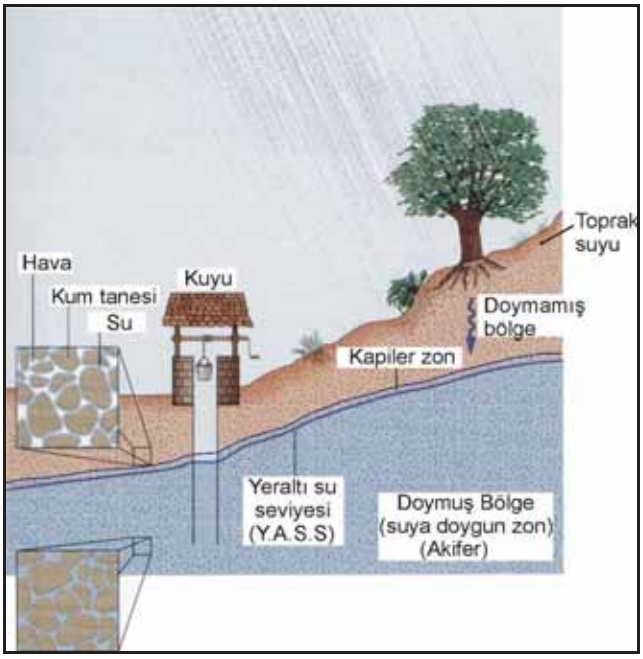
6. BÖLÜM: YERALTI SULARI JEOLOJİSİ (HİDROJEOLOJİ)

6.1. Giriş

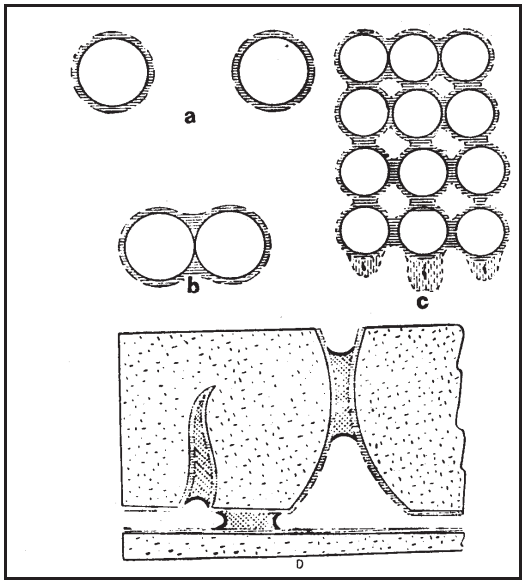
Bölüm 5'de yüzeysel akışta da değinildiği üzere; hidroloji (=su bilimi, *hydrology*); yerküre üzerindeki yüzey sularını, bunları doğuran yağış ve çeşitleri, hareketi, buharlaşması ve bunların ölçülmesi ile yer altındaki suyun dağılımını, mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Hidroloji, suyun dünyadaki dağılımını ve özelliklerini; hidrolik ise yerüstü ve yeraltı sularının hidrodinamiğini incelemektedir. Yer altına sızan sular da yeraltı sularını meydana getirirler.

Bu bölümün konusunu oluşturan **yeraltı suları jeolojisi (=hidrojeoloji**, *hydrogeology*); yer kabuğu içinde bulunan suların hareketini, fiziksel ve kimyasal özelliklerini, çeşitli kayaçlar içinde bulunuş şekillerini ve bunlara etkiyen faktörleri inceleyen bir bilim dalıdır ve kısaca yeraltı suları ile ilgilenir. Bir bölgenin hidrojeolojisi ya da **hidrojeolojik etüdü** denince, akla, yeraltı sularının araştırılıp bulunması, yer altından alınması, bölgedeki yeraltı suyu miktarının saptanması ve çıkarılması için yapılması gerekli kuyular, sondajlar, pompaj işlerinin tümü ve hukukî yönleri akla gelmektedir (Erguvanlı, Yüzer, 1973). Suyun yer altına süzülmesi; taneler arasındaki boşluklardan ve birimin bünyesinde yer alan birbirleri ile ilintili süreksizliklerin içerisinden geçmesiyle meydana gelir. Süzülen suyun bu yolculuğu, boşluksuz ve/veya boşluklar arası bağlantısı olmayan kayaçlara ulaşıncaya kadar devam eder. Su, bu alanlardan daha aşağıya gidemeyeceği için söz konusu geçirimsiz birimin üzerinde birikmeye başlar. Yer altında geçirimsiz birimin (örn. kil-şeyl) üzerinde yer alan ve suyun geçirimli birimler içinde (örn. kum, çakıl) birikip depolandığı ve yararlı miktarda yeraltı suyu sağlayabilecek kapasitedeki doğal geçirimli katmana **akifer** (=**nap**: yeraltı suyunu taşıyan katman; *aquifer*) veya suya doygun bölge; akiferde biriken sulara ise **yeraltı suları** *(groundwater)* adı verilir. Çakıl, kum,

çatlaklı kumtaşı ve yüksek gözenekli veya bol ve açık çatlaklı, kırık zonları içeren granit ve metamorfik kayalar, eğer içlerinde yeraltı suyu birikmiş ise oldukça iyi akifer olabilirler. Kil gibi geçirimsiz tabakalardan ise yeraltı suyu alınamaz, ancak akiferlerinin tabanında, üstünde veya arasında yer alıp, suyun hareketini, yönünü veya değişik türde akiferlerin oluşmasında önemli rol oynarlar (Şekil 6.1, 6.2, Tablo 6.1).



Şekil 6.1. Suyun yer altında birikmesi ve serbest akifer oluşumu.



Şekil 6.2. Yer altında suyun bulunuş şekilleri. “a” ve “b” tanelerin etrafındaki film suyu; “c” suyun tanelerin etrafını sarması ve yağışların devamı ile oluşan ve serbest YASS’yi oluşturan çekim suyunun aşağıya akması; “d” tanelerin arasında boşluk ve çatlakların kenarları boyunca tutulan peliküler sular. Peliküler sular kılcal (kapiler) saçağın üstünde yer alırlar (*Tolman*, 1937).

Tablo 6.1. Yeraltı sularının düşey dağılışı, zemin yüzeyinden zemin içine doğru oluşan zonlar ve alt zonlar (Kayabalı, 2006).

Havalanma (Doymamış Bölge)	Toprak suyu (Toprak nemi)	Vadoz Su	Higroskopik	Süzülme	Süreksiz kılcal doygunluk	
	Ara		Peliküler		Yarı devamlı kılcal doygunluk	
	Kılcal saçak		Kılcal		Devamlı kılcal doygunluk	
Doygunluk (Doymuş Bölge)	Freatik zon	Freatik Su	Yeraltı suyu	Sızma	Serbest yeraltı suyu	YASS

6.2. Akifer Oluşumu ve Yeraltı Sularının Birikmesi için Gerekli Koşullar

Yer altında bir akiferin *(aquifer)* oluşabilmesi için söz konusu zeminde; birim/birimleri oluşturan tanelerin iri olmaları yanında, tanelerin arasında-içinde, dizilişinde veya bu birimleri sınırlayan süreksizliklerin içerisinde suyun depolanabileceği yeterli boşluğun, yani gözeneğin (porozite) bulunması gerekir. Kaya ortamında da taneler arasındaki boşluklar, içerdikleri açık çatlakların ve çatlak zonlarının birbirleriyle ilintili olmaları ve aynı zamanda suyu yeterli düzeyde, bir alandan diğerine iletebilecek açıklıkta olmalıdırlar.

Yeraltı sularının ekonomik olarak kullanılabilmesi için, zemin ve/veya kaya ortamının boşluk oranı (e) ve/veya porozitesi (n) ile geçirgenlik (**permeabilite-***permeability*) en önemli parametrelerin başında gelir. Geçirgenliği belirleyen permeabilite katsayısıdır. Zeminin su geçirgenlik özelliğini gösteren parametreye **permeabilite katsayısı** *(coefficient of permeability),* **(k)** denir. Birimi hız birimi olup m/s veya cm/s cinsinden ifâde edilir. Zeminler üzerinde yapılan çalışmalar permeabilite katsayısının oldukça geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte aşağıda Tablo 6.2'de bazı zeminler için tipik permeabilite katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.2. Zeminler için tipik permeabilite katsayıları, k (cm/sn).

Zemin Cinsi	Permeabilite Katsayısı, k (cm/sn)
Çakıl	> 1,0
Kum	1,0 -10^{-4}
Silt	10^{-4}-10^{-7}
Kil	10^{-7}-10^{-9} (nadiren 10^{-10}, 10^{-11})

Kayalarda permeabilite katsayısı, kaya kütlesinin çatlaklılık ve ayrışma derecesine büyük ölçüde bağlılık göstermektedir. Genel olarak som-çatlaksız ve boşluksuz bir kaya kütlesinde permeabilite katsayısı yaklaşık olarak 10^{-14} m/sn – 10^{-10} m/sn, bloklu kaya kütlelerinde 10^{-8} m/sn – 10^{-6} m/sn, çatlak takımları içeren kırıklı ve ayrışmış kaya kütlelerinde 10^{-3} m/sn – 10^{-1} m/sn'dir. Yer altına sızan sular, bu özelliklere sahip bir akifer içerisinde, altlarında geçirimsiz tabakalar olmak kaydıyla birikir ve birimin içerisinde iletimi olan tüm boşlukları tamamen doldururlar. Boşlukların tamamıyla suyla dolu olduğu bölgenin üst sınırı, yeraltı su tablası veya **yeraltı su seviyesi** (YASS) olup bu düzeyin altında yer alan su, ekonomik olarak değerlendirilebilir. Ancak bunun yanı sıra, yeraltı su seviyesi altına inen inşaat çalışmalarında (inşaat temeli, tünel vb.), çalışma alanının su ile dolması nedeniyle oluşacak zorluklar, inşaat mühendisliği açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir problemler arasında yer almaktadır. Bu tür problemler, drenaj veya izolasyon gibi gerekli mühendislik önlemleriyle bertaraf edilebilmektedir. Yeraltı su düzeyinin hemen üzerinde kalan bölgeye kılcal-kapiler bölge veya **kapiler zon** (kılcal saçak) adı verilir. Zemin cinsine bağlı olarak değişen kalınlıklarda yer çekimine bağlı olmayan, kapilerite ile yükselen suya **kapiler su** denir. Kapiler su; sıvılarda gözlenen yüzeysel çekme kuvvetleri tarafından kontrol altında tutulmaktadır. Değişik zeminlerde yaklaşık kapiler yükselme (m) Tablo 6.3'de verilmektedir.

Tablo 6.3. Değişik zeminlerde yaklaşık kapiler yükselme (metre), (*Hansbo,* 1975).

Kum (Gevşek)	0,03 – 2,00
Kum (Sıkı)	0,04 – 3,50
Silt (Gevşek)	0,30 – 2,00
Silt (Sıkı)	0,40 – 3,50
Kil	≥ 10,00

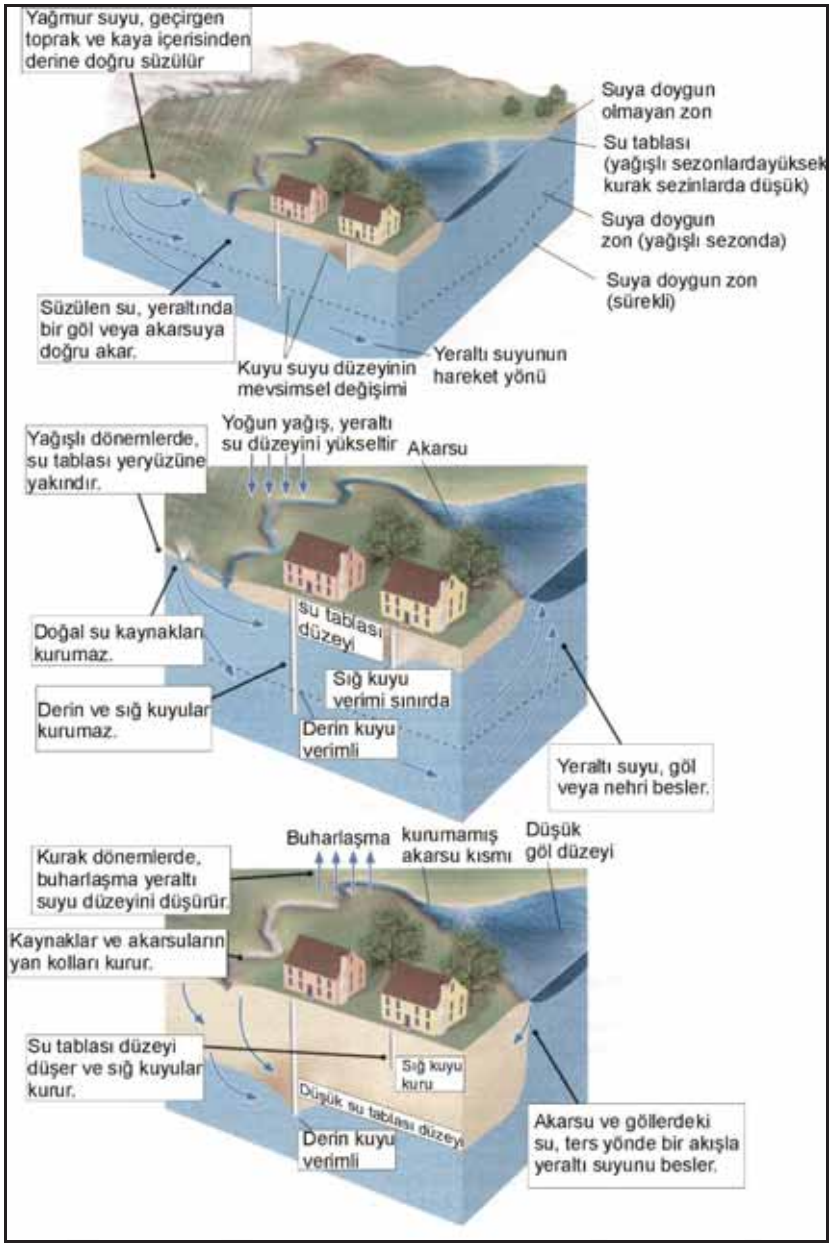
Kapiler zonda (kılcal saçak) yer alan su, yeraltı suyu olarak alınamaz ve bu zon içine bir drenaj sistemi yerleştirmek suretiyle kılcal su drene edilemez.

Kapiler zonun da içinde yer aldığı, suyun yer altına süzüldüğü bölgeye **doymamış bölge** *(unsaturated zone)*, **havalanma bölgesi** veya **vadoz bölge** adı verilir. Doymamış bölgede (havalanma zonu) kum içinde zaman zaman rastlanılan sürekliliği olmayan geçirimsiz kil mercekleri üzerinde az miktarda oluşan sulara ve su tablasına **tünek su** *(perched water)*, **asılı su tablası** ya da **tünek akifer** denir. Yeraltı su tablası ile zemin arasında kalan kısmı oluşturan doymamış bölgede yer alan suların çoğu, zemin taneleri etrafında çok ince ve molekül çekimi ile durmaktadır. Su, kendi molekülleri arasında çekim kuvveti sayesinde (tutma) dağılmadan kalabilmekte, moleküllerinin dipol özellikte olması nedeniyle birçok maddeye (örn. zemin) yapışabilmekte ve ıslatma özelliği taşımaktadır. Su, ***adhezyon (yapışma, *adhesion*) kuvveti oldukça yüksek olan bir maddedir. ***[Adhezyon:** Farklı iki maddenin molekülleri arasındaki çekim kuvveti; Kaya Mekaniğinde *(rock mechanics)*: Dış yükleme olmaksızın, dış basıncın sıfır olması durumunda, kayacı oluşturan farklı iki zemin malzemesi arasındaki kesme/makaslama direnci, dayanımı**]**.

Zemin yüzeyinde, suyun bitkisel toprak *(topsoil)* kısmında kalan kısmına **toprak suyu** ya da **zemin nemi** adı verilir. Toprağın altında, tanelerin etrafında bulunan zar gibi ince suya **film suyu** (higroskopik su, adsorbe su), tanelerin arasında boşluk ve çatlakların kenarında kalan sulara **peliküler su** denir ve peliküler su; bir nevi kapiler su olup zeminin su içeriğinin çok daha az olduğu ve toprak suyu bölgesinin altında, kılcal saçağın (kapiler zon) ise üstünde bulunur ve bu sular zeminden kullanım amaçlı alınamaz. Peliküler sulardan arta kalan fazla su, yer çekimi ile aşağıya doğru hareket ederek süzülür ve buna **çekim suyu** *(gravity water)* ya da hareketli su adı verilir. Çekim suyu, boşlukların serbest kalan aralıklarını doldurur ve bunlar serbest ve sızan (sızma) suları oluştururlar. Bu sular yalnız yer çekimi kuvvetleri tarafından kontrol altında tutulan sular olup statik değildirler, zemin içinde hareket edebilme özelliğine sahiptirler ve doymuş bölgede birikirler. Doymuş bölgede biriken bu sulara **yeraltı suyu** veya freatik su, üst yüzeyine su tablası, **yeraltı su tablası** veya **yeraltı su seviyesi-YASS** *(Ground Water Level-GWL)* denir. Gözenekli ortamdaki yeraltı suları genellikle laminar, karstik ortamın suları ile yeryüzeyinde engebeli ortamın yerüstü suları türbülânslı olarak akarlar. Yer altındaki boşluk ve çatlakların su ile tamamen dolmuş olduğu geçirimli tabakalara **doymuş bölge** adı verilir. Doymuş bölgede biriken suyun en üst kısmını oluşturan yeraltı su seviyesi, hidrostatik seviye olarak da adlandırılır.

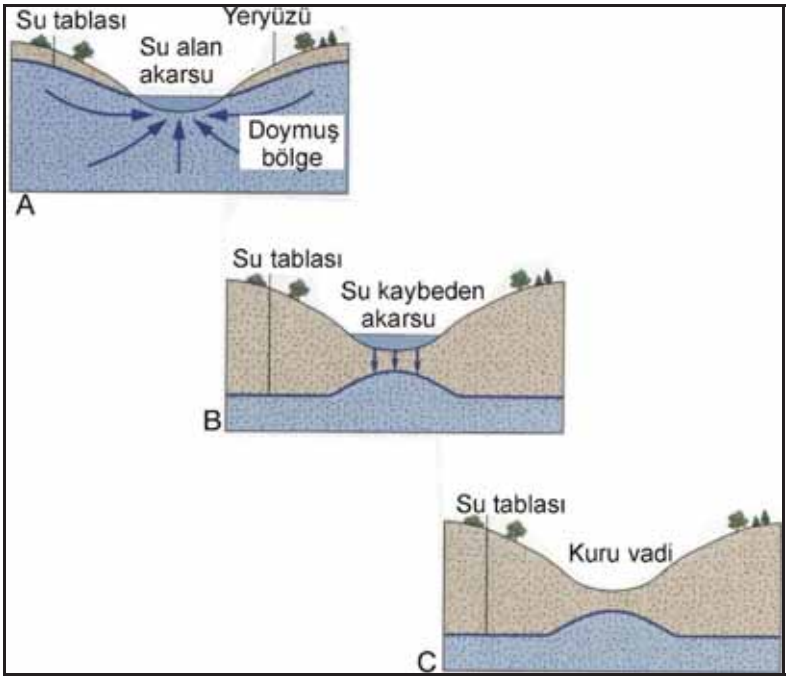
Bu seviye yeraltı suyunun hakiki yüzüdür ve yaklaşık topoğrafyayı takip eder, tepe altlarında yüksekte, vâdi altlarında ise daha alçakta yer alırlar. Doymuş bölgede biriken sular pompaj ile alınabilir. Ancak bu pompaj sırasında boşluk veya çatlakların birbirleriyle her yerde ilintili olmaması, çatlak açıklıkları ve yüzeysel gerilim gibi nedenlerle, suyun tamamının alınması mümkün değildir. Doymuş bölge içinden pompaj ya da drenajla alınabilen suya **özgül verim** (S_y - *Specific Yield*) denir. Bu, "efektif porozite" ile eş anlamdadır. Özgül verim, hidrojeolojide; doymuş hâle gelen bölgeden gravite ile alınabilen su hacminin tüm hacme oranının % ifâdesi olarak tanımlanmakta ve $S_y = (W_y/V)x100$ olarak gösterilmektedir. Burada W_y alınabilen suyun hacmi; V kütlenin tüm (katı+sıvı+gaz) hacmidir. Kumtaşları içinde hacimce % 10-20, çakıllarda % 30-45, kum-çakıl karışımında % 20-35, oranında su toplanabilir. Bu miktar suyun özgül verim kadarı, yani kumtaşlarında % 10, çakıllarda ve uniform kumlarda yaklaşık % 25-30, kumlarda % 20, ince taneleri de içeren alüvyal akiferlerde % 10-20, silt-kil gibi ince taneli tortullarda ise yaklaşık % 3 kadarı geri alınabilir. Doymuş bölgede tutulan su hacminin, kütlenin tüm hacmine oranının % cinsinden ifâdesine **özgül tutulma** (S_r - *Specific Retention*) denir. Özgül tutulma: $S_r = (W_r/V)x100$ şeklinde gösterilir. Burada, W_r tutulan su; V ise kütlenin tüm hacmidir. Gerek kayalarda, gerekse zeminlerde boşluk hacminin tüm hacme oranı **gözeneklilik (porozite)**, kaya veya zemin ortamının su geçirme özelliği ise **geçirgenlik** ya da **hidrolik iletkenlik** (**permeabilite** - *hydraulic conductivity*), olarak tanımlanmaktadır. Hidrolik iletkenliği belirten parametreye **hidrolik iletkenlik katsayısı** veya **permeabilite katsayısı (k);** hidrolik geçirgenliği ölçmekte kullanılan düzeneğe de **permeametre düzeneği** denir. Bu bilgilerin ışığı altında, bir akiferin suyu iletme yeteneğinin geçirgenlik ile kontrol edileceği açıktır. Kum ve çakıllar arası boşluklar, silt ve kil zeminlere göre çok daha büyük olduğundan yüksek hidrolik iletkenliğe sahiptirler. Bu bakımdan çakıl ve kumlar iyi bir akifer oluştururlarken, boşlukları son derece küçük çaplı olan killer ise geçirimsiz olmaları, bir başka ifâde ile su tutan yapıda **(akitard)** olmaları nedeniyle akifer oluşturamazlar. Çok yüksek gözenekliliğe sahip kil taneleri çok küçük ve aralarındaki mesafe çok dar olduğundan düşük hidrolik iletkenliğe sahiptirler. Yeraltı su seviyesi, iklimsel değişimlere bağlı olarak mevsimsel olarak değişir. Yağışın bol olduğu dönemlerde, yüzey altına süzülen su miktarı da buna paralel olarak

artacağından yeraltı su seviyesi de aylar veya yıllar içinde zamanla yükselir. Yeraltı suyundan beslenen su kaynaklarının ve akarsu-göl gibi yüzeysel tatlı su birikintilerinin debisi ve kullanım amaçlı açılan su kuyularının verimi de buna paralel olarak artar. Buna karşın, yağışın az olduğu kurak mevsimlerde, hidrolojik döngünün yeterince besleyemediği yeraltı suları, buharlaşmanın da etkisiyle bünyesinden su kaybeder ve bunun sonucu yeraltı su düzeyi düşer. Bu dönemlerdeki düşüş ve yeraltından da aşırı su çekimi nedeniyle yetersiz derinlikte açılmış olan kuyuların bazılarında kurumalar meydana gelebilir (Şekil 6.3).

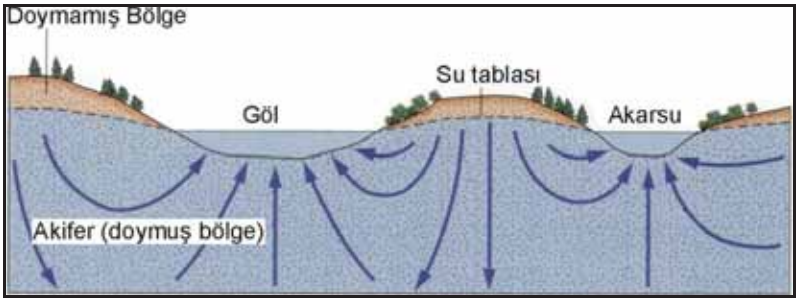


Şekil 6.3. Yeraltı su düzeyinin ve yeraltı suyundan beslenen kaynakların, mevsimsel olarak değişen yağış miktarına göre olan değişimleri (*Press* vd., 2004).

Yeraltı su tablası yamaçlarda çoğunlukla yatay bir yüzey oluşturmaz. Bu yüzey genelde yeryüzüne kabaca paraleldir (Şekil 6.4, 6.5). Bunun bir sonucu olarak yeraltı suyu, yüksek alanlardan düşük alanlara doğru akış hâlindedir. Yeraltı suyu da beklenildiği gibi yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine doğru hareket hâlindedir ve bu hareketi sağlayan etken yeraltı suyu tablasının eğimidir. Bu eğime **hidrolik eğim (i)** *(hydraulic gradient)* denir ve iki nokta arasındaki yeraltı su seviyesi farkının aradaki yatay mesafeye oranı olarak ifâde edilir. Yeraltı suyu akışı *Darcy* kanunu ile ifâde edilir. *Darcy* kanunu, birim alandan geçen yaraltı suyu akımının hidrolik eğim ile doğru orantılı olduğunu ifâde eder. Yani; akımın şiddeti ve hızı; düzgün akım durumlarında, iki nokta arasındaki toplam hidrolik yük farkı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.



Şekil 6.4. Yeraltı su düzeyindeki değişimlere göre yüzey suyu-yeraltı suyu ilişkisi. A) Alıcı nehir; B) Verici nehir; C) Kuru dere yatağı altında yeraltı su seviyesi yağışlara bağlı olarak yüzeye yakınlaşabilir (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 6.5. Yeraltı suları tarafından beslenen göl ve akarsu (*McGeary* vd., 2004).

Yeraltı su düzleminin yeryüzünü kestiği alanlarda, yeraltı suyu yeryüzüne kaynak (=pınar, göze, memba) olarak çıkar. Eğer kaynağın çıktığı alan bir akarsu vâdisi veya göl ise bu durumda yeraltı suyu söz konusu akarsuyu besler. Ancak kurak dönemlerde yeraltı su düzlemi yüzeysel suların taban seviyesinin altına indiğinden, kaynakların debilerinde azalma ve hattâ kurumalar baş gösterir. Bu durumda, yeraltı suyu tarafından beslenen yüzeysel sular alt katmanlara doğru sızarak, yeraltı suyunu beslemeye başlar. Bu beslemenin ileri aşamasında ise yüzeysel sular da kuruyabilir.

6.3. Akifer Ortamları ve Akifer Türleri

Yer altında gözenekli ve geçirimli özelliğe sahip su ileten tabakalara veya kayaçlara **akifer** *(aquifer)* denildiğine daha önce değinilmişti. Boşluksuz ya da içerdiği boşluklar birbirleriyle ilişkili olmayan veya başlangıçta birbirleriyle ilişkili veya ilişkisiz boşlukları bulunan, fakat daha sonra zor eriyen bileşimli malzeme ile (örn. çatlaklar içinde suların çökelttiği silis damarları) boşluklarının doldurulması sonucu boşluksuz hâle gelen tabakalar veya jeolojik ortamlar yeraltı suyu akımı oluşturamazlar ve akım bileşenleri yoktur. Geçirimlilikleri (permeabilite, *permeability*) pratik olarak sıfır olan ve bünyelerinde su tutma ve su geçirme özelliğine sahip olmayan bu tür geçirimsiz tabakalara **akifüj** *(aquifuge)* adı verilir. Diğer bir ifâde ile akifüj, suyu taşımayan, iletmeyen gözeneksiz, geçirimsiz tabakalardır. Akifüje örnek olarak som granit, tüm çatlakları silis dolgulu granit, bazalt veya kuvarsit gösterilebilir. Bir tabakanın akifer olabilmesi için geçirgenliğinin yüksek olması yanında suyu bünyesinde tutabilmesi için geçirimsiz bir tabakanın üzerinde bulunması gerekir. Daha önce de tariflendiği üzere, kayaçların geçirgenlik özelliğini gösteren parametreye permeabilite katsayısı (k) denmektedir. Bir akiferin geçirgenliği, çoğu zaman $k=10^{-5}$ m/sn'den büyüktür. Bunun aksine, geçirgenliği (permeabilitesi) $k= 10^{-9}$ m/sn'den düşük tabakalar mühendislik açısından geçirimsiz olarak göz önüne alınır ve bu tür bünyelerinde su tutabilen, gözenekli, ancak bu suyu yok denecek kadar az, yani pratik olarak suyu iletmeyen tabakalara **akiklüd** (geçirimsiz formasyon, *aquiclude*) adı verilir. Akiklüd'e kil, siltli kil, çamurtaşları veya 'şeyl'ler örnek olarak verilebilir

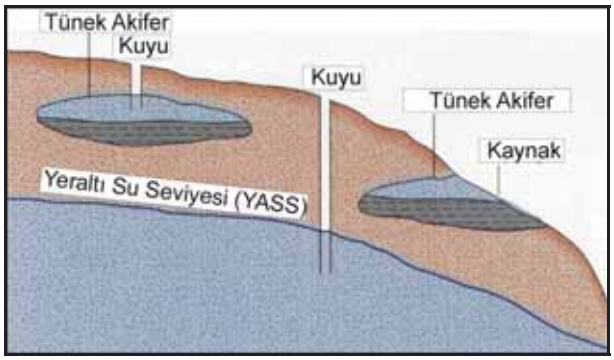
Akitard *(aquitard)*: Boşluklarına uzunca bir süre içinde aldığı suyu, düşük bir hızla da olsa iletebilen ve doğada genellikle iki akifer ortam arasında bulunan, yani çok yavaş hızda iletmekle birlikte, komşu akiferlere büyük miktarlarda su geçişine izin veren tabakalardır. Kısaca, akitard, bünyelerinde su taşıyan, ancak yavaş ileten, gözenekli, ancak yarı geçirimli kayaçlardır (örn. siltli kum, killi ince kum).

Kum ve çakıldan oluşan tabakalar, akifer özelliklerine sahip olup bol su verirler. Bu tür akiferlere **alüvyal akifer** *(alluvial aquifer)* denir. Ayrıca karstik boşluklara (karst, *cavities*) sahip olan kireçtaşları genelde içerdikleri gözeneklilik (porozite, *porosity*) ve erime boşlukları nedeniyle su kaçaklarının olduğu birimler olarak kabul edilse de, altlarında geçirimsiz bir ortam ve suyun birikmesine uygun jeolojik yapı mevcudiyetinde çok iyi bir akifer ve oluşturdukları karstik kaynaklar ise yüksek debiye sahip olabilmektedir.

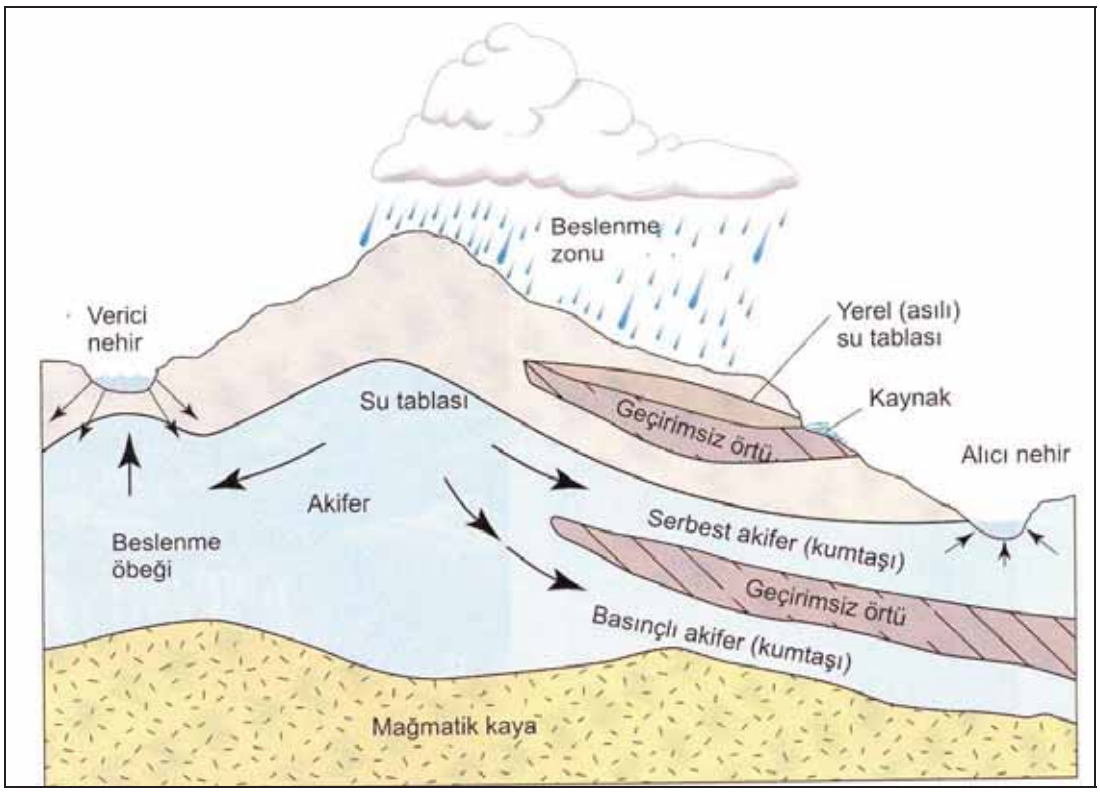
Akiferler; genel olarak **serbest akifer**, **basınçlı akifer** ve **sızdıran akifer** olmak üzere üç esas gruba ayrılabilir (Şekil 6.6.A, B, C ve D). Bu üç tür akifer, doğada bazen bir arada bulunabilir. Serbest ve basınçlı akiferlerin üst üste, bir arada bulunan türüne **karışık akifer** *(fra: nappes diverses)* ismi verilir. Karışık akifer, yer yer serbest, yer yer basınçlı akifer karakterinde su taşıyan tabakalardan oluşmaktadır (Şekil 6.7). Bu tür akiferlere alüvyonlarda, birikinti konilerinde ve çatlaklı kayaçlarda rastlanılabilir (örn. dağ yamaçlarında alüvyal oluşuklarla girik yamaç molozları, bazı birikinti konileri ve ezik zonlar içeren çatlaklı kayalar).

Her taraftan su alabilen bir arazi içinde bulunan yeraltı sularını taşıyan tabakalara **serbest akifer** *(unconfined aquifer)* denir. Serbest akiferlerin üzerinde sızmayı engelleyecek geçirimsiz bir tabaka bulunmaz. Serbest akifer, alttan geçirimsiz birimle sınırlı, üstten atmosferik koşullara açık olup doygun zonun üst seviyesi atmosferik basınca eşit olan akiferdir. Atmosfere açık olmasından dolayı, akiferdeki su, atmosferik basınç ile dengededir. Bu tip akiferlerin üst seviyeleri ölçülerek o bölgenin yeraltı su tablası (serbest yeraltı su seviyesi) haritası yapılır (Uygulama 6.7.1). Serbest akiferlerde yeraltı su seviyesi yamaçlarda topoğrafyaya uyar, bazen de yeryüzüne kadar yükselerek yüzey sularını besler. Serbest akiferde, üstte doymamış bölge içinde (vadoz zon) yer alan geçirimsiz içbükey kil mercekleri üzerinde biriken sular tarafından oluşturulan düşük verimliliğe sahip doygun zonlara **tünek akifer** (asılı yeraltı suyu veya vadoz su zonları) adı verilir. Doygun olmayan bölgede yer alan tünek

akiferi oluşturan geçirimsiz içbükey merceksi tabaka üstünde asılı olarak duran su yüzeyine de **asılı** (yerel) **su tablası** denir (Şekil 6.6.A, B).



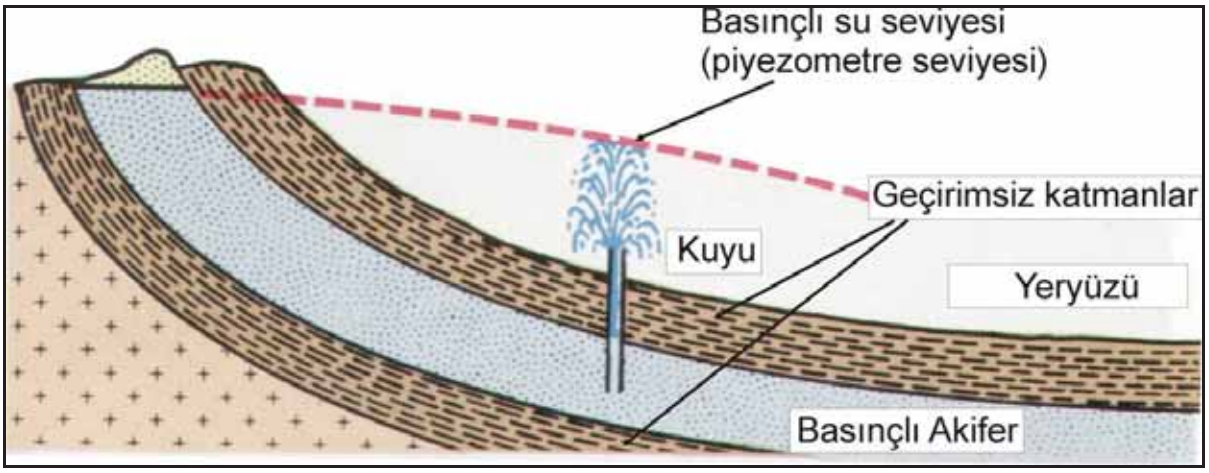
Şekil 6.6.A) Serbest akifer ve serbest akiferin doymamış bölgesinde yer alan tünek akifer.



Şekil 6.6.B) Asılı su tablası (=tünek akifer), serbest akifer, basınçlı akifer ve alıcı-verici akarsular (Akyol, Kayabalı, 2006).

Alt ve üst kesimleri geçirimsiz birimlerle sınırlandırılmış, akiferdeki yeraltı suyu basıncı atmosferik basıncından daha büyük olan yeraltı sularını taşıyan tabakalara **basınçlı akifer** *(confined aquifer)* veya **artezyen** *(artesian)* adı verilir (Şekil 6.6.C). Basınçlı akiferler, geçirimsiz iki ya da daha fazla tabaka arasında bulunduğundan serbest su düzeyleri yoktur. Bu tür akiferlerde

yapılan sondajlarda su, sondaj içerisinde kendiliğinden yükselir. Suyun yükseldiği bu düzeye **piyezometrik seviye,** (basınçlı su düzeyi, *piezometric level*) adı verilir.

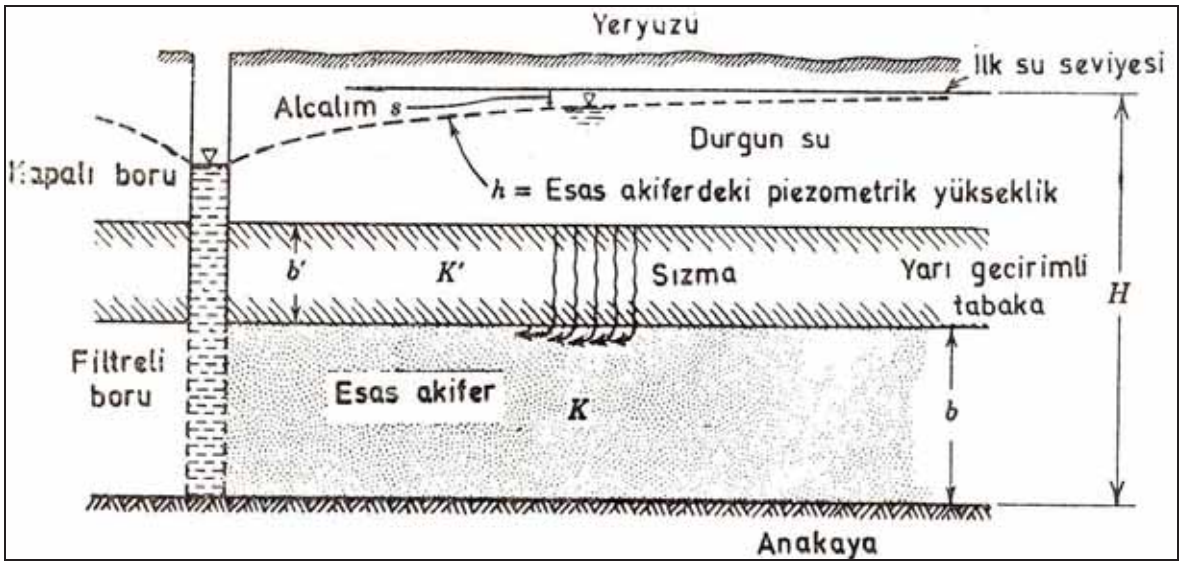


Şekil 6.6.C) Basınçlı akifer.

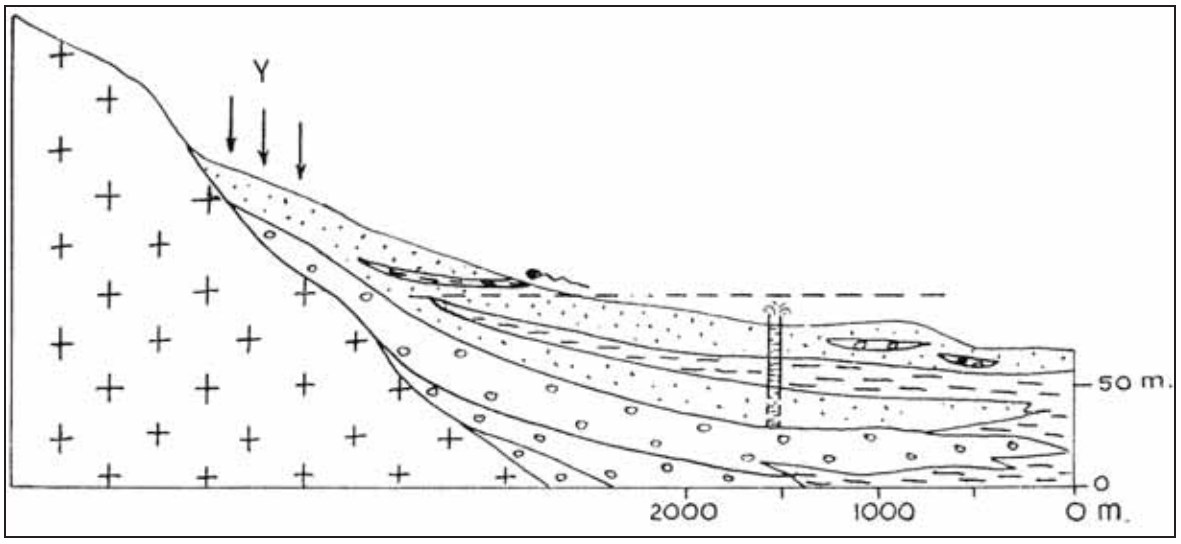
Piyezometrik su düzeyi, sondaj yapılan bölgedeki serbest akiferlerin yeraltı su seviyesine yakındır. Basıncı, genellikle de hidrostatik basıncı ölçen aletlere **piyezometre** *(piezometer)* denir. Basınçlı akiferlerde suya doygun akifer ortam ile üstünde yer alan akifüj, akiklüd veya akitard ortamı ayıran sınır üzerindeki hidrolik basınç, normal atmosfer basıncından büyüktür.

Akiferlere giren ve akiferlerden alınan su miktarları, son yıllarda birçok yerde doğruya çok yakın şekilde ölçülmüş ve bu ölçülerden alınan su miktarının akifere girenden daha çok olduğu görülmüştür. Bunun üzerine, akiferlerin alt ya da üstlerinde bulunan geçirimsiz veya yarı geçirimli tabakaların suları sızdırdıkları saptanmış ve bu tür akiferlere **"sızdıran akifer"** ya da **yarı basınçlı akiferler** (=sızıntılı akiferler, *leaky aquifers*) ismi verilmiştir (Şekil 6.6.D). Sızdıran akiferler, alt ve üst kesimleri yarı geçirimli birimle sınırlanmıştır ve bu akiferler; basınçlı veya serbest akiferi sınırlayan yarı geçirimli ortamlardan su kazanıp, kaybeden akiferlerdir. Yeraltı suyu basıncı atmosferik basınçtan daha yüksektir. Bu nedenle, su tablası seviyesi, suyun alçalıp, yükselebildiği bir seviyeden yani piyezometrik düzeyden söz edilir. Sızdıran akiferlerde Şekil 6.6.D'de görüldüğü gibi basınçlı (K) akiferin üstünde bulunan yarı geçirgen siltli killi tabakalardan her iki yönde su hareket etmektedir. **(K)** akiferinden pompajla fazla su alındığında yarı geçirimli sızdıran

(K′) akiferi üstteki serbest akiferden suyu **(K)** ye iletmektedir. Bundan dolayı yeraltı suları hidroliğinde yapılan hesaplamalarda “Sızdırma Faktörü” ve Sızdırma Kat Sayısı” gibi iki katsayı tanımlanarak kullanılmaktadır.



Şekil 6.6.D) Sızdıran Akifer.



Şekil 6.7. Karışık Akifer (Y=Yağış).

6.4. Karst, Karstlaşma ve Yeraltı Suları

Sülfatlı ya da karbonatlı kayalarda, yerüstü ve yeraltı suları nedeniyle zemin yüzeyinde ve yer altında görülen önceden gelişmiş ve gelişmekte olan erime boşluklu arazi yapısı ya da morfolojik şekil ve biçimler **karst** olarak tanımlanabilir. **Karstlaşma** *(karstification)*, erime özelliğine sahip karbonatlı

(kireçtaşı ve dolomitler) ve sülfatlı kütlelerin (jips ve anhidritler), asidik özellikli suların etkisi ile oluşan erime (çözünme) sürecine verilen genel addır. Eriyebilir kayalardan oluşmuş alanlarda, suların etkisiyle kimyasal ayrışma sonucu meydana gelmiş arazi şekillerine **karst topoğrafyası** *(karst topography)* adı verilir. Karstlaşma erime sürecinin bir sonucudur. Bu süreç içinde, örnek olarak az miktarda kil, kuvars ve demirli maddeler içeren kireçtaşlarının çözünmesi ile yabancı maddeleri oluşturan kil, demir ve kuvars mineralleri yüzeyde, çatlaklar içinde, erime boşluklarında ve süreksizlikler içinde artık (rezidüel) kırmızı toprakları *(Terra-Rossa)* oluşturur. "Kırmızı toprak" anlamına gelen ve Akdeniz toprağı olarak da adlandırılan **Terra-Rosa**; karbonatlı kayaçların ayrışması sonucu bakiye olarak kalan killi, silisli, demirli, feldspatlı katı, karbonat içermeyen ve ayrışmayan tortulardan oluşan humusça fakir, bir çeşit kırmızı kil zemindir. Kireçtaşının ayrışması sonrasında sulardan çözünmeyen mineraller, birlikte bu kil tortuları oluşur. Oksidasyon koşullarında, zeminlerin su seviyesinin üstünde yer almaları durumunda kilin içindeki demir, demir oksite (pas) dönüşür. Bu da kile karakteristik kırmızıdan-kahverengi ve turuncuya değişebilen rengini verir. Terra Rosa zeminlere tipik olarak Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde rastlanılmaktadır. Terra-Rosa'lar, genellikle Akdeniz Bölgesi'nde görülen, ham humus rengini andıran, ancak humusça fakir olmasına rağmen tarım açısından da günümüzde sulu tarımda oldukça verimli hâle getirilebilen topraklardır. Terra-Rosa'ların kalınlığı ve oluşumu; kireçtaşı katmanlarının kalınlığına, içerdikleri erimeyen minerallerin miktarına ve zamana bağlıdır. Oluşum süreçleri, binlerce yıllarla ifâde edilebilir.

Su, atmosfer içersinden yağmur olarak geçmesi sırasında bünyesine aldığı karbondioksitin çözünmesi sonucu karbonik aside dönüşür. Yağmurun, yeryüzüne ulaşması sonrasında topraktan süzülme aşamasında, bünyesine daha fazla karbondioksit alması ve daha yüksek bir asidite değerine ulaşması mümkündür. Sonuçta eriyebilen karbonat kayalara ulaşan asidik özellikli su, bu kayaların bünyelerinde bulunan süreksizlikler boyunca kayanın içerisine girmek suretiyle süreksizliklerin çeperlerini eritmeye ve böylece genişletmeye başlar. Eriyebilen karbonatlı kayalar içerisinde bu şekilde kimyasal ayrışma ile oluşmuş değişik boyutlardaki boşluklara **karstik boşluk** (karst, *cavity*) adı verilir. Karstik boşluklar genellikle, fissür, çatlak, fay, tabaka yüzlerinde süreksizlikler boyunca oluşup gelişmektedirler. Kalkerlerin içinde çoğun

$MgCO_3$, bir miktar kil ve silis bulunabilir. Karstlaşma; saf kalkerlerde daha fazla, kumlu-killi kalkerlerde ve marnlarda *(marl)* ise daha azdır.

Bir üst paragrafta da belirtildiği gibi karstlaşmanın oluşabilmesindeki en önemli etken, suyun içerisindeki CO_2 miktarıdır. Zira, kireçtaşları saf suda çözünmezler. Karstlaşmayı CO_2 yanında kayaçların kimyasal bileşimi, eriyebilme dereceleri, iklim koşulları, geçirgenlik (hidrolik iletkenlik) ve gözeneklilik (porozite) ile süreksizlikler gibi diğer önemli faktörler de yardımcı olmaktadır. Sular, içerlerinde az da olsa eriyik hâlinde CO_2 içerirler. CO_2'nin bir kısmı gaz, bir kısmı da erimiş hâldedir. Atmosferde çok az miktarda bulunan CO_2 ; zemin içinde organik maddelerin çürümesiyle daha da zenginleşir. Yerin derinliklerinde ısı ve basınç artışı ile eriyik hâlde bulunan karbondioksitin bir kısmı H_2O ile birleşir: $CO_2+H_2O\leftrightarrow H_2CO_3$ oluşur. Hafif asit özellikli hidrojen karbonat=karbonik asit (H_2CO_3) kalker üzerine etkir ve $H_2CO_3+CaCO_3 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$ yani asit özelliği daha yüksek kalsiyum bikarbonat meydana gelir. Böylece karbonat kayacı, çözelti hâlinde çok uzaklara taşınır ve karbondioksitin uçmasıyla tekrar ikincil olarak çökelir. Ayrıca zaman, biyolojik etkiler, suların durgun ya da hareketli oluşları, içerlerindeki CO_2 miktarına ve bunun H_2CO_3 hâline geçmesine ve kalkerleri eritme derecesine etki yapmaktadır.

Karstlaşma sonucu, yer altında değişik büyüklüklerde boşluklar oluşabilir. Bu boşluklar yeraltı suyunun bazı alanlarda karbonat kayalar içerisinde büyük hacimlerde hareket etmelerine neden olur. Çoğun eriyebilen kütlelerde geniş erime çatlakları, mağara olarak adlandırılan karstik boşluklar yeraltı nehirlerini oluşturur ve su akımları buralarda türbülanslı olur. Karstik yapıların sınırları, karbonat kayalarının bölgedeki yayılımı ile kontrol edildiğinden, yüzey ve yeraltı sularının karstik boşluklar içerisinde kaybolmasına ve kilometrelerce mesafe ötede, çok büyük miktarlarda yeryüzüne çıkarak **(karstik kaynak)** bu alanlarda akarsular oluşmasına neden olurlar. Meselâ Antalya-Manavgat Çayı'nı önemli oranda besleyen ve günümüzde Oymapınar Baraj Gölü altında kalan Dumanlı kaynağı 50 m^3/sn'lik debisi ile dünyada kayıtlara geçmiş olan en önemli karstik kaynaklardan birini oluşturmaktadır.

Lapya, dolin, obruk, uvala, polye, ve **mağaralar;** kireçtaşı ($CaCO_3$), dolomit [$CaMg(CO_3)_2$], jips [$(CaSO_4.2H_2O)$] ve kaya tuzu (=Halit; NaCl) türü kayaçların erime ile (çözünme, kimyasal ayrışma) meydana gelen karstik yapılı jeomorfolojik şekillerdir. Bu erimeler; küçükten büyüğe doğru lapya, dolin, obruk, uvala ve polye olarak adlandırılır ve bunlar yer üstünde görülen erime şekillerini *(sinkhole)* oluştururlar. Mağaralar ise yer altında oluşan karstik boşluklar olup içlerinde sarkıt ve dikitler gelişebilmektedir.

Lapya (erime oluğu; *karren*, *lapiez*); çoğunlukla kireçtaşı, dolomit(it) yüzeylerinde karstlaşma başlangıcında görülen erime ile oluşan, genellikle parmak girecek ebatta, yüzeyleri boş bal peteği görünümlü, kenarları keskin yiv ve oluklardır. En küçük karstik ayrışım şekli olan lapya, genellikle bıçak gibi keskin kenarlı olup derinlikleri birkaç mm; düşey/düşeye yakın süreksizlikleri içeren kayalarda ise genellikle birkaç metre (yarık) derinlikler arasındadır. Şekilleri oluk, kanal, tencere veya delik biçiminde de olabilmekte, arazi morfolojisi, yeni çapalanmış ya da yeni sürülmüş bir tarla benzeri pürüzlü görünümündedir. Bu morfolojik yapıların ilk oluşumları, yağmur damlacıkları ve sularıyla gelişir. Süreksizlikler boyunca gelişimleri ise daha kolay ve hızlı olduğundan, kaya yüzeyinde yarıkları oluştururlar.

Dolin'ler *(dolinen)*; çapları birkaç metreden birkaç yüz metreye kadar değişen daire veya elips biçimli çukurlardır ve çöküntü olarak da adlandırılırlar (bk. Örnek Uygulama 3.7.2.İ). Dolinlerin bazıları erime yolu ile bazıları ise yeraltı mağaralarının çökmesi sonucunda oluşurlar.

Obruk *(cenote)*; bunlar baca veya kuyu görünümünde dik yamaçlı, dairesel veya eliptik çukurlardır (dik yamaçlı dolin). Yeraltı nehirlerinin veya mağara tavanlarının çökmesi ile oluşurlar. Bazılarının tabanı kuru, bazılarınınki bir göl ile kaplıdır. Konya bölgesinin kalkerlerden oluşan (Miyosen-Pliyosen dönemi) arazi kesimlerinde çok sık rastlanır. Çapları birkaç yüz metreyi, derinlikleri 100'lerce metreyi geçebilir. Buna; çapı 300 m, derinlik 145 m olan Konya Kızören Obruğu ya da Şekil 6.8.A'da görülen Kırşehir, Obruk Köyü bitişiğinde köy yerleşiminden çok önce oluşmuş **"Obruk"** gösterilebilir.



Şekil 6.8.A) Obruk. Çapı 400 m, derinliği 65 m. Yer: Kırşehir İli, Obruk Köyü. Tarım arazisi olarak da kullanılan Kırşehir ve civarı düzlüklerinin tamamı, Pliyosen dönemi (günümüzden yaklaşık 5 milyon yıl öncesinden 2 milyon yıl öncesine kadar olan süre) genç, kızıl renkli *****sedimenter karasal (akarsu, gölsel) ortam çökellerinden oluşmakta ve obruğun tüm şevinde ve tabanında da bu istifin yer aldığı ve daha alta doğru devam ettiği görülmektedir. Bu sebepten çökme, Pliyosen dönemi çökellerinin oluşumlarından sonra güncel dönemde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Obruğun tabanında ufak bir göl yer almaktadır. Obruğun oluşum mekanizması, göl alanı altında daha derinlerde yer alan ve Paleozoyik yaşlı metamorfik Kırşehir Masifi mermerlerinin binlerce senede sular tarafından eritilmeleri ile oluşturdukları yer altı nehir veya büyük boşluklarının eriyerek tavanlarının çökmesi sonucu gerçekleşmiştir (01.12.2012).

***[Karasal çökelme ortamları:** Alüvyal, çöl, göl, buzul ve bataklık ortamları**]**.

Uvala *(uvala)*; birçok dolin veya obruğun art arda derinleşip genişleyerek birbirlerini ayıran kısımların ortadan kalkmasıyla oluşan uzunlamasına düzensiz gelişmiş, büyük koridor benzeri erime çukurlarıdır. Uvalalar, komşu dolinlerin birleşmesiyle meydana gelen karstik bir şekildir. Bunların

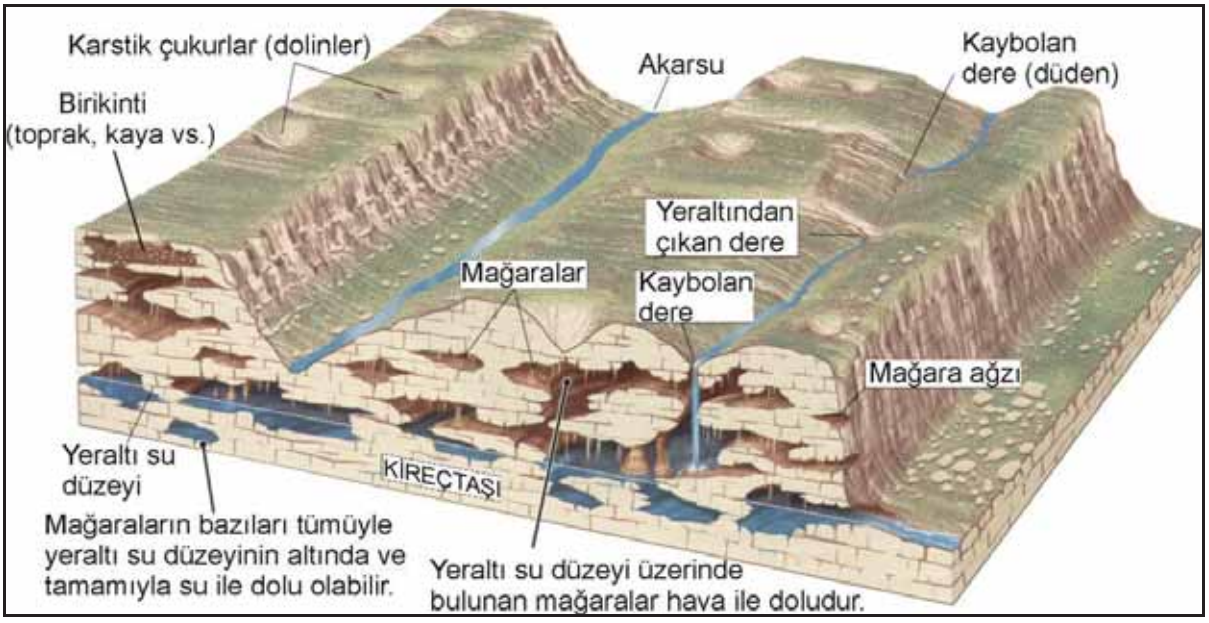
görünümleri geniş bir vâdiyi andırır ve dolinler (huni) arası duvarların yok olmasıyla oluşurlar.

Polye *(polje)*; karstik alanlarda büyük sahalarda görülen erimeler yanında tektonik süreçlerin de (tektono-karstik) gelişimlerine etken olduğu dik yamaçlarla çevrili, uvaladan daha büyük vâdilere denir. Makro ölçekte oluşmuş karstik şekillerden olan polyeler, yüzeyden kapalı havza özelliği taşırlar. Çevresi bin metreyi aşkın Akdeniz tipi derin karstın (holokarst) bütün özelliklerini taşıyan kireçtaşlarıyla sarılmış Toros Dağları içlerinde yaygınca görülen ve tektonizmadan korunmuş bölgelerde, çok geniş bir çanak yapısını oluşturan polyelerin tabanı düz, ova görünümdedir ve ovaların ortasında yer yer erimeden arta kalan, çözünme artığı kalker tepecikleri görülebilir (**Hum:** Karst ada tepesi; henüz aşınmış bir kireçtaşı yüzeyinin düzeyi üzerinde kalmış bir ufak koni biçimli tepe, kalker tepeciği). Karstik bir arazinin içinde yer aldığı bölge eğer tektonikçe aktif bir bölge içinde (örn. aktif fay zonları) yer alıyor ise polyeler oluşurken, biçimlerini bu tektonik hatlar denetler ve sonuçta polyeler, etkin fay zonları arası boyunca dizilerek şekillendirilirler. Bu durumda tektonizma, polyelerin jeo-morfolojik yapılarını denetleyici, belirleyici, gelişimlerini hızlandırıcı ana unsuru oluştururlar. Polyelere örnek olarak Antalya kuzeydoğusunda Başlar Köyü ve civarında yer alan, yüzeyden kapalı havza özelliği taşıyan Eynif Polyesi gösterilebilir. Eynif Polyesi'nin uzun ekseni KKB-GGD doğrultuda 20 km, yayla düzlüğünü oluşturan polye havza taban genişliği yaklaşık 1,5 km olup subatan karakterindeki tabanında Pliyosen konglomeraları içinde yer yer düdenler gelişmiştir (Kurt, 2001).

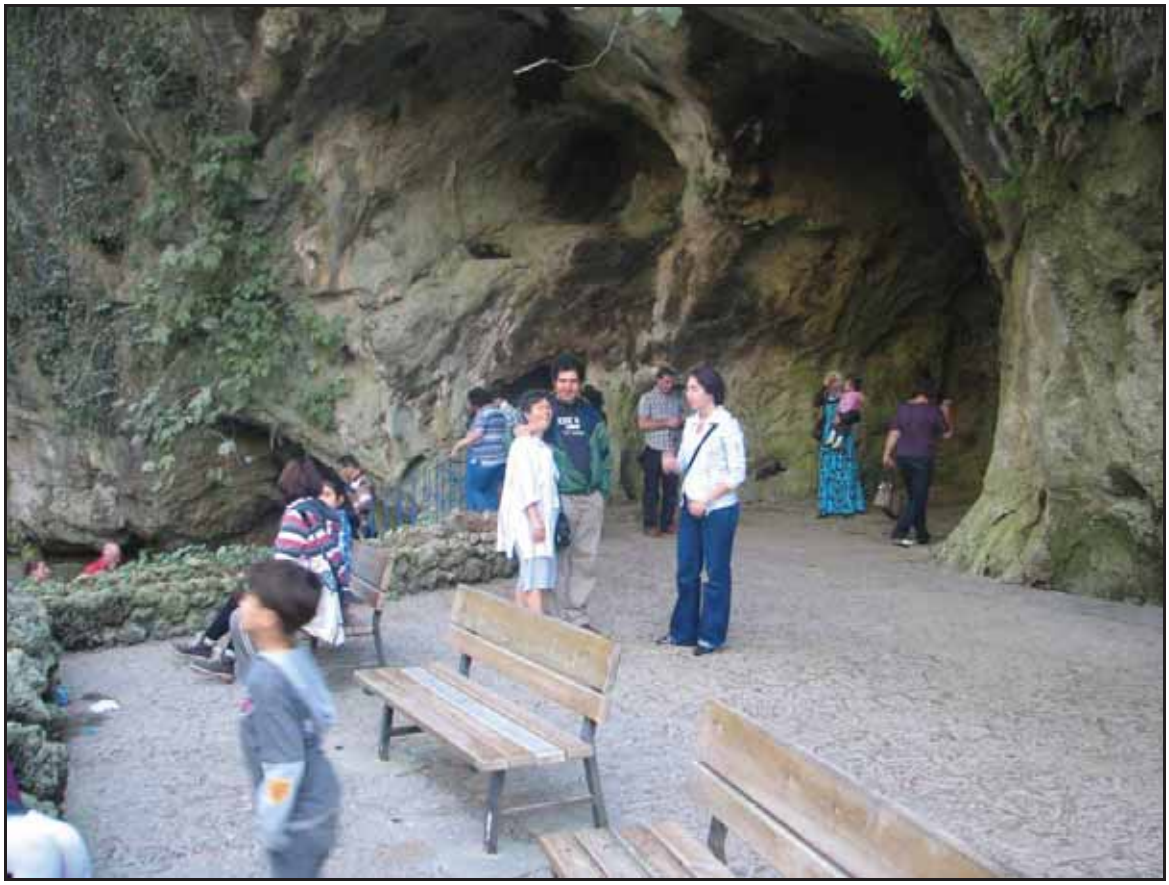
Genel olarak polyelerin tabanında, özellikle çevresindeki kalker yamaçların eteğinde su yutan mağara ağızları bulunur ve bu tür suların zemin yüzeyinden kaybolduğu su akma ağızlarına da **düden** denir. Eynif Polyesi'nde; yatay havza tabanını (râkım: +950 m) oluşturan Miyosen dönemi konglomera çökellerinin varlığı, bu dönem sonrası hızla yükselen havzada oluşan genç tektonik hareketler ve karbonatın çözünmesi nedeniyle polyenin oluşup bugünkü güncel morfolojik yapıya kavuşması, Pliyosen dönemi başlangıcından itibaren, yani yaklaşık 5 milyon sene gibi uzun bir zamanda geliştiğini göstermektedir. Çanak biçimli bu karstik yapılar, yağmur ve kar sularını yer altına taşıyan, yeraltı sularını en büyük ölçekte besleyen oluşumlardır. Eynif polyesi de, yeraltı sularını beslemekte, karbonatların sular tarafından

eritilmesiyle (çözünme) gelişen yer altı su yolları, polye taban havzasının yüzeysel sularını doğu ve güneydoğuya doğru Manavgat Çayı havzasına ulaştırarak, ekolojik sistemdeki dengeyi tamamlayıcı unsur olarak doğal bir görev yapmaktadır.

Mağara *(cave);* halk dilinde oluşum biçimi veya süreci dikkate alınmaksızın her türlü tabiî oluşmuş, genellikle bir insanın gireceği kadar büyük ve yüzeyle bağlantılı olan doğal büyük boşluklar **mağara** olarak adlandırılmaktadır. Bilimsel anlamdaki tanımı ise kireçtaşı, dolomit(it), mermer gibi $CaCO_3$ içeren kaya kütlelerinin, suların etkisiyle çözünmeleri ile bünyelerinde yer yer oluşan irili ufaklı tüm boşluklar, karstik boşluk olarak tanımlanır ve karst alanlarında yaygınca görülürler. Bunlar yatay ve düşey doğrultuda büyük ölçüde gelişmiş, karmaşık plânlı, çok katlı ve kilometrelerce uzunlukta tünel şekilli mağara sistemleri meydana getirirler. Karbonatlı kayaçlar içinde gelişen bütün mağaralar, yeraltı sularının eseridir ve özellikle kırık sistemleri gibi zayıf direnç zonları boyunca daha sık gelişmişlerdir. Küçük mağaralar daha çok erime yolu ile büyük mağara sistemleri ise hem erime hem de mağara sistemleri boyunca akan yeraltı sularının aşındırıcı etkileri ile birlikte meydana gelmektedirler (Şekil 6.8.B, 6.9).



Şekil 6.8.B) Karbonatlı kayalar (kireçtaşı, dolomit, mermer) içerisinde ve yüzeyinde erime ile oluşan farklı karstik yapılar (*Press* vd., 2004).



Şekil 6.9. Mağaralar (karstik yapılar). Antalya, Düden Şelâlesi çevresinde Antalya Travertenlerinde görülen büyük erime boşlukları (20.11.2010).

Karstik sahalarda yeraltı sularının meydana getirdiği birikim şekilleri de vardır. Yer altında yer alan mağaraların tavanından damlayan karbonatça zengin suların içindeki karbonatın çökelmesi ile tavanda asılı gelişenlerine **sarkıt** *(stalactite)* ve tabandan itibaren yukarı doğru birikenlerine **dikit** *(stalagmite)* adı verilmektedir. Diğer bir birikim şeklini ise masif, bitki dokulu ve gözenekli travertenler ile tufalar oluşturmaktadır. Kalker (kireçtaşı) ya da mermerleri eriterek içlerinde bolca erimiş hâlde $CaCO_3$ içeren sıcak sular, bir fay hattı boyunca veya kaynaklardan tekrar yüzeye çıkarak CO_2'nin uçmasıyla arta kalan karbonat tortularını bırakırlar ve fay veya kaynaklar önünde ikincil olarak travertenlerin oluşmasına neden olurlar. Kalsiyum karbonatın çökelme hızı, karbondioksitin kaçma hızı ile orantılıdır. Sıcaklık artışı, soğuk sulara nazaran buharlaşmayı ve CO_2'nin sudan ayrılmasını daha çok kolaylaştırır ve kalsiyum karbonat çökelimi daha hızlı gelişir. Karbonatlı sıcak su kaynaklarından karbondioksitin sudan hızla ayrılması ile kalker çökelimi kısa sürede oluşmaktadır. Karasal ortamda, genellikle 30°C ile 37°C arası sıcak su

kaynaklarında çökelmiş, çok az organik ve inorganik kırıntıları da içeren termal-hidrotermal kökenli kaynak suları ile oluşan bu tür karbonat çökelimlerine **traverten** denir (örn. beyazımsı açık krem renkli Denizli Travertenleri).

Soğuk (ortam sıcaklığına yakın su sıcaklığı) tatlı kaynak sularının, fay hatları boyunca, kaynaklardan yüzeye çıkarak CO_2'nin uçmasıyla yeniden çökelen, bitki ve hayvan kalıntıları içeren organik içeriği yüksek sarımsı kahverengi gibi koyu renkli karbonatlar **tufa**, kalker tüfü, tatlı su kalkerleri, soğuk su karbonatları ya da kaynak kalkerleri olarak tanımlanmaktadır (örn. Antalya Travertenleri; *Glover* vd., 2003). Yapılan çalışmaların çoğunda oluşum koşulları açısından küçük farklılıklar oluşturan tüm bu oluşuklar genelde, "traverten" olarak adlandırılmıştır.

Antalya tufaları, ya da genel adlamasıyla *****Antalya Travertenleri veya traverten kompleksi; fay kaynağından uzaklaştıkça azalan düşük sıcaklık ve az miktardaki çözünmüş madde oranı, ot, bitki, yosun, çalı ve kamış gibi bitkilerin gelişmesine zaman olarak fırsat verirler. Karbonat çökelimi bu bitkilerin üzerinde veya etrafını sarar şekilde daha kolay meydana gelirler. Daha sonra bu bitkilerin çürümesi ve bozularak yok olması ve gazların da çıkması ile ortamda yüksek oranda bol boşluk içeren traverten çökelimi gerçekleşir (örn. bitki boşluklu travertenler). Bazı çalışmalarda tufa deyimi; tam sertleşmemiş, gevşek tutturulmuş killi, bol bitki kırıntılarını içeren organik, süngerimsi dokulu, dayanımı oldukça düşük travertenler olarak da tanımlanmaktadır.

***[**Örnek: Antalya'da oluşan travertenler, genellikle soğuk sularda oluştukları varsayıldıkları için, son zamanlarda tufa olarak da tanımlanmaktadır. Ancak Antalya kuzeyinde yer alan tektonikçe aktif büyük aktif fay zonlarından kaynaklanması muhtemel ılık-sıcak suların da soğuk su kaynakları yanında, tufalar ile birlikte, travertenlerin oluşumunda en az tufalar kadar etken olmaktadırlar. Dünyada bilinen en büyük tatlı su karbonat çökelim alanı (akarsu, bataklık, göl, şelâle ortamları) olan **Antalya Traverten Taraçası** yaklaşık 650 km^2 lik bir alanı kaplamaktadır. Antalya İli ve çevresinin de yerleşim alanını oluşturan bu birimler, Toros Dağları'nın batı uzantısını oluşturan ve yaklaşık kuzeyden güneye uzanan ve Jura-Kretase yaşlı Bey Dağları olarak adlandırılan kireçtaşlarından (Bey Dağları formasyonu) fay hatları boyunca soğuk ve sıcak sular vasıtasıyla yüzeye çıkarak türemişlerdir. Bey Dağları'nın doğusunu sınırlayan ve Antalya Körfezi morfolojik yapısının şekillenmesinde etken olan bu fayın yaklaşık uzunluğu 400 km'ye yaklaşmaktadır. Kuzey-güney doğrultulu bu fay zonu, Üst Pliyosen döneminden itibaren hem Antalya Körfezi'ni hem de fay zonu boyunca değişik noktalardan çıkan bol karbonatlı sıcak ve soğuk kaynaklar, ikincil olarak tekrar $CaCO_3$ çökelimine neden olmuş ve 650 km^2 lik Antalya İli'ni de kapsayan büyük bir alanda Antalya

Travertenlerinin (tufa) oluşumunu sağlamıştır. Travertenlerin dokusal yapısı, çökelme koşulları, yoğunluk, sıcaklık, derinlik, erime, yeniden çökelme gibi etkenlere bağlı olarak sık sık değişkenlikler göstermektedir. Bu etkenlere göre, travertenlerde genel olarak birbirinden farklı 3 traverten dokusu oluşmuştur. Bunlar, "sık dokulu veya masif", "süngerimsi veya boşluklu dokulu" ve "bitki boşluklu traverten dokuları"dır. Karasal çok sığ su ortamında çökelen travertenler, çökelirlerken yüzeyde daha fazla bulunan oksijenle reaksiyona girerek (oksidasyon) oksitlenirler, oksitlenme de kayanın rengini kahverengiye dönüştürür. Traverten çökel istifleri içinde yer yer çamur, kum ve eski bitkisel toprak ara seviyeleri de görülmektedir. Üst üste 3 plâto hâlinde çökelen travertenler, yaklaşık 300 m kalınlığa ulaşmaktadır. Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı travertenlerin oluşumunda büyük rol oynayan faylar; Bölüm 8'de, Şekil 8.33'de yer almaktadır (Yıldırım, 2010). Akdeniz sahil şeridinde traverten taraçaları da 50 m yüksekliğe kadar ulaşabilen dik **falezleri oluşturmaktadır. Akdeniz sahil çizgisinden itibaren de 2,5 km denize doğru yayılım gösteren Antalya Travertenlerinin (tufa), deniz dibindeki kalınlıkları 50 m ilâ 150 m arasında değişmektedir. Falezleri meydana getiren travertenlerin özellikleri, "Örnek Uygulama 6.7.2"de verilmektedir.

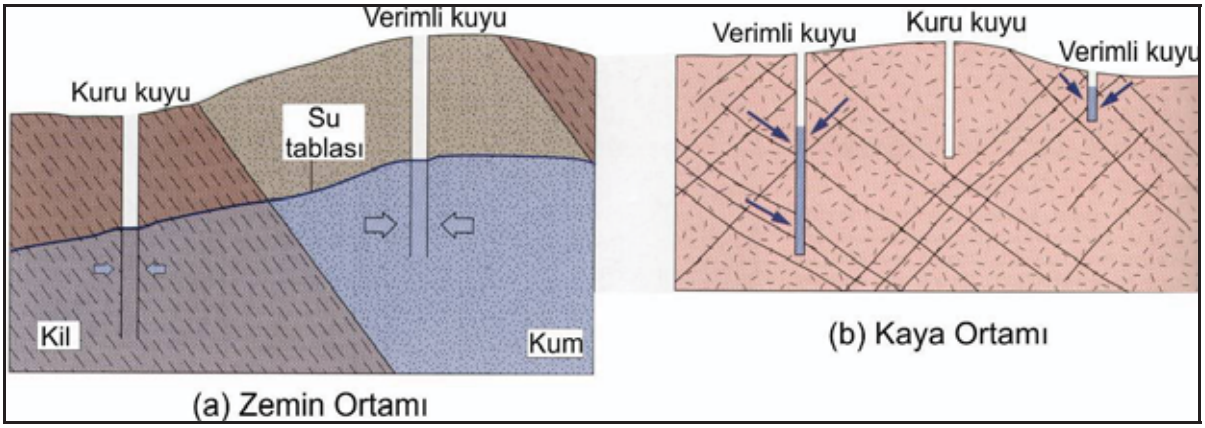
****Falez:** Yüksek kıyılarda dalga aşındırması ile oluşan ve aşınma sürdükçe karanın içeri doğru gerileyen, yar ya da düz duvar gibi yükselen kayalıklardır. Kısaca falez; denize inen yüksek ve dar kıyılardır**]**.

Traverten veya tufaların oluşumu yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği üzere; eski kalkerli *(calcareous)* kayaçların atmosferden yağan yağışların etkisiyle suların (H_2O) yer altına sızarak, derinlerde ısınıp basınç kazanması ve içinde erimiş hâlde bulunan karbondioksit (CO_2) ile birleşip $H_2O+CO_2 \rightarrow H_2CO_3$ karbonik asidi oluşturması ile başlar. Karbonik asit (H_2CO_3) ise kayaçlardaki kalsiyumkarbonat ile ($CaCO_3$) tepkimeye girip birleşerek kalsiyumbikarbonatı $Ca(HCO_3)_2$ oluşturur. Diğer bir ifâde ile suyun eritici özelliğinin artmasıyla, sular kalkerlerden geçerken, onlardan bol oranda kalsiyumkarbonatı yeraltı sularının etkisiyle çözerek karstlaşmayı oluştururlarken, kalsiyum bikarbonatça da çok zenginleştirirler. Sonuçta, kalsiyum bikarbonatça zengin sular zayıf zonlar boyunca veya kaynaklardan taşarak yüzeye ulaştıklarında basınç azalması nedeniyle karbondioksit sudan ayrılarak atmosfere karışır. Su normal akışını karasal ortamlarda sürdürürken kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) çökelerek travertenler oluşur: $Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3$ (traverten veya tufa)$+H_2O+CO_2$.

6.5. Yeraltı Sularından Yararlanılması

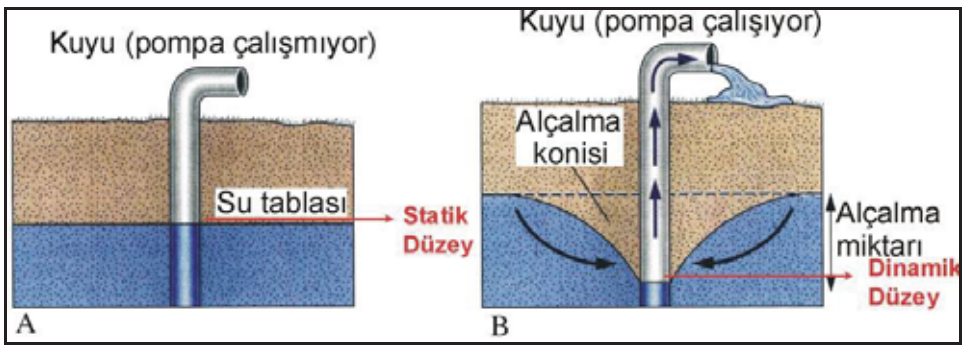
Yeraltı suları; dünya üzerinde yer alan önemli tatlı su kaynaklarından (buzul, kar, nehir gibi) biridir ve bu açıdan önemli düzeyde bir kullanım alanı bulunmaktadır. Eğer yeraltı suyu bir kaynaktan doğrudan ve yeterli miktarda

yeryüzüne çıkmıyorsa, kuyu açılır ve yeraltı suyu yukarı pompalanarak elde edilir. Bu durumda, yeraltı suyundan en verimli bir biçimde faydalanabilmek için açılacak kuyuların doğru yerde ve derinlikte seçilmesi gerekir. Meselâ, zeminlerde yeraltı su düzeyinin altında bulunan ve gözenekliliğe sahip birimlerden kil vb. birimlerin taneleri arasındaki mesafe çok dardır. Akiklüd adı verilen bu tür bölgeler, suya doygun olsalar dahi, taneler arası mesafenin suyun kısa sürede geçmesini engelleyici ölçüde çok dar olması ve su moleküllerinin çekim gücü etkisi nedeniyle bu birimden fazla bir su alınamaz. Böyle durumlarda bu birim içerisinde açılan kuyular kuru veya çok düşük verimli olurlar (Şekil 6.10.a). Öte yandan kumlu birimlerde, tanelerin arasındaki boşluk, mesafe ve buna bağlı olarak suyun bulunabileceği alan çok daha geniştir. Bu nedenle, taneler arasındaki suyun önemli bir bölümü tane çekim kuvvetinden etkilenmez ve yeraltı suyu iri taneler arasındaki boşluklarda serbestçe hareket edebilir. Bu nedenle, iri taneli zeminlerde (çakıl-kum) açılacak olan kuyular çok daha verimlidir (Şekil 6.10'da 'a' zemin ortamı). Kaya ortamlarında ise taneler arasındaki boşluklar daha ince kırıntılılar veya çimento ile doldurulmuş veya ısı ve basınç nedeniyle sıkılaşıp, taşlaşma işlemine mâruz kalmış olduğundan su, genel olarak kayanın bünyesinde yer alan süreksizlikler boyunca bulunur. Bu suyun alınabilmesi için açılmış olan kuyuların kaya içerisinde yer alan su ile dolu ve suyu iletebilen süreksizlikleri (çatlakları) azamî derecede kesmesi gerekir. Süreksizlikleri kesmeyen kuyuda su bulunmazken, hemen yanında yer alan ve süreksizlikleri kesen kuyularda ise su bulunur (Şekil 6.10.b).

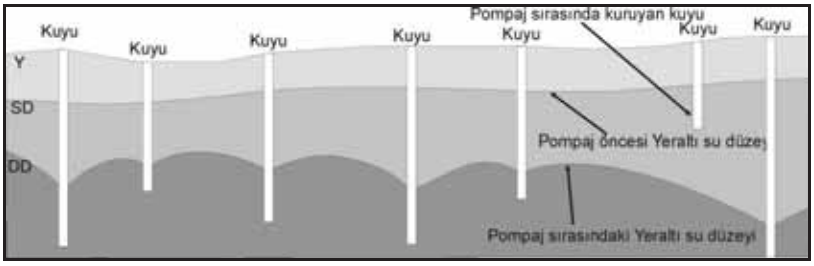


Şekil 6.10. Yer altındaki ortamların jeolojik özelliklerine ve çatlak sistemlerine göre açılan su kuyularının verimliliği (*Mc Geary* vd., 2004).

Herhangi bir yapay beslenmenin etki alanında olmayan bir kuyuda, üretim veya beslenme yapılmadığı bir periyot içerisinde ölçülen doğal su düzeyine **statik su düzeyi** (SL, *static water level*) denir. Bu düzey, zemin yüzeyinden itibaren ölçülen su derinliği demektir (Şekil 6.11). Fışkıran artezyenlerin statik düzeyleri ise zemin yüzeyinin üstünde olup bu düzey kuyu ağzına takılan bir manometre ile ölçülmektedir. Pompaj işlemi sırasında yeraltı su düzeyi, pompanın hemen çevresindeki bir zon boyunca derinleşir. Bu derinleşme pompanın temas ettiği bölgede en üst düzeydedir ve pompadan uzaklaşıldığında giderek azalır. Çekilen suyun miktarına bağlı olarak değişen bir mesafede, yeraltı suyu statik düzeyine ulaşır. 3 boyutlu ortamda ters bir koniyi andıran geometriye sahip olan yeraltı su düzeyindeki bu alçalışa **alçalma konisi**, yeraltı su düzeyinin pompaj sırasında ulaştığı yeni derinliğine ise **dinamik su düzeyi** (DL, *dynamic water level*) adı verilir. Diğer bir ifâde ile kuyudan sabit bir debi ile su çekilirken ölçümün yapıldığı andaki su düzeyinin kotu, dinamik su düzeyi olarak tariflenebilir. Birbirine yakın kuyulardan çok fazla miktarda ve devamlı olarak su çekilmesi sonucu alçalma konileri birbirleri ile çakışır ve yeraltı su düzeyi bölgesel olarak birbirleri ile çakışan alçalma konilerinin üst yüzeylerini izler. Kuyulardan aşırı su çekimleri sonucu, yeraltı su seviyesi zamanla bölgesel olarak alçalmaya başlar. Yer altına sızan su miktarından daha fazla su çekimi sonucu, akifer yeterince beslenemez ve yeraltı su düzeyi zamanla daha derinlerde yer alır (Şekil 6.12). İnsan eliyle gerçekleştirilen ve aşırı su çekilmesi (pompaj) adı verilen bu işlemin sürmesi hâlinde akifer kurumaya başlar. Zeminlerde, aşırı su çekilmesi sonucunda, taneler arasındaki boşluklarda bulunan suyun giderek azalmaya başlaması ile taneler birbirine yakınlaşır ve böylece zeminde oturmalar meydana gelir (Şekil 6.13).



Şekil 6.11. Bir kuyuda su çekilme işlemi yapıldığında yeraltı suyunda meydana gelen alçalma konisi (*Plummer* ve *McGeary* vd., 1993).



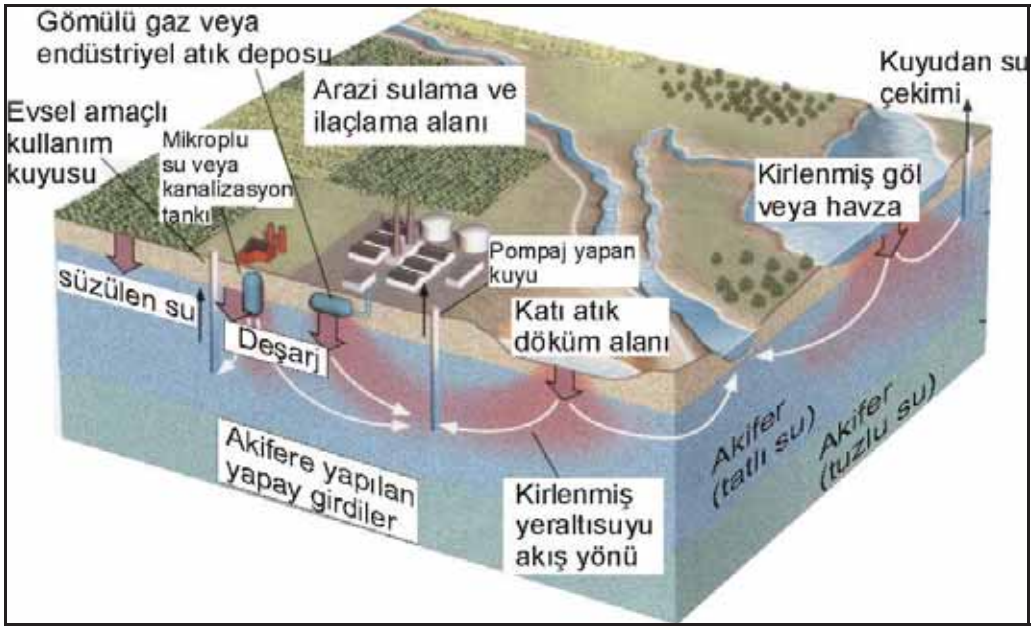
Şekil 6.12. Bir serbest akiferdeki aşırı pompaj sonunda yeraltı su düzeyinde meydana gelen yapay düşüş (Y=Yeryüzü, SD=Statik yeraltı suyu düzeyi, DD=Dinamik yeraltı suyu düzeyi).



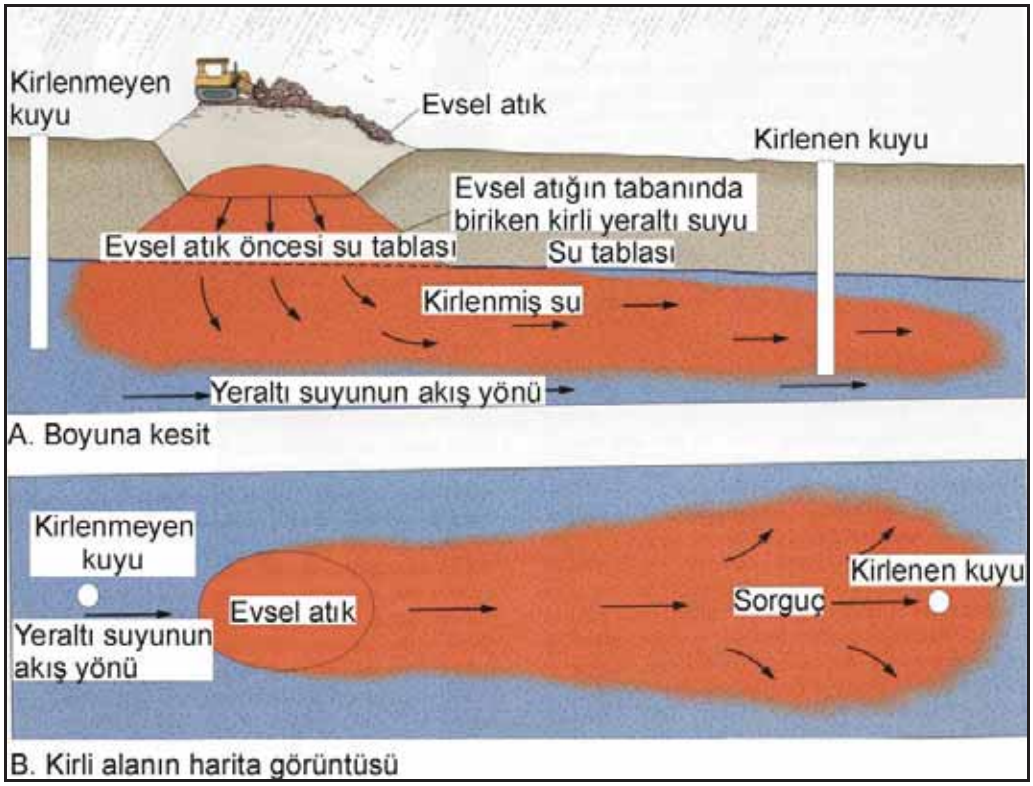
Şekil 6.13. Zeminde oturma. ABD-Kaliforniya'da *San Joaouin* vâdisinde 1925-1977 yılları arasında aşırı pompaj nedeniyle zeminde meydana gelen oturma miktarı yaklaşık 9 m'dir (*Mc Geary* vd., 2004).

6.6. Yeraltı Sularının Kirlenmesi

Günümüzde yararlanılan su kaynaklarının başta gelenlerinden biri olan ve yakın gelecekte bu önemi daha da artacak olan yeraltı sularının, karşı karşıya kalmış olduğu en büyük iki tehlike kirlenme ve aşırı pompajdır. Yeraltı sularının kirlenmesindeki en büyük nedeni, sanayi-tarım atıkları ve evsel atıklar gibi kirleticilerin yeteri kadar önlem alınmadan depolanması oluşturmaktadır. Bu üç temel atığın, bünyelerinde bulunan kirli-kimyasal sular yer altına sızarak, yeraltı suları ile karışır ve bu su kaynaklarının kirlenmesine neden olur (Şekil 6.14, 6.15).



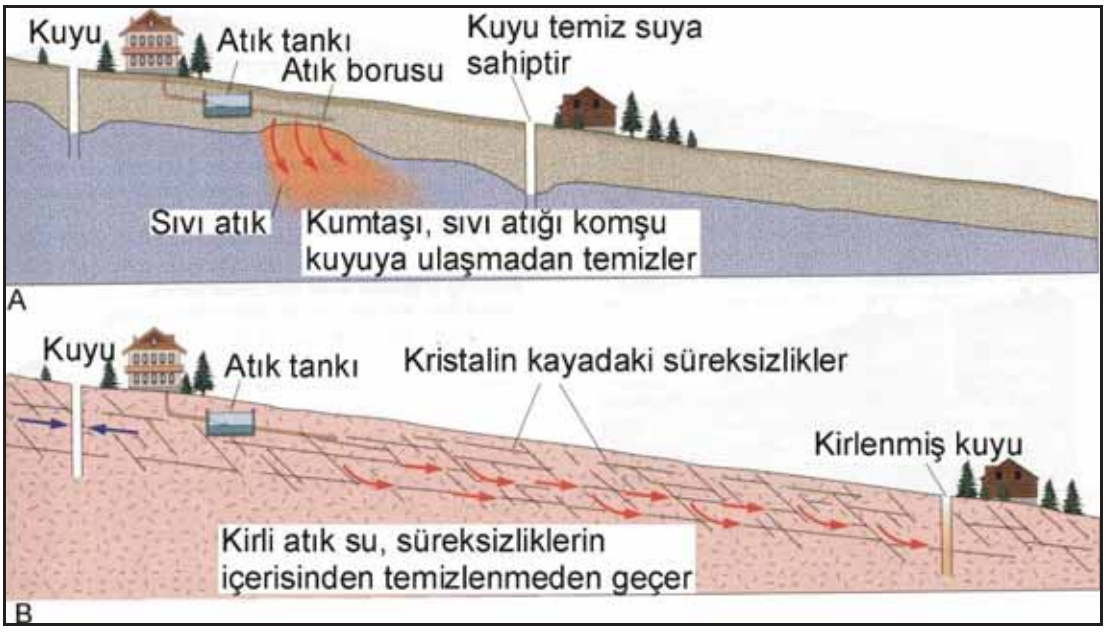
Şekil 6.14. Yeraltı sularını kirleten kaynaklar (*Press* vd., 2004).



Şekil 6.15. Vahşi çöp sahasında, yüzeyden yer altına sularla sızan kirleticilerin hareket yönleri boyunca yayılması (McGeary vd., 2004).

Yeraltı sularını kirleten kaynaklar çoğunlukla sıvı olduklarından, bu kirleticiler yer altında, yeraltı suları gibi hareket ederler. Bu durumda, kirlenmiş bir yeraltı suyunun akış yönündeki bir kuyu, bu atıklardan daha kısa zamanda

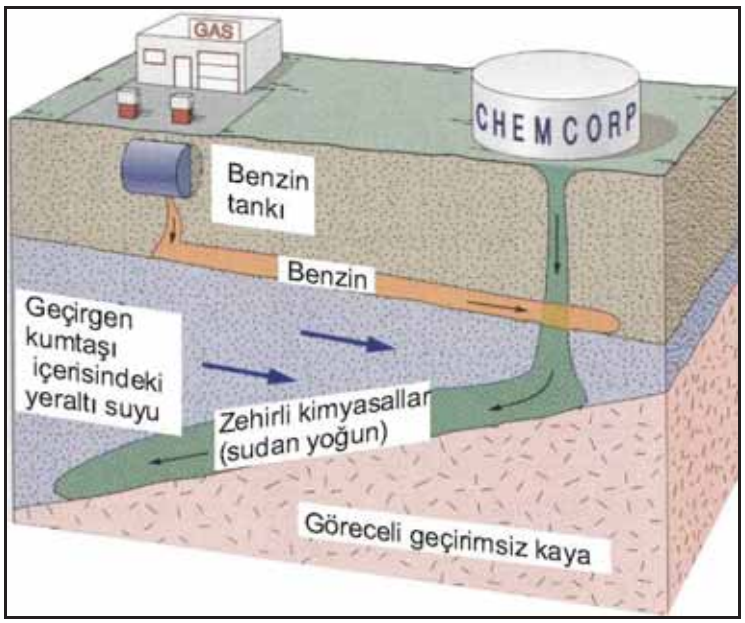
etkilenerek kirlenirken, yeraltı suyunun akış yönüne göre söz konusu kirletici kaynağın gerisinde kalan kuyu, bu kirlilikten geçici bir süre etkilenmez, ancak zamanla bu kuyu da diğer kuyu gibi kirlenir. Kuyuların kum-kumtaşı gibi kırıntılı birimlerden oluşan akiferlerin içerisinde açılması durumunda, evsel kökenli kirleticilerden belirli mesafelerde uzakta olmaları hâlinde, kumtaşının yeraltı suyunu süzerek temizleme özelliğinden dolayı, kısmen kirlenmemesi mümkündür. Yeraltı suyunun kayaların süreksizlikleri içerisinde bulunduğu bir akifer ortamında ise bu tür bir filtrelenme işlemi daha az olabileceğinden, yeraltı suyunun doğal yolla temizlenmesi çok zor olacak ve uzun bir zaman gerektirecektir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Kırıntılı ve çatlaklı birimler içerisindeki yeraltı suyunun kısmen temizlenmesi (*McGeary* vd., 2004).

Kirleticilerin tümü yeraltı suyuna doğrudan karışmayabilir. Kirleticilerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan fazla veya az olabildiği durumlarda, yoğunluğu suyun yoğunluğundan az olan, meselâ petrol ürünleri, su tablası üzerinde hareket eder ve hareket yönleri de su tablasının eğimi tarafından kontrol edilir. Yoğunluğu sudan fazla olan bazı kimyasallar ise doğal olarak suyun altına batacak ve yeraltı suyunun tabanına birikeceklerdir. Bu durumda söz konusu kirleticilerin akış yönünü, akiferin de tabanının oluşturan geçirimsiz kayanın üst yüzeyinin eğimi belirleyecektir (Şekil 6.17). Kirleticilerin bir bölümünün yer altındaki hareket yönü, yeraltı suyunun hareket yönünden

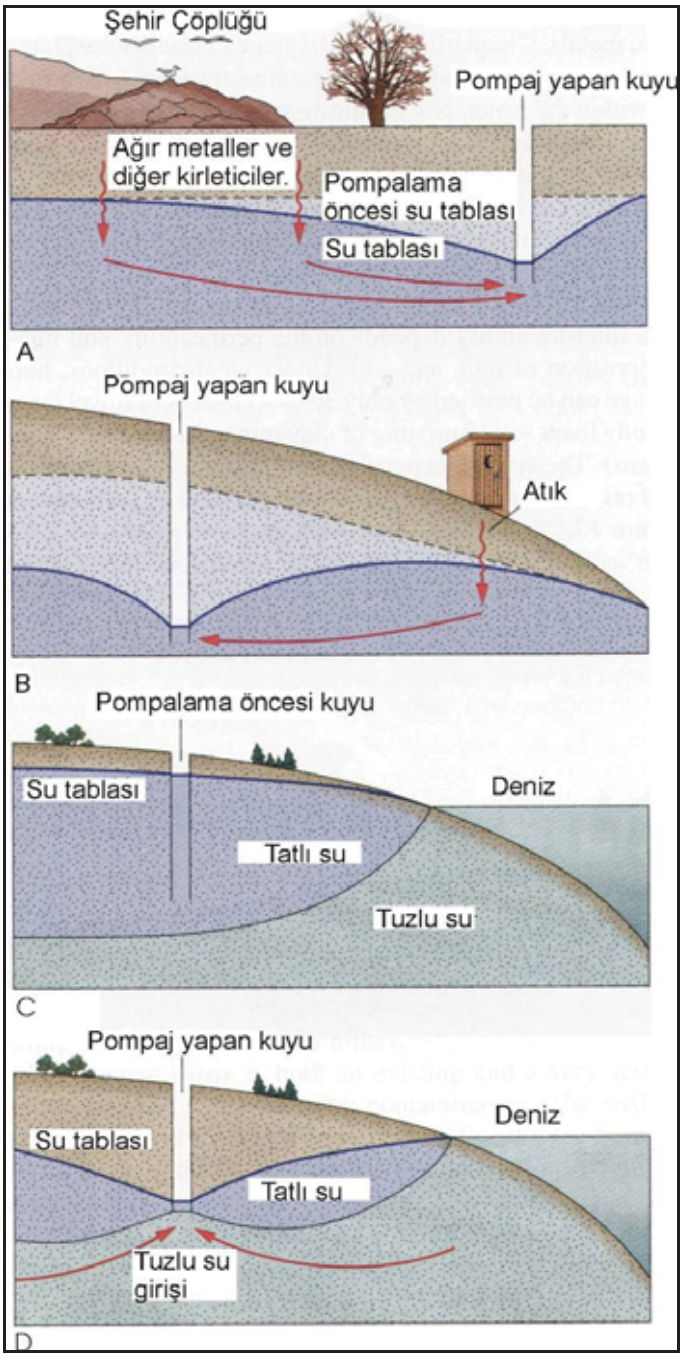
bağımsız olacağından dolayı, bu tür kirleticilerin olumsuz etkilerinden kaçınmak için yeraltı suyunun akış yönünün bilinmesi bir çözüm oluşturmaz. Bunun yerine akiferin üst yüzey ve tabanının yüzey şekillerinin bilinmesi gerekir. Ancak burada elbette en kolay ve masrafsız olan çözüm, söz konusu kirletici kaynakların iyi bir şekilde geçirimsizlik sağlanarak izole edilmesi, ve yeraltı suyuna hiç karışmamasını sağlamaktır.



Şekil 6.17. Kirleticilerin yoğunluklarına göre yeraltı suları ile olan ilişkileri (*McGeary* vd., 2004).

Aşırı pompaj da kuyuların kısa zamanda kirlenmesindeki bir başka nedendir. Aşırı pompaj yapılmadığı durumlarda süzülme ile kısmen temiz su sağlanacak olan kuyu, aşırı pompaj sonucunda, kirlenme daha çabuk ve daha geniş bir alana yayılacaktır (Şekil 6.18.A). Bunun dışında, aşırı pompaj yapılan kuyu, yeraltı suyunun akış yönünü lokal olarak değiştirdiğinden dolayı, akışın ters yönünde kalmasına rağmen yakın kirleticilerden etkilenecektir (Şekil 6.18.B). Kıyı alanlarında ise yer altında tatlı ve tuzlu sular yan yana gelirler. Tuzdan kaynaklanan yoğunluk farkı nedeniyle altta yer alan tuzlu su ve üstte yer alan tatlı su birbirine dokanak yaptıkları yakın sınırlar haricinde karışmazlar. Tuzlu su, karaya doğru bir eğri (tuzlu su kaması) oluşturur (Şekil 6.18.C). Kıyı alanlarında bu eğrinin üzerinde kalan kuyulardan tatlı su alınabilir. Ancak aşırı pompaj sonucu, yeraltı suyu tablasında görülen alçalma konisi tatlı su-tuzlu su sınırında, ters yönde gelişir, tatlı su kaması incelir,

incelen kesimlere tuzlu su kaması kara yönünde ilerler ve tuzlu su kuyuya girerek tatlı su ile karışıp, suyu acılaştırır (Şekil 6.18.D).



Şekil 6.18. Yeraltı suyu kirlenmeleri (A, B) ve tatlı su-tuzlu su (C, D) ilişkisi.
(A, B): Kirletici kaynakların yakınında yer alan kuyularda, bu kirleticilerden etkilenen yeraltı suyunun pompajı nedeniyle yeraltı suyunda meydana gelen kirlenmeler.
(C, D): Yeraltı suları, kıyılarda daha yoğun olan tuzlu suyun hemen üstünde yer alır. Kıyılardaki yapılaşmalarda, kuyulardaki aşırı pompaj sonucu tatlı su zonu incelir, tuzlu su kaması karaya doğru ilerler ve kuyuya deniz suyu girişi olur.

Şekil 6.18.A'da da görüldüğü üzere bilhassa büyük şehirlerde büyük çöp tepelerini oluşturan ve her türlü katı atığın herhangi bir önlem alınmadan, herhangi bir yere gelişigüzel döküldüğü yerlere **vahşi çöp sahaları** adı verilmektedir. Üretim ve tüketim sonucunda arta kalan ve işe yaramayan çevre ve insan sağlığı açısından uzaklaştırılması gereken, katı çöp, cüruf gibi her türlü atık kalıntı malzemeye **katı atık** *(solid waste)* denmektedir. Katı atık malzemeler; evsel atık, tıbbî atık, tehlikeli atık ve inşaat atığı ve molozlardan oluşmaktadır. Bu atıklar çevre ve insan sağlığı açısından zararları yanında yerüstü ve yeraltı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Katı atıklar, 1995 yılına kadar Türkiye'nin tamamında ve başta İstanbul olmak üzere kontrolsuz şekilde ve düzensiz olarak herhangi bir önlem alınmadan vahşi çöp sahalarına atılmış, evsel atıkların oluşturduğu sulara oranla, 40 kat daha fazla kirlilik içeren vahşi çöp sahalarından sızan çöp sızıntı suları, direkt olarak yüzey ve yeraltı sularına karışmış ve aşırı kirliliğe neden olmuştur. Ayrıca küresel ısınmaya CO_2'den 21 defa daha zararlı olan ve çöpte oluşan metan gazı, vahşi çöp sahalarından çevreye sızmakta ve zaman zaman çöp sahalarında patlama, yanma veya heyelâna neden olmakta idi (Örnek Uygulama 6.7.3).

Türkiye'de yapımı, ilk defa İstanbul'da gerçekleştirilen ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin bir kuruluşu olan İSTAÇ A.Ş. (İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş.) tarafından Avrupa ve Ortadoğu'nun en büyük, dünyanın ilk 10 sırasında yer alan bir proje hazırlanmıştır. Bu proje kapsamında, katı atıkların çevre ve insana zarar vermemesi amacıyla, Kemerburgaz (Odayeri) ve Şile (Kömürcüoda) **düzenli katı atık depolama sahaları (deponi alanları)** oluşturulmuştur. Bu katı atık depolama sahalarının 1995 sonlarında yapımlarının tamamlanmasıyla faaliyete geçerek vahşi çöp depolama alanlarına katı atık dökümü yasaklanmış, Katı Atık Yönetimi Master Plânı uyarınca, bu tarihten itibaren İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin **katı atıkları**, kıtalar arası atık nakliyesi de sona erdirilerek, Asya Yakasındaki katı atıklar Şile'de (Kömürcüoda); Avrupa Yakasındakiler ise Kemerburgaz (Odayeri) Tesisleri'nde bertaraf edilmiş ve edilmektedir (Yıldırım, 1997). Ayrıca yine 1995 yılından itibaren İstanbul'da tüm hastanelerden toplanan **tıbbî atıklar** özel araçlarla taşınarak Odayeri'nde kurulu olan Tıbbî Atık Yakma Tesisi'nde 1.200°C'de yakılmaktadır. Bu dönemde başlatılan çalışmalarla, vahşi çöp

depolama alanları rehabilite edilerek çevre kirliliği yanında yerüstü ve yeraltı sularının kirlenmesinin önüne geçilmiştir.

Bu faaliyetlere, 2001 yılından itibaren de çöpten gübre üretimi (kompost gübre üretimi) sağlanmaya başlanmıştır. Organik maddelerin kontrollü bir biçimde biyolojik bir süreçten geçtikten sonra kolayca ufalanan toprak bir forma dönüşmeleri ile elde edilen toprağımsı gübre özelliği taşıyan maddeler **kompost** olarak tanımlanmaktadır. Kompost maddeler doğal yol ile elde edildikleri ve petrol veya türevleri ile üretilmedikleri için doğa dostu sayılmaktadırlar. Zira kompost, organik materyallerin sıcaklık, oksijen, nem gibi koşulların göreceli olarak kontrol edildiği bir ortamda çürütülmesiyle elde edilmektedirler. Meyva, sebze artıkları, yumurta, çay yaprakları, kesilmiş çimenler, kurumuş yapraklar, dal parçaları, bitkiler, bahçe atıkları vb. kompostun ham maddesini oluşturmaktadır.

Gerek Şile gerekse Kemerburgaz sahalarında yer alan, düzenli katı atık depolama alanlarında, katı atıkların oluşturduğu yüksek kirlilik yüküne sahip, arıtımı zor olan, tipik koyu siyah rengi ve kötü kokulu çöp sızıntı suları ise 2008'de ileri bir teknoloji olan "membran sistemi" kullanılarak inşa edilen "nihaî arıtma tesislerinde" arıtılmış, arıtımın yanı sıra, atık suların geri kazanımı da sağlanmıştır (Yıldız, vd., 2010).

Ayrıca 2009 yılında "İstanbul Katı Atık Sahaları'ndaki 'çöp gazı'nın Elektriğe Dönüştürülmesi Projesi" kapsamında İSTAÇ'ın çalışmaları ile Asya Yakasında, Şile (Kömürcüoda) ve Avrupa Yakasında Kemerburgaz (Odayeri) Mevkii'lerinde yer alan deponi alanlarında 2009 yılında, "Çöp Gazından Elektrik Üretim Tesisleri" hizmete girmiştir. 1995 yılı sonlarından itibaren düzenli olarak çöp depolanan 60 hektarlık Kemerburgaz-Odayeri düzenli katı atık depolama sahası kısmında, yaklaşık 20 MW/saat (yılda 175 milyon kWH-kilovat saat) elektrik üretimi sağlanan tesisten, her bir evin aylık 300 kilovat-saat elektrik tükettiği varsayıldığında, yaklaşık 50.000 konutun bir yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Üretim açısından mukayese olarak diğer bir çevre dostu rüzgâr türbinleri örnek olarak verilebilir. Saatte sadece 1 MW-Megavat [1MW=1.000 kW (kilovat)=1.000.000 W (vat)] elektrik üreten ve kendini 6 yıl gibi bir sürede amorti eden, ortalama iki milyon dolara mâl olan ve bakımı fazla

masraf gerektirmeyen bir adet rüzgâr türbini de tek başına yaklaşık 2.500 evin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır.

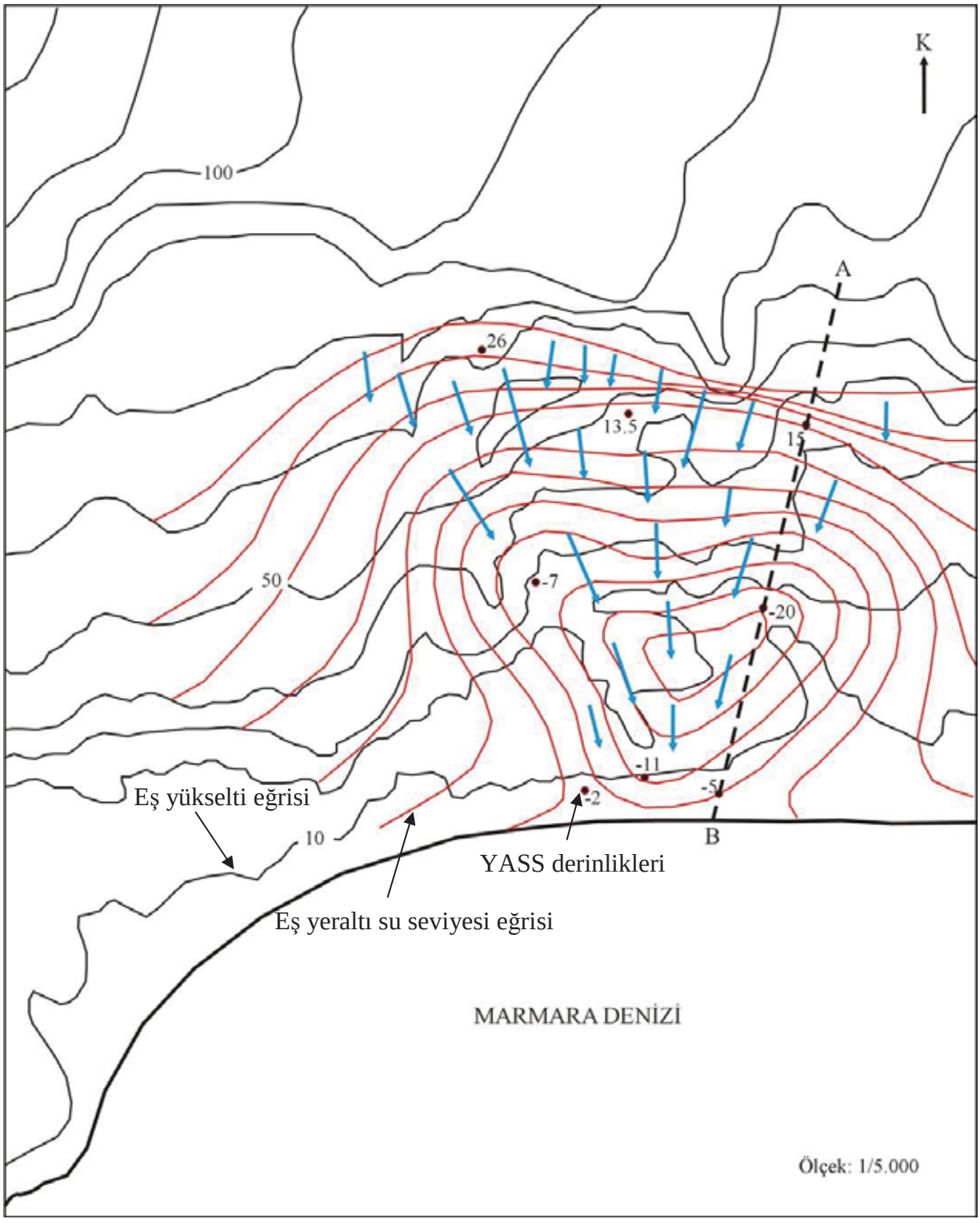
Kemerburgaz-Odayeri düzenli katı atık depolama sahası elektrik üretim tesisine ilâve olarak Şile Kömürcüoda'da yer alan Katı Atık Tesisi Çöp Gazı'ndan Elektrik Üretimi Tesisi ile birlikte elektrik üretimi çok daha artmakta ve iki tesiste toplam üretilen enerji yaklaşık 35 MW (*megawatt*) saate ulaşmaktadır. Bugün artık Türkiye'de çevrenin, insan sağlığı ve yerüstü-yeraltı sularının kirlenmesine engel olma bilinci içinde, büyük şehirlerde düzenli katı atık depolama alanları, diğer adıyla "deponi alanları" yapımlarına hız verilmiştir. Özellikle çevre kirliliği sorunlarının günümüzde gittikçe artması nedeniyle canlıların birbirleriyle ve çevreleriyle olan karşılıklı ilişkilerini birlikte inceleyen biyolojinin kolu olan 'ekoloji'nin yani çevre biliminin ve ekosistemin önemi de giderek artmaktadır. Bilindiği üzere, insan ve diğer canlıların yaşam ve gelişimlerini sürdürebilmeleri için gerekli olan koşulların tümü **ekolojik denge**; canlılar ile bunları saran doğanın birbirlerini tamamlayan ve süreklilik arz eden ilişkilerinin düzenli bir dünya denge ve döngüsünü oluşturduğu sisteme ise **ekolojik sistem** denilmektedir.

Günümüzde doğal yapıyı bozan; hava, gürültü ve toprak kirlilikleri, atıklar (katı, endüstriyel, tıbbî vb.) yanında yerüstü-yeraltı suyu kirlilikleri de 'çevre sorunları'nın başlıcalarını oluşturmaktadır.

Su kirliliğinin önlenebilmesi için:

a) Su havzalarının, yönetiminden sorumlu tek bir birimin oluşturulması ve uygun yönetim esasları belirlenerek uygulama plânları hazırlanıp uygulanması b) Yeraltı suyu kullanımının kontrol altına alınması, c) Su beslenme havzaları içerisinde yer alan ve su kaynaklarını besleyecek orman ve göl alanlarının korunması, d) Yeraltı suyu havzaları içerisinde kalan tarım arazilerinin, yağış suyunun sızmasını sağlamak üzere korunması, e) Kentsel drenajın ve atık suyun, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarını besleyecek şekilde, önce arıtılması ve sonra da sisteme geri döndürülmesinin sağlanması, f) Su havzalarında yer alan yerleşimlerin atık sularının doğrudan su kaynaklarına ulaşmasını engelleyecek önlemlerin alınması gerekmektedir (İBB, 2009).

6.7. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:



6.7.1. Yeraltı Su Tablasının Belirlenmesi: Şekilde verilen yeraltı su tablası haritasında, A-B profili boyunca topoğrafik kesit alınız ve yeraltı su seviyesini (tablası) kesit üzerinde çiziniz.

6.7.2. "**Zemin Etüt Sondajı ve Yorumu"na Örnek Bir Çalışma: Antalya Travertenleri (tufa) ve Mühendislik Özellikleri**:

Dünyada en geniş yayılımı sadece Antalya ve civarında yer alan traverten kayalarının, Antalya sahil şeridinde falezlere yakın traverten düzlüğünde yapılan çalışmalarda, (6.7.2.A) Antalya Travertenlerinin dayanım özellikleri incelenmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren zemin etüt sondajlarından elde edilen karot numunelerinin (*borehole samples*) derinlikle değişen farklı fasiyeslere özgü (tortular ve tortul kayaçların nasıl oluştuğu) özellikleri, sondaj sandıklarında gözlemlenmiştir (6.7.2.B ve 6.7.2.C).

Antalya Muratpaşa Kadınyarı Dere falezinde, plâtform düzlüğünü oluşturan +40 m kotundan itibaren 2010 yılında yaklaşık 40 m derinlikte açılan sondajlarda tamamen traverten kesildiği, yeraltı su seviyesinin de zemin yüzeyinden 35 m derinlikte, yani +5 m kotunda olduğu sondaj loglarından belirlenmiştir. Bol gözenekli kaya yapısında yer yer büyük karstik boşluklara (erime boşlukları) rastlanılmış, bu tür kayaçların parsel bazında yapılacak geoteknik etütlerinde de boşlukların büyüklüklerinin ve diğer mühendislik özelliklerinin de tespit edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Antalya Travertenleri yanal ve düşey yöndeki devamlılıkları dayanım, gerekse litolojik özellikler açısından sık sık değişiklikler göstermektedir. "6.7.2.B" ve yakın görünümü "6.7.2.C"de yer alan karot sandığında görüldüğü üzere, zemin yüzeyinden itibaren kırmızımsı kızıl renkli, bol iri gözenekli; açık bej renkli masif, kırmızımsı veya gri renkli yer yer kızıl renkli killi düzeyler ile ardalanan travertenler (tufalar) görülmektedir. "6.7.2.D, E ve F"de ise poroz, bitki ve ağaç dalı izli, bitki fosilli Antalya Travertenlerinden alınan taşların yakın görünümü yer almaktadır. Travertenler, düşey yöndeki özellikleri her yönde aynı olmadığı gibi yanal yönde de çok sık değişkenlikler gösterdiği belirlenmiştir. Değişik derinliklerden alınan farklı Antalya traverten kayalarının litolojik değişkenliği bir arada topluca "G" de görülmekte ve alınan bu taş numunelerin, YTÜ İnş. Fak. Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuarında yapılan Nokta Yükleme Deneyi (*point load test*) ile bulunan tek eksenli basınç dirençlerinin, farklı fasiyeste çökelmiş kayalarda farklılıklar gösterdiği, Tablo 6.7.2.G-1'de yer almaktadır.

İncelenen yörede, kaya özelliği gösteren kızıl renkli, bol iri gözenekli travertenler içinde, toprağımsı, yer yer birkaç metre kalınlığa ulaşan ve zayıflık düzlemlerini oluşturan kil düzeyleri ardalanmalı olarak yer almaktadır. Bu ve benzeri sebeplerden, falez ve faleze yakın sahil kesimlerinde; mühendislik açısından karstik boşluklar yanında, diğer süreksizlikler ile yüzey sularıyla kolay akıp gidebilen ve boşluklar yaratabilen kil düzeylerini oluşturan zayıflık düzlemlerinin belirlenmesi, eğim yönlerinin bilinmesi, zayıflık zonlarını aşındıran yüzey sularının drene edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Dünyada bilinen en geniş yayılıma sahip (630 km^2) bir alanı kaplayan ve kalınlıkları 250 m ilâ 300 m arasında değişen doğa harikası "Antalya Travertenleri" nin Antalya ve çevresinde yerleşim alanları içinde yer alması, oluşturdukları falezlerin de duraylılıklarının sağlanması, korunması ve mühendislik özelliklerinin bilinmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



6.7.2.A) Antalya Travertenlerinde oluşan falezlerin genel görünümü, Konya-Altı/Antalya (19.11.2010).



6.7.2.B) Antalya Traverten kayaları karotları. Antalya Travertenlerinin falez üstü düzlüğünden itibaren 40,50 m derinliğe (deniz seviyesi) ulaşan sondajdan elde edilen karotlar *(cores)*.



6.7.2.C) Antalya Traverten kayaları karotları. 6.7.2.B'de yer alan sondaj sandıklarının yakından görünüşü. Travertenlere ait ve zemin yüzünden ilk 22,50 m derinliğe kadar alınan karotlar (01.02.2011).



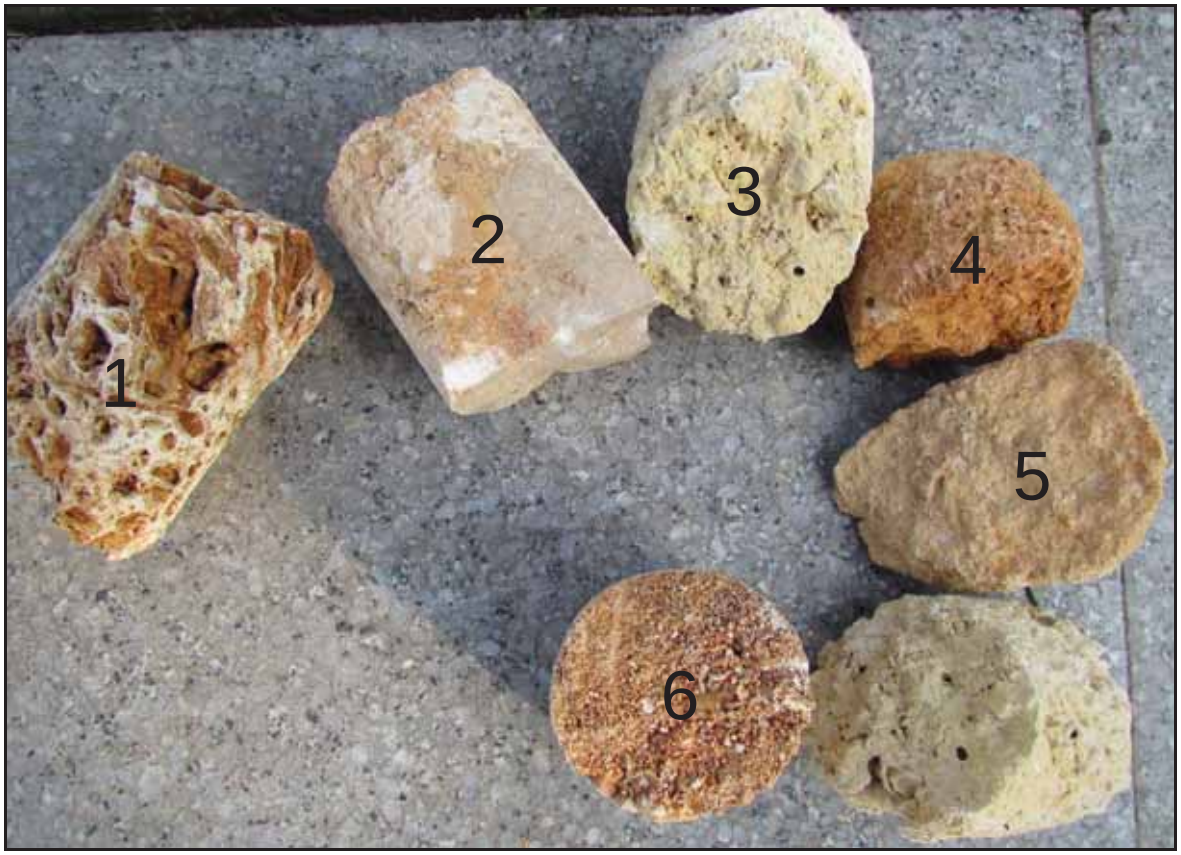
6.7.2.D) AntalyaTravertenlerinin **(bitki boşluklu travertenler)** yakından görünüşü. Sondajdan alınmış bu tip karotlar, kamış tipi traverten olarak da adlandırılmaktadır. İçlerinde; bitki, kamış ve ağaç dallarından arta kalan kalıntı boşluk izleri görülmektedir. Boşluklar bir taraftan eriyerek büyürken, bazı boşlukların da tekrar $CaCO_3$'ün çökelip doldurulmasıyla, fosilleşmiş ince ağaç veya bitki dalları kalıpları ortaya çıkmaktadır (01.02.2011).



6.7.2.E) Antalya Traverteni (bitki boşluklu, kamış tipi traverten). Traverten oluşumları sırasında etrafını sardıkları kapantı hâlindeki bitkilerin çürüyerek geriye bıraktıkları boşluklar ve bitki-kamış kalıp kalıntı izleri ile $CaCO_3$ 'den oluşan kayada görülen erime boşlukları (27.04.2011).



6.7.2.F) Kahverengi, bitki kırıntılı, erime boşluklu Antalya Traverten kayası: Zemin yüzeyinden 40 m derinlikte SK-4 No'lu sondajdan elde edilen bu karotun, nokta yükleme deneyi ile bulunan tek eksenli basınç direnci: 240 kg/cm^2 dir (27.04.2011).



6.7.2.G) Traverten kayaları çeşitleri. Zemin yüzeyinden 40 m'ye ulaşan derinlikte yapılan sondajlarda farklı çökelme ortamlarında (fasiyes, *facies*) gelişmiş, merceksi ve sık sık litolojik değişkenlik göstererek ardalanan ve bileşim, doku ve dayanımları farklı traverten kayaları örnekleri (örn. 1= bitki boşluklu; 2= masif, 3= süngerimsi taraverten vd.) (27.04.2011).

Tablo 6.7.2.G-1) Antalya Travertenlerinin mühendislik özellikleri: Şekil 6.7.2.G'de görülen ve numaralandırılan farklı derinlik ve *fasiyeslerde çökelmiş Antalya Kadınyarı'nda yer alan traverten kayalarının dayanım özellikleri. Deney numuneleri yörede yapılan 8 adet sondajdan alınmıştır.

Şekil 6.7.2.G'de Yer alan Numaralandırılmış ve Farklı Kaya Gruplarının Temsilci Numune No'ları	Açıklama	Sondaj No	Zemin yüzeyinden itibaren (+44.00m) Karotların (Numunelerin) Alındıkları Derinlikler (m)	Nokta Yükleme Deneyi ile Bulunan Tek Eksenli Basınç Dirençleri [kg/cm^2]
1	Traverten (tufa): Koyu kızıl kahverengi, ufak ve iri gözenekli, bitki boşluklu, erime boşlukları yer yer ikincil olarak $CaCO_3$ çökelimi ile doldurulmuş.	SK1 SK1 SK4 SK4 SK5 SK6 SK7 SK8	15,00 0,00-18,00 4,50-6,00 40,00 1,50-3,00 0,00-7,00 0,00-10,00 18,00	170 160 270 240 320 310 95 100
2	Traverten (tufa): Açık gri, bej renkli, sert, dayanımlı, masif.	SK1 SK4 SK5 SK6 SK6 SK7 SK8 SK8	20,00 13,50 9,00-10,00 7,00-13,00 (Süreksizliğe par.) 7,00-13,00 (Süreksizliğe dik) 10,00-21,00 9,00 (Süreksizliğe par.) 9,00 (Süreksizliğe dik)	210 720 390 330 600 170 290 530
3	Traverten (tufa): Açık kirli sarımsı, krem renkli, gözenekli, bitki dokulu, killi.	SK1 SK2 SK2 SK3 SK7 SK8	18,00-36,00 24,00 40,00 40,00 30,00 18,00-40,00	30 15 30 50 10 30
4	Traverten (tufa): Koyu kızıl renkli, az gözenekli, bol çatlaklı.	SK3 SK5	30,00 37,50	130 280
5	Traverten (tufa): Kirli açık kahverengimsi renkli, ince taneli az gözenekli.	SK3 SK4	22,00 20,00	95 30
6	Kumtaşı: Kızılımsı kahve rengi, karbonat hamurlu, bitki kırıntılı, çakıllı, gevşek tutturulmuş.	SK4 SK6	27,00 16,00-40,00	105 55

***[Fasiyes:** Bir sedimentin renk, tabakalaşma, fosil, hangi kayaçlardan türediği vb. her türlü karakterini tespit eden özelliklerinin tümü veya bir sedimentin litolojik ve biyolojik karakterlerinin toplamı, genel görünüşü**]**.

6.7.3. ÇEVRE KİRLENMESİNE BİR ÖRNEK:

İstanbul Kemerburgaz " Hasdal Vahşi Çöp Döküm Sahası ve Islahı"

İstanbul, Hasdal vahşi çöp döküm sahasının oluşturduğu çevre kirliliği, heyelân, heyelânı önleme, rehabilitasyon çalışmaları ve rehabilite edilmiş bu çöp sahasından elektrik üretimi gibi çalışmalar; aşağıda Şekil 6.7.3.A-G arası şekillerde yer alan fotoğraflarda, tarih sırasıyla verilmektedir.



6.7.3.A) Hasdal vahşi çöplüğünde kontrolsuz dökülen çöplerin oluşturduğu çöp dağı ve yamacı. Tepe düzlüğünü oluşturan çöpler etrafa ve vâdi tabanına doğru dağılarak geniş bir alanda bulaşıcı hastalık, zehirli gaz (metan) sızıntıları, yangınlar, hava, çevre ve görüntü kirliliğine yol açmış, insanlara, bitkilere, tüm çevreye zarar vermiş ve zaman zaman çöplerin oluşturduğu yamaçta çöpün kendi içinde büyük heyelânlar oluşmuştur. Vâdi tabanından geçen Kâğıthane Deresi membasına karışan ve zehirli atıkları içeren çöp suları, 08.08.1995 tarihi itibarıyla, yaklaşık 16 km'lik Kâğıthane Deresi yatağı boyunca akıp, Haliç'e ulaşarak güzergâh boyunca hem yerüstü ve yeraltı sularını hem de Haliç'i kirletmiştir (08.08.1995).



6.7.3.B) Hasdal vahşi çöplüğünde 22 Mayıs 1996 sabahı, çöpten oluşan dağ yamacında, çöpün kendi içinde meydana gelen heyelân. Çöp yığınları vâdinin karşı tarafındaki yamaca kadar akıp yaslanarak yığılmış durumda (23.05.1996).



6.7.3.C) Çöpte oluşan heyelân nedeniyle tüm vâdi tabanına yığılan çöpler ile kapanan Kemerburgaz - Cendere yolunu açma çalışmaları (23.05.1996).



6.7.3.D) Kâğıthane Deresi membası. Derenin Hasdal vahşi çöplüğüne çok yakın, ama henüz vahşi çöplük sahasına ulaşmamış kesimi (08.08.1995).



6.7.3.E) Kâğıthane Deresinin Hasdal vahşi çöplüğünden geçerken çöplük tabanından sızan, kötü kokan, zehirli çöp sularıyla karışarak zift rengini alması. Bu kirli ve zehirli sular 16 km güneyinde yer alan Haliç'e akarak kirletmekte (08.08.1995).



6.7.3.F) Hasdal vahşi çöp sahasının iyileştirilmesi. Şekil 6.7.3.A, B ve C'de görülen Hasdal vahşi çöplüğünde, İstanbul Büyükşehir Belediyesi-İSTAÇ tarafından yapılan rehabilite çalışmaları. Dere yatağının düzenlenmesi, yamacın stabil duruma getirilmesi ve tüm çöp yığınlarının geçirimsiz kil tabakayla örtülmesi (21.07.1998).



6.7.3.G) Hasdal vahşi çöplüğünden elektrik enerjisi üretimi. Rehabilite edilen Hasdal vahşi çöplüğünün üstü kil ile kapatıldıktan sonra vahşi çöp sahası yığını içine değişik noktalarında açılan gaz bacalarıyla, çöpte organizmaların oluşturduğu gazlar (büyük bir kısmı metan, CH_4) kontrollü olarak çekilmektedir. Böylelikle atmosfere salınmayan zararlı bu gazlar, Hasdal vahşi çöp sahasında yer alan 4 MW kurulu güce sahip tesiste yakılarak elektrik ve ısı enerjisi üretilmektedir. Sadece bu çöp sahasından, yılda üretilen 8 milyon kWh (yaklaşık saatte 1 MW) elektrik enerjisi, İBB bünyesindeki düzenli katı atık depolama alanları ve tesislerinin tüm elektrik ihtiyacını karşılamaktadır.

6. Bölümün Özeti

Yeraltı suları, yerin altında akifer adı verilen, gözenekliliği ve geçirgenliği olan kayaçlarda bulunurlar. Yer altındaki boşluk ve çatlakların su ile tamamen dolmuş olduğu geçirimli tabakalara doymuş bölge adı verilir. Akiferi oluşturan doymuş bölgede biriken suyun en üst kısmı yeraltı su seviyesi olup bu seviyeye yeraltı su tablası adı verilir. Yeraltı su seviyesi genelde zemin yüzeyine paraleldir. Bu nedenle, yeraltı su düzeyi topoğrafyaya bağlı olarak yeryüzü şekline uyumlu bir hat oluşturur. Zemin yüzünün eğimli olması durumunda yeraltı su düzeyindeki kot farklılığı yeraltı sularının bulundukları alanda hareket etmelerine neden olur. Yeraltı suları, gerek zeminlerde gerekse kayalarda taneler arası boşluklarda olabileceği gibi kayalarda ayrıca birbirleriyle ilintili süreksizliklerin içerisinde de bulunur. Yeraltı suyunun doğal durumundaki seviyesine statik su düzeyi adı verilir. Yeraltı suyunun pompaj ile yüzeye çıkarılması sırasında yeraltı su düzeyinde, pompanın çevresinde bir düşüm konisi oluşur. Yeraltı su düzeyinin kazandığı bu yeni seviyeye dinamik su düzeyi adı verilir. Yeraltı sularını tehdit eden iki önemli yapay tehlike bulunmaktadır. Bunlardan ilki, aşırı pompaj olarak da adlandırılan ve yeraltı suyunun beslenmesinden daha büyük miktarlarda yer altından pompaj ile çekilmesidir. Bu durumda yeraltı su düzeyi alçalır ve/veya akifer kuruyabilir.

Özgül verim hidrojeolojide, doymuş hâle gelen bölgeden gravite ile alınabilen su hacminin tüm hacme oranının yüzde ifâdesi olarak tanımlanmaktadır. Kısaca, akiferi oluşturan doymuş bölge içinden pompaj ya da drenajla alınabilen suya özgül verim denir ve özgül verim, efektif porozite ile eş anlamdadır. Doymuş bölgede tutulan su hacminin, kütlenin tüm hacmine oranının % cinsinden ifâdesine ise özgül tutulma denir ve bu su pompaj ya da drenajla alınamaz.

Her taraftan su alabilen bir arazi içinde bulunan yeraltı sularını taşıyan tabakalara serbest akifer denir. Serbest akiferlerin üzerinde sızmayı engelleyecek geçirimsiz bir tabaka bulunmaz. Serbest akiferlerin içinde yeraltı su seviyesi ile zemin yüzeyini oluşturan ve doymamış bölge olarak adlandırılan zemin kesimi içinde geçirimsiz kil mercekleri üzerinde yer alan kumlar içinde biriken sular tarafından oluşturulan düşük verimliliğe sahip doygun zonlara tünek akifer; alt ve üst kesimleri geçirimsiz birimlerle sınırlandırılmış akiferdeki

yeraltı suyu basıncı, atmosferik basınçtan daha büyük olan yeraltı sularını taşıyan tabakalara ise basınçlı akifer denir. Basınçlı akiferler, geçirimsiz iki ya da daha fazla tabaka arasında bulunduğundan serbest su düzeyleri yoktur. Bu tür akiferlerde yapılan sondajlarda su, sondaj içerisinde kendiliğinden yükselir. Suyun yükseldiği bu düzeye piyezometrik seviye ya da basınçlı su düzeyi adı verilir. Bünyelerinde su tutabilen, gözenekli, ancak bu suyu yok denecek kadar az ya da kısaca pratik olarak suyu iletemeyen tabakalara akiklüd adı verilir. Akiklüd'e kil, siltli kil çamurtaşları veya şeyller örnek olarak verilebilir. Bünyelerinde su taşıyan, suyu yavaş ileten, gözenekli, ancak yarı geçirimli kayaçlara akitard denir ve akitardlara, siltli kum ve killi ince kumlar örnek olarak verilebilir.

Gerek kayalarda, gerekse zeminlerde boşluk hacminin tüm hacme oranı gözeneklilik (porozite), kaya veya zemin ortamının su geçirme özelliği ise geçirgenlik ya da hidrolik iletkenlik olarak tanımlanmaktadır. Hidrolik iletkenliği belirten parametreye hidrolik iletkenlik katsayısı veya permeabilite katsayısı (k); hidrolik geçirgenliği ölçmekte kullanılan düzeneğe de permeametre düzeneği denir. Bu bilgilerin ışığı altında, bir akiferin suyu iletme yeteneğinin geçirgenlik (hidrolik iletkenlik) ile kontrol edileceği açıktır. Kum ve çakıllar arası boşluklar, silt ve kil zeminlere göre çok daha büyük olduğundan yüksek hidrolik iletkenliğe sahiptirler. Bu bakımdan çakıl ve kumlar iyi bir akifer oluştururlarken, boşlukları son derece küçük çaplı olan killer ise geçirimsiz olmaları, bir başka ifâde ile su tutan yapıda (akitard) olmaları nedeniyle akifer oluşturmazlar. Çok yüksek gözenekliliğe sahip kil taneleri çok küçük ve aralarındaki mesafe de çok dar olduğundan düşük hidrolik iletkenliğe sahiptirler.

Jips ve kaya tuzu gibi sülfatlı ya da karbonatlı kayalarda, yerüstü ve yeraltı suları nedeniyle zemin yüzeyinde ve yer altında görülen önceden gelişmiş ve gelişmekte olan erime boşluklu arazi yapısı ya da morfolojik şekil ve biçimler karst olarak tanımlanır. Erime özelliğine sahip kireçtaşı gibi karbonatlı veya jips gibi sülfatlı kayalar, asidik özellikli suların etkisi ile erime sürecine girerek boşluklu yapıyı (karstlaşma) oluştururlar. Eriyebilen karbonatlı kayalar içerisinde bu şekilde oluşmuş değişik boyutlardaki boşluklara genel olarak karstik boşluk adı verilir. Kireçtaşı, dolomit(it), mermer gibi kayaların kimyasal yolla çözünmeleri ile jeomorfolojik yapılardan olan lapya, dolin, obruk, uvala ve polyeler meydana gelir. Bunlar; küçükten büyüğe doğru lapya, dolin,

obruk, uvala ve polye olarak adlandırılır ve bunlar yer üstünde görülen erime şekillerini oluştururlar. Mağaralar da yer altında oluşan karstik boşluklar olup içlerinde sarkıt ve dikitler gelişebilmektedir. Karstik boşlukların, çoğunlukla süreksizlikler olarak adlandırılan çatlak, fay, tabaka yüzlerinde daha çabuk geliştiği görülmektedir. Karstlaşma sonucu, yüzeyde ve yer altında değişik büyüklüklerde boşluklar oluşur. Yeraltı suları, bu tür erime özelliği gösteren karbonat kayaları içinde oluşmuş büyük boyuttaki erime boşlukları içerisinde yer alırlar ve boşluk boyunca büyük hacimlerde ve hızla hareket ederler. Bu tür karstik boşluklarda içerisinde türbülânslı akımın oluştuğu yeraltı nehirleri meydana gelebilir. Karstik yapılar, sınırlarının karbonat kayalarının bölgedeki yayılımı ile kontrol edilmesi nedeniyle yüzey ve yeraltı sularının karstik boşluklar içerisinde kaybolmasına ve kilometrelerce mesafe ötede, çok büyük miktarlarda yeryüzüne karstik kaynak olarak çıkarak bu alanlarda akarsuların oluşmasına neden olurlar.

Yeraltı sularını tehdit eden önemli tehlikelerden biri kirlenmedir. Yeraltı suları atıkların, yakıt veya tarım gibi özel amaçlı kullanılan kimyasalların kirletici etkisi altındadır. Ayrıca büyük çöp tepelerini oluşturan ve her türlü katı atığın herhangi bir önlem alınmadan, gelişigüzel döküldüğü kontrolsuz vahşi çöp sahalarında biriken evsel atık, tıbbî atık, tehlikeli atık, inşaat atığı ve molozlar da diğer kirleticileri oluşturmaktadır. Bu kirlenmelerin gerçekleşmesi hâlinde yaratacağı sorunun çözümü oldukça zor, pahalı ve bazı durumlarda imkânsızdır. Bu nedenle, bu konuda uygulanacak en iyi yöntem, söz konusu kirleticilerin yeraltı suyuna karışmasını engellemektir. Kirleticilerin yeraltı suyuna karışması hâlinde ise kirletici sıvıların ve yeraltı sularının akış yönlerinin iyi belirlenmesi ve bu şekilde kuyuların kirleticilerden kısmen uzaklaştırılabilmesi önemlidir.

Buradaki en önemli husus, tüm kirletici endüstriyel ve evsel atık suların, kaynağında arıtılmaya tâbi (bağlı) tutulması, evsel ve evsel nitelikli endüstriyel atıkların geri kazanılması, kazanılamayanların ise insan ve çevre sağlığını korumak amacıyla çevre ve insana zarar vermeyecek şekilde projelendirilip inşa edilmiş “deponi alanları” olarak adlandırılan katı atık depolama alanlarında, gerekli geçirimsizlik ve hijyen şartlarda depolanmasının sağlanmasıdır. Böylece yeraltı sularının kirletilmesi kaynağında engellenerek, sürekli ve sağlıklı bir kullanımının sağlanması mümkün olabilir.

7. BÖLÜM: KIYI ve DENİZ ORTAMLARI

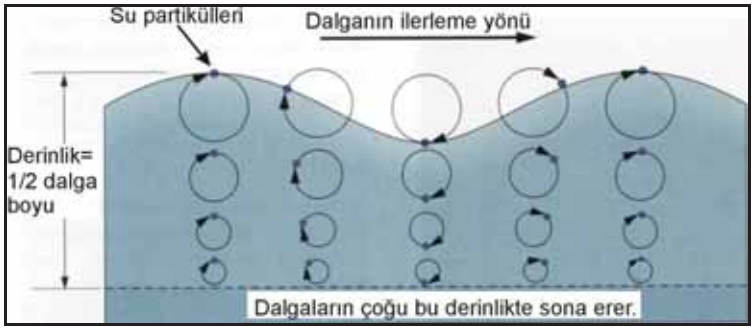
7.1. Giriş

Yeryüzünde, bir okyanus ile bağlantılı olan ve büyük alanlar kaplayan genellikle tuzlu su birikintilerine **deniz** adı verilir. Jeolojik dönemler içerisinde tektonizmanın ve/veya deniz düzeyindeki yükselimlerin etkisi ile su seviyesi altına inen dünya denizleri ile bağlantılı olan çukur alanlar, su ile kaplanarak denizleri oluşturur. Denizlerle karaların arasındaki geçiş zonuna **kıyı** adı verilir. Aşınım-birikim, tektonizma, volkanizma, kütle hareketleri gibi karasal ortamlarda gözlenen pek çok jeolojik ve jeomorfolojik olaylar, sadece karada değil, denizel ortamlarda su düzeyinin altında ve deniz tabanlarında da meydana gelir. Bu açıdan tektonik faaliyetler dışında kalan jeolojik olayların gelişimini kontrol eden faktörler içerisinde su etkisi de önemli bir yer tutmaktadır. Denizel ortamlar genelde, su altında kalan ve düşük enerjili bölgeler olarak kabul edildiğinden, yerbilimciler tarafından karadan aşınarak taşınan malzemenin depolandığı ve aşınım etkisinin pek görülmediği bölgeler olarak kabul edilir. Bu görüş kısmen doğru olsa da denizel ortamlar içerisinde de akıntıların önemli düzeylerde erozyon, sediment taşıma ve biriktirme etkisi bulunmaktadır. Denizel ortamlarda sediment hareketinin (aşınım-birikim süreci) en yaygın olarak izlendiği alanları, kıyı ve hemen açığındaki dalga tabanının deniz tabanına ulaşabildiği bölgeler oluşturur. Özellikle “kıyı mühendisliği” uygulamalarında kıyı erozyonu, bu alanlardaki yapılaşmalar açısından son derece önemli bir süreci oluşturmaktadır.

7.2. Kıyı Alanları

Yerküre’nin gerek karalarda gerekse denizaltı tabanı yüzeylerinde jeolojik süreçlerle meydana gelen değişik yüzey şekillerini inceleyen,

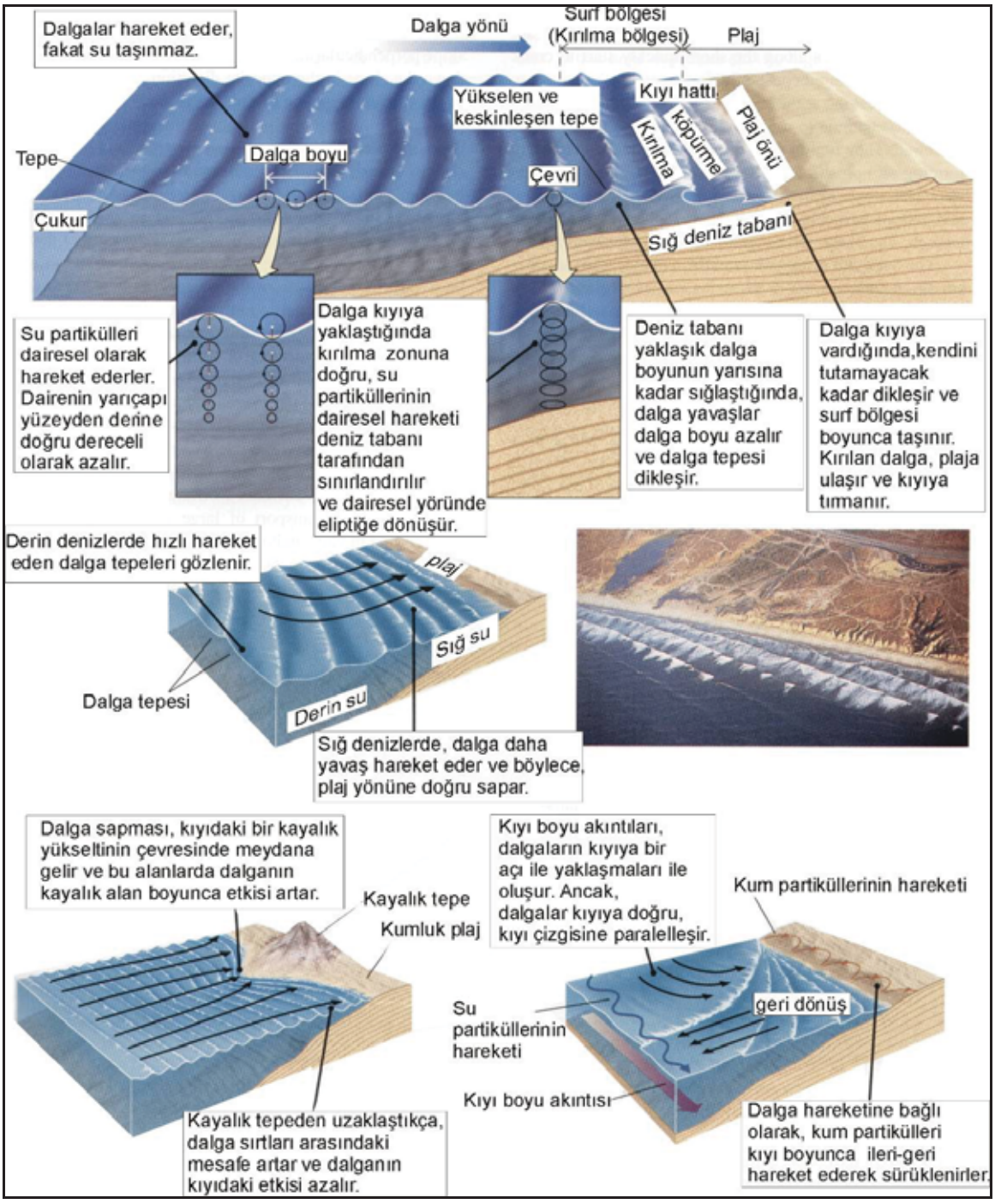
sınıflandıran oluşum ve evrimlerini açıklayan bilim dalına **jeomorfoloji** *(geomorphology)* ya da **yüzey/yerşekil bilimi** denir. Jeomorfolojik oluşumların büyük bir kısmı levha hareketleri sonucu oluşurlar. Levha hareketleri ile meydana gelen okyanus ve denizlerde, su düzeyinin üzerinde esen rüzgâr, su kütlesinin üst yüzeyinin hareketlenmesine, dolayısıyla dalga oluşumuna neden olur. Açık denizde su partikülleri, kendi çevrelerinde dairesel bir hareket (*swell*) geliştirmek suretiyle deniz yüzeyinde dalgaların oluşmasını sağlarlar (Şekil 7.1). Dalganın yükselerek oluşturduğu tepeye dalga tepesi ve iki tepe arasındaki çukura dalga çukuru, iki dalga tepesi ve çukuru arasındaki uzunluğa ise dalga boyu adı verilir (Şekil 7.2). Açık denizde dalga tepesi ilerlese de, onu oluşturan su partiküllerinin yeri değişmez. Dalgayı oluşturan su partiküllerinin dairesel hareketleri derine doğru gidildikçe tedrici olarak azalır. Bu azalma partiküllerin oluşturduğu dairelerin yarıçaplarının azalması şeklinde meydana gelir ve dalga boyunun yarısı kadar bir derinliğe ulaşıldığında su partiküllerinin dairesel hareketi ve buna bağlı olarak dalga hareketi sona erer.



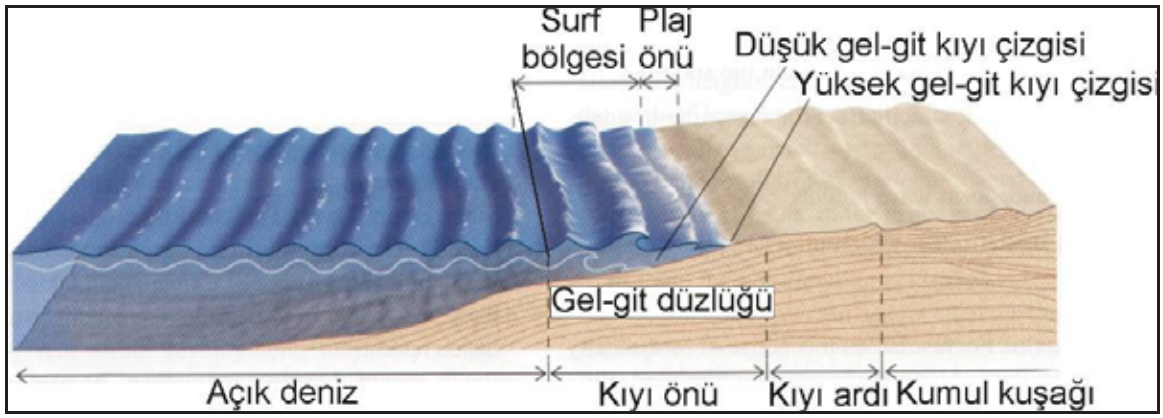
Şekil 7.1. Açık denizde bir dalganın oluşumu ve elemanları (*McGeary* vd., 2004).

Kıyı alanlara doğru yaklaşıldığında deniz tabanı sığlaşır. Deniz tabanı derinliği dalga boyunun yarısına kadar olan derinliğe yani, dalganın dairesel hareket yaptığı derinliğe kadar sığlaştığında, dairesel harekete sahip olan partiküllerin hareketi deniz tabanı tarafından sınırlanır. Bunun sonucunda, dairesel yörünge eliptik yörüngeye dönüşür (Şekil 7.2). Deniz tabanının dalga üzerindeki bu etkisi dalganın yavaşlamasına, dalga boyunun azalmasına ve dalga tepesinin dikleşmesine neden olur. Bunun sonucu olarak dalga kıyıya doğru ilerledikçe kendini tutamayacak kadar dikleşir, hızı azalır ve sonunda kırılarak kıyıya tırmanır. Dalganın kıyının şekillenmesinden etkilenerek yükselip kırılarak kıyıya ulaştığı bu bölgeye **sörf bölgesi** (surf zonu, *surf zone*) adı verilir. Kıyıya ulaşan dalgalar, plâj boyunca yıkama zonunda oluşturduğu

ileri-geri hareketi ile kıyıyı aşındırıcı veya biriktirici yönde etki eder. Dalganın deniz tabanından etkilenerek kazandığı yeni formu sonucu kıyıyı etkilemeye başladığı açıktaki ilk noktadan, kara yönünde ulaşabildiği en uç noktaya kadar olan bu bölge kıyı alanı olarak kabul edilir. Bu alanın deniz tarafı ise açık deniz olarak tanımlanır (Şekil 7.3).



Şekil 7.2. Dalganın açıktan kıyıya doğru olan hareketi sırasında dalga açısı ve kıyıyı oluşturan litolojik değişimler vb. farklılıklara bağlı olarak gelişen unsurlar (*Press* vd., 2004).



Şekil 7.3. Açık deniz ile kıyı önü ve kıyı ardından oluşan kıyı alanı bölgeleri (*Press* vd., 2004).

Plâj (kıyı, *beach*), kum ve çakıl gibi iri taneli zeminlerden oluşan, organik kavkılar içerebilen; deniz, göl gibi sahil şeritlerini oluşturan karasal-kumsal kıyı şeritleridir. Ortama malzeme girdi ve çıktısı eşit olduğunda plâj dengededir ve genel şeklini korur. Denge bozulunca plâj ya büyür ya da küçülür. Dolayısıyla kıyı alanları jeomorfolojik olarak kıyıda gerçekleştirilen mühendislik çalışmalarının uygulama alanı içerisinde yer alması nedeniyle önem taşımaktadır.

Açık denizde esen rüzgâr yönü ve buna bağlı olarak gelişen dalganın doğrultusu genelde kıyıya paralel olmayabilir. Bu durumda dalga, '**sörf bölgesi'**ne **(kırılma bölgesi)** girene kadar kıyı hattına belli bir açı ile yaklaşır. Sörf bölgesine ulaşan dalganın deniz tabanına temas eden bölümü yavaşlayıp kıyıya az-çok paralel bir doğrultu kazanırken, dalganın kıyıdan açıkta olan ve henüz deniz tabanı ile temas etmeyen bölümü ise hızını ve yönünü değiştirmeden kıyıya yaklaşmaya devam eder. Dalga, kazandığı bu iki farklı açıdan dolayı şeklen sapar ve buna **dalga sapması** veya dalga kırılması *(wave refraction)* adı verilir. Bu olay ile sahile paralel akıntı ve aşınma taşınma olayları gelişir. Kıyıya belirli bir açı ile yaklaşan dalgalar sapsalar bile kıyı hattına tam olarak paralel hâle gelemezler. Bu durumda dalgalar kıyıya belirli bir düşük açı ile ilerleyerek, kıyı boyu akıntısı adı verilen ve kıyıyı izleyen bir akıntının oluşmasına neden olurlar. Bu ilerleme sonucu plâj ortamındaki kum boyutlu kırıntılar dalganın sapma açısı ile aynı açıda kıyı yönünde sürüklenirler. Kıyıda belirli bir açı ile kırılan dalga, ters yönde bir açı ile geri çekilir ve bu işlem sırasında da plâjdaki kum boyutlu kırıntılıları da geri çeker. Kıyıya verev gelen dalga işleminin devamlı tekrarlanması sonucunda plâj

ortamlarında dalganın ilerleme yönünde olacak şekilde kum boyutlu kırıntılı materyal zikzak şekilli bir yol izleyerek kıyı boyunca sürüklenir. Plâja gelen suyun yayılması ve tekrar denize dönmesi ile zikzak şekillerde kıyı boyunca kum çökelmesi meydana gelir.

Kıyı hattının geriye, kara yönüne bükülmesi durumunda ise dalga yönüne bağlı olarak gerçekleşen sürüklenme, aynı yönde gelişimini denize doğru sürdüren bir ince kum şeridinin oluşmasına neden olur (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Kıyıya açılı gelen dalga ile sürüklenen ince kırıntılı sedimentlerin, sahil çizgisinin geriye büküldüğü yerlerde oluşturduğu kıyı oku (*Hamblin* ve *Cristiansen*, 2004).

Kıyı oku adı verilen ve tamamen sürüklenmiş kırıntılardan oluşan bu plâj uzantısı, dalga enerjisine ve gelen malzemenin hacmine bağlı olarak sürekli değişim gösteren bir yapı oluşturur. Bir kıyı oku gelişimi, dar bir koyun önünde meydana geldiğinde, genelde koyun ağzı kıyı oku tarafından kapatılır ve koy, içerisine dalga enerjisinin giremediği yarı kapalı bir çökelme ortamı olan **lagün** *(lagoon)* adı verilen bir tür göl hâlini alır. Jeomorfolojik adlandırmaya göre bu tür kıyı oku gelişimleri kıyı kordonu olarak tanımlanır. İstanbul'un Marmara Denizi kıyısındaki Küçükçekmece ve Büyükçekmece lagünleri buna bir örnek olarak verilebilir (Şekil 7.5) Lagünlerin içindeki sular genellikle tuzludur. Ancak tatlı suyu karalardan, tuzlu suyu da denizlerden alan lagünlerin deniz bağlantıları tamamen kopmuş ve tatlı su gelimi, denizden karışan tuzlu sudan çok fazla olursa bu durumda tatlı su göllerine dönüşürler (örn. İstanbul - Terkos Gölü). Çok tuzlu lagünlerde ise kurak sıcak iklim altında buharlaşma sonucu jips, tuz vb. kimyasal kökenli sedimenter kökenli kayaç tortuları (**evaporitler**, *evaporites*) çökelir.



Şekil 7.5. Kıyı boyu akıntıları ile sürüklenen kırıntılı sedimentlerin, kıyıda oluşturdukları yapılara örnekler (*Google-Earth*).
a) Küçükçekmece Lagünü önünde yer alan kıyı kordonu,
b) Tombolo ile ana karaya bağlanan Kapıdağ Yarımadası.

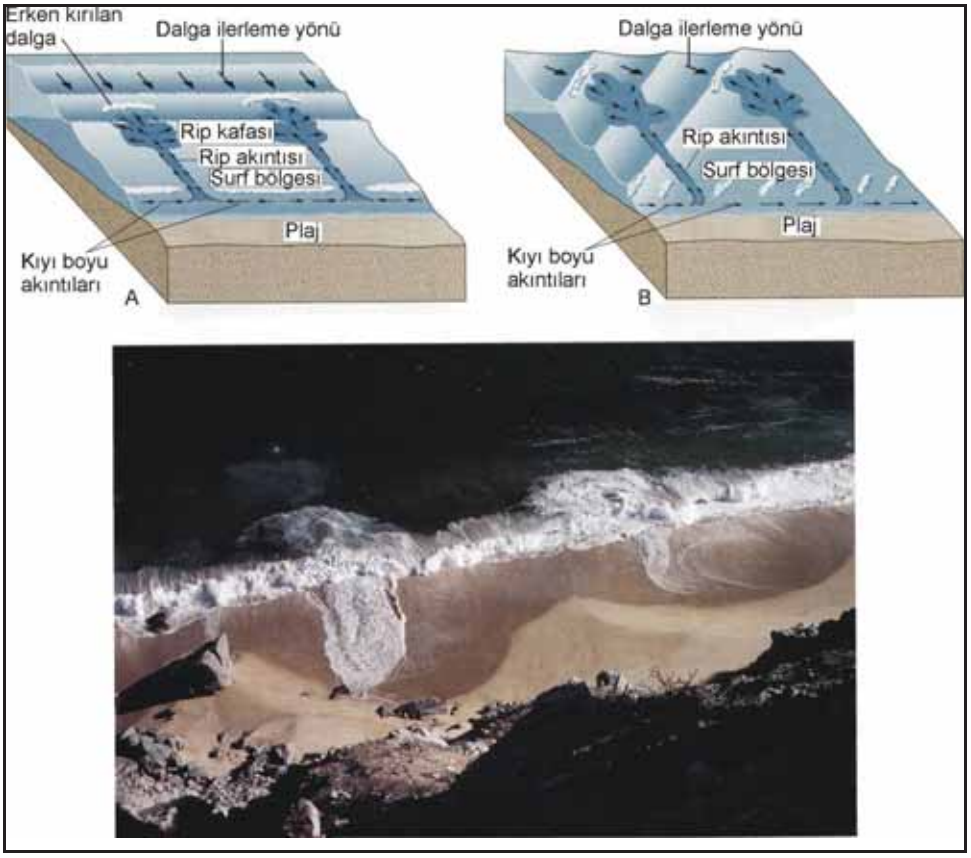
Karasal ve denizel lagünlerde buharlaşma ile tuzluluk (*salinity*) ve buharlaşma artışına bağlı olarak meydana gelen kimyasal çökelmede, önce soğuk suda daha fazla eriyik hâlde bulunan CO_2 gazı, suyun sıcaklığı arttıkça sudan daha hızlı ayrılır ve ilk olarak karbonatlardan manyezit, kireçtaşı-dolomit; sıcaklık arttıkça, üste doğru sülfatlardan jips, anhidrit, en üstte de tuzluluk ve buharlaşmanın daha da artmasıyla kloritler (yüksek tuzluluk oranında: KCl/Silvin ve NaCl/Halit tuzları) tabakalar hâlinde çökelirler.

Kıyı oklarının bir başka türü, kıyı ile kıyının hemen açığında yer alan kayalıklar veya adalar arasında gelişir. Kıyıya yakın olan adalarda, açık denizden gelen dalgalar, adaya çarparak adanın arkasında ters yönlerde kırılırlar. Bu dalgaların oluşturduğu akıntılar, taşıdıkları kırıntıları adanın arkasında toplayarak birikmelerine neden olurlar. Bu biriktirme ile bir ada, karaya bağlamış ise bu özellikteki setlere, kumul şeritlerine **tombolo** *(tombolo)* denir. Tombolo adı verilen bu tür yapılar, karaya yakın kıyının hemen açığındaki adalar ile kıyıyı dar bir kumsal şeridi ile bağlayarak, bağlandığı adayı yarımadaya dönüştürürler.

Marmara Denizi'nde eskiden bir ada olan Kapıdağ, birkaç tombolo ile karaya bağlanmış ve Kapıdağ Yarımadası'nı oluşturmuştur (Şekil 7.5/b). Ayrıca iki tombolo bir kafes yapısı oluşturarak kara ile bağlanıp bir lagün oluşturabilir. Kıyı boyu akıntıları dışında, dalgaların oluşturduğu bir başka akıntı sistemi ise *** "rip akıntıları"**dır *(rip currents)*. Deniz dibi rip akıntıları, kıyıya çarpan dalgaların geri çekilmesi işlemi sırasında, çekilen su tarafından

kıyıdan açığa doğru gerçekleşir. Dalga cephesinin kıyıya paralel veya açılı olması, rip akıntılarını besleyen kıyı boyu akıntısının yönünü etkiler (Şekil 7.6. A, B).

***[Rip akıntısı:** Deniz dalgalarının, plajlarda sahile yakın ve sahile paralel sığ derinliklerde yığdıkları kum seddelerini aşarak, suların kıyıdan tekrar denize dönerken bu seddeleri yer yer yırtmalarıyla oluşturdukları, suyun daha hızlı geri dönebileceği derin kanallar boyunca denize doğru (yaklaşık saniyede birkaç metre veya daha fazla hızla, 20m-30m genişliğinde bir hat boyunca) geri akmasıdır. 'Kum kayması' oluşturan rip akıntısı, kıyıya ulaşan suların tekrar denize dönmeleri nedeniyle meydana gelirler ve oluştukları yerde akıntının su rengi, çevresindeki su rengine nazaran daha koyudur, su derinliği de oluşturdukları kanal nedeniyle çevresine oranla daha fazladır. Rip akıntısının olduğu kesimlerde su derinliğinin yarım metre olması durumunda bile boğulma tehlikesi vardır**]**.



Şekil 7.6. Kıyılarda (A, B) oluşan rip akıntıları (*McGeary* vd., 2004).

Bu tanımlamalardan da anlaşılabileceği gibi plâj ortamları, atmosferik şartlara bağlı olarak doğal hâlinde dahi sürekli olarak değişen ve oldukça kırılgan bir yapıya sahiptirler. Bu değişim, bir fırtına sonrasında (Şekil 7.7) veya mevsimsel değişimlere bağlı olarak (Şekil 7.8) insan tarafından gözlenebilecek sıklıkta gerçekleşebileceği gibi jeolojik dönemler içerisinde

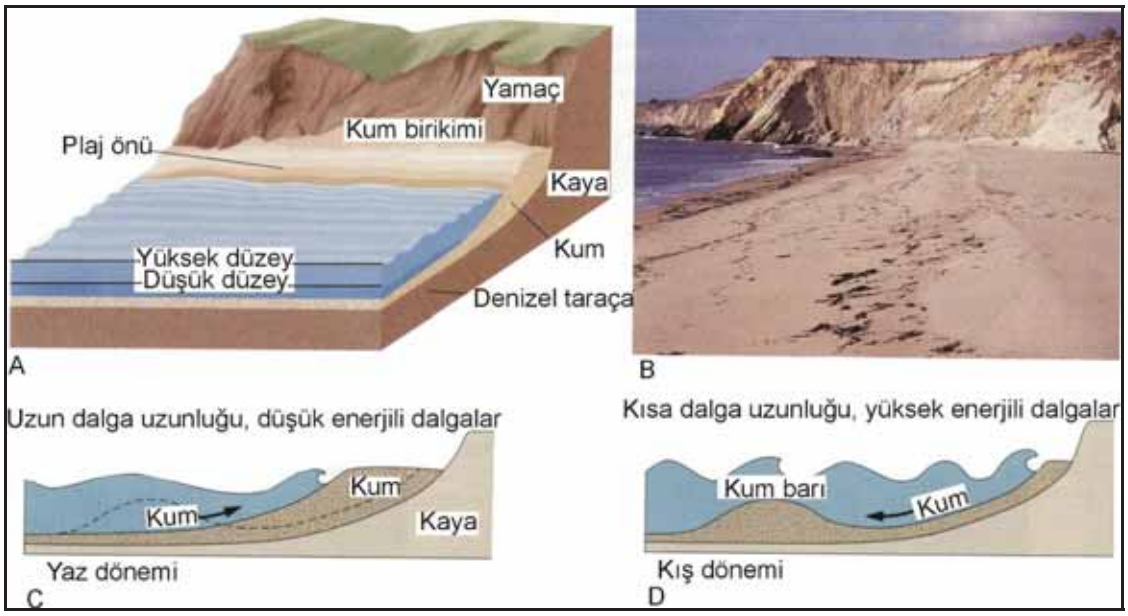
deniz düzeyi değişimlerine veya kıyı erozyonuna bağlı olarak gelişen ve çok daha kalıcı kıyı şekillenmeleri biçiminde de olabilir (Şekil 7.9). Kıyıdaki sert kayalardan oluşan burunlar, dalga enerjisi ile aşındırılırlar. Bu kayalardan koparılan kırıntılı malzeme ise koylara depolanarak plâjlar oluşturulur. Bu işlemin uzun vadede devam etmesi sonucu kıyıdaki burunlar düzlenirken, kıyı hattı boyunca kayalardan koparılıp ufalanan kırıntılı malzeme ile sahil hattı boyunca bir plâj oluşumu gerçekleşir. Ayrıntıda bu kıyı prosesinin (süreç) ilk aşaması, karadan dışarı doğru uzanan burunların koylara oranla daha erken bir mesafede sörf *(surf)* bölgesi oluşturması ve kırılan dalgaların kıyıdaki burunların uç kısımlarını aşındırması ile başlar (Şekil 7.9.A, 7.9.B). Koylarda ise deniz tabanı hâlen bir surf bölgesi oluşmasına müsaade etmeyecek kadar derin olup dalga boyu ise uzundur. Burunun çevresinde sapan dalgalar, bu alanlarda burundan içeri doğru kıyı boyu akıntılarının oluşmasına ve burundan koparılan malzemenin koylarda biriktirilmesine neden olur (Şekil 7.9.B-C). Burunların aşındırılması ve aşınan malzemenin koylara depolanması işleminin sonucunda, kıyı düzlenir ve kıyı boyunca bir plâj oluşur (Şekil 7.9.D). Bu işlem aşamalarından da anlaşılacağı gibi kıyıda meydana gelen dalga aşındırması, bu alandaki birikimin de önemli kaynaklarından birini oluşturmaktadır (Şekil 7.10.A). Bununla birlikte kıyılarda meydana gelen birikimin en önemli kaynağını akarsular tarafından getirilen çökeller oluştururlar. Böylece akarsular yoluyla ve dalga aşındırması, kıyıda biriktirilen sedimentlerin iki önemli kaynağını oluşturur. Buna karşın kıyıda biriken çökellerin bir bölümü, rüzgârın etkisi ile karanın içerine doğru sürüklenirken (*****deflasyon, *aeolian processes*); diğer bir bölümü ise kıta yamacı boyunca türbiditik akıntılar veya denizaltı kütle hareketleri ile derin denizlere taşınarak kıyı ortamından uzaklaştırılırlar (Şekil 7.10.A).

***[Deflasyon:** Şiddetli rüzgârların oluşturduğu erozyon ile tutturulmamış kırıntılı ve ince daneli zeminin karasal ortamdan rüzgârlarla süpürülerek taşınıp farklı bölgelerde çökelme süreci. Bitkilerin olmadığı sıcak ya da soğuk kurak bölgelerde rüzgârların etkisiyle çimentolanmamış kum ya da daha ince kil, silt boyutundaki kumulların çöl fırtınaları ile km'lerce ötelere taşınarak karalarda (örn. Kuzey Afrika'daki Büyük Sahra Çölü) ya da okyanus diplerinde çökelmeleri**]**.

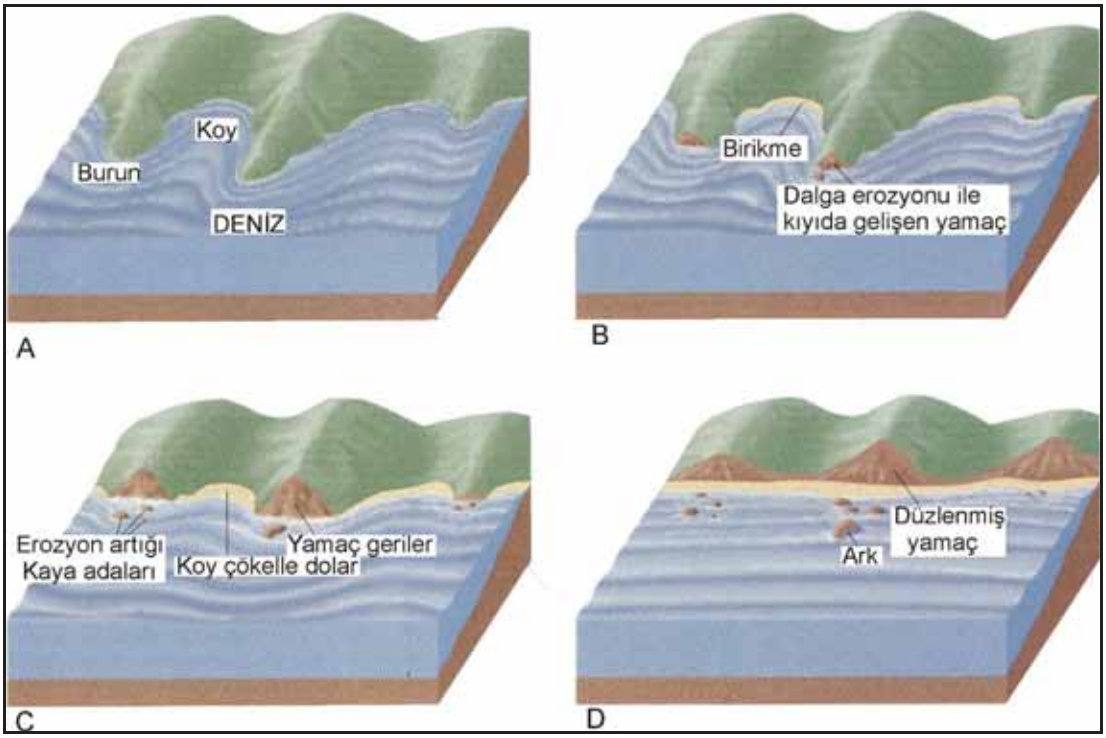
Lös *(loess)*: Rüzgârlarla taşınıp biriktirilen, çoğunluğu çamur ve kısmen kil ve kum karışımından oluşan, tabakalaşmamış, homojen ve karasal ortamda çökelmiş, düşey kazılarda kendini kısmen tutabilen gevşek tutturulmuş ve çoğunlukla güncel dönemde (Kuvaterner) son buzul çağında yaygınca oluşmuş verimli sedimenter çökeller.



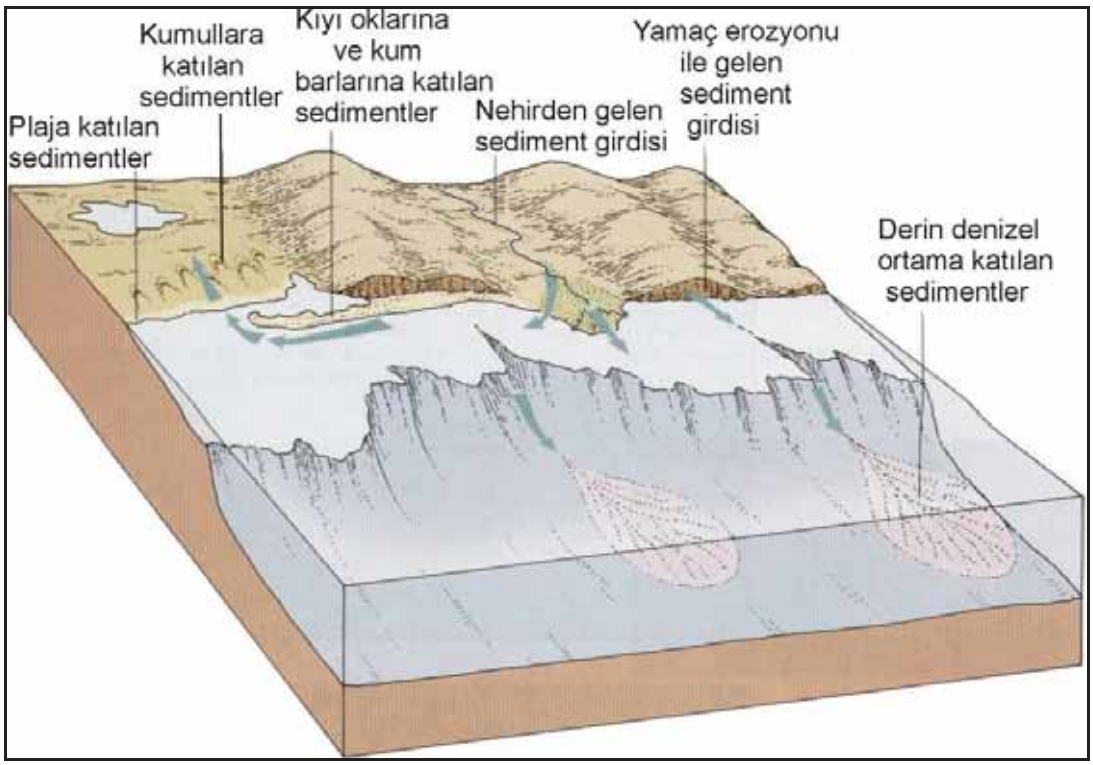
Şekil 7.7. Kıyı erozyonu. 2004 ve 2006 yıllarında Florida sahilinde etkili olan *Ivan* ve *Dennis* kasırgalarının kıyıda gerçekleştirdiği erozyon, plâjın zamanla yok olmasına neden olmuştur (USGS-http://coastal.er.usgs.gov/hurricanes/dennis2005/photosets-seagrove.html).



Şekil 7.8. Mevsimsel değişimlere bağlı olarak kıyıdaki kırıntılıların yer değiştirmeleri ve bunun sonucu olarak kıyıda meydana gelen değişimler (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 7.9. Kıyı aşınımları. Kırılan dalgaların zaman içerisinde kıyıdaki burunları aşındırıp, koylarda biriktirmeleri sonucu, kıyıda gelişen aşınım-birikim işlemi ve kıyı gerilemesi (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 7.10.A) Kıyıda meydana gelen sediment getirim ve kayıpları (*Hamblin* ve *Cristiansen*, 2004).

Dalga aşındırmasının oluşturduğu yüzey şekillerinden bir diğeri de; dalga kırılması nedeniyle dalga enerjisinin sörf alanında yarımadanın ucunda yoğunlaşarak, bu kesimlerde zayıf zonları etkileyip, erozyon sonucu adacıkların oluşmasına (Şekil 7.10.B) ve aşınan malzemenin de kıyıda depolanarak plâjların genişlemesine neden olmasıdır.



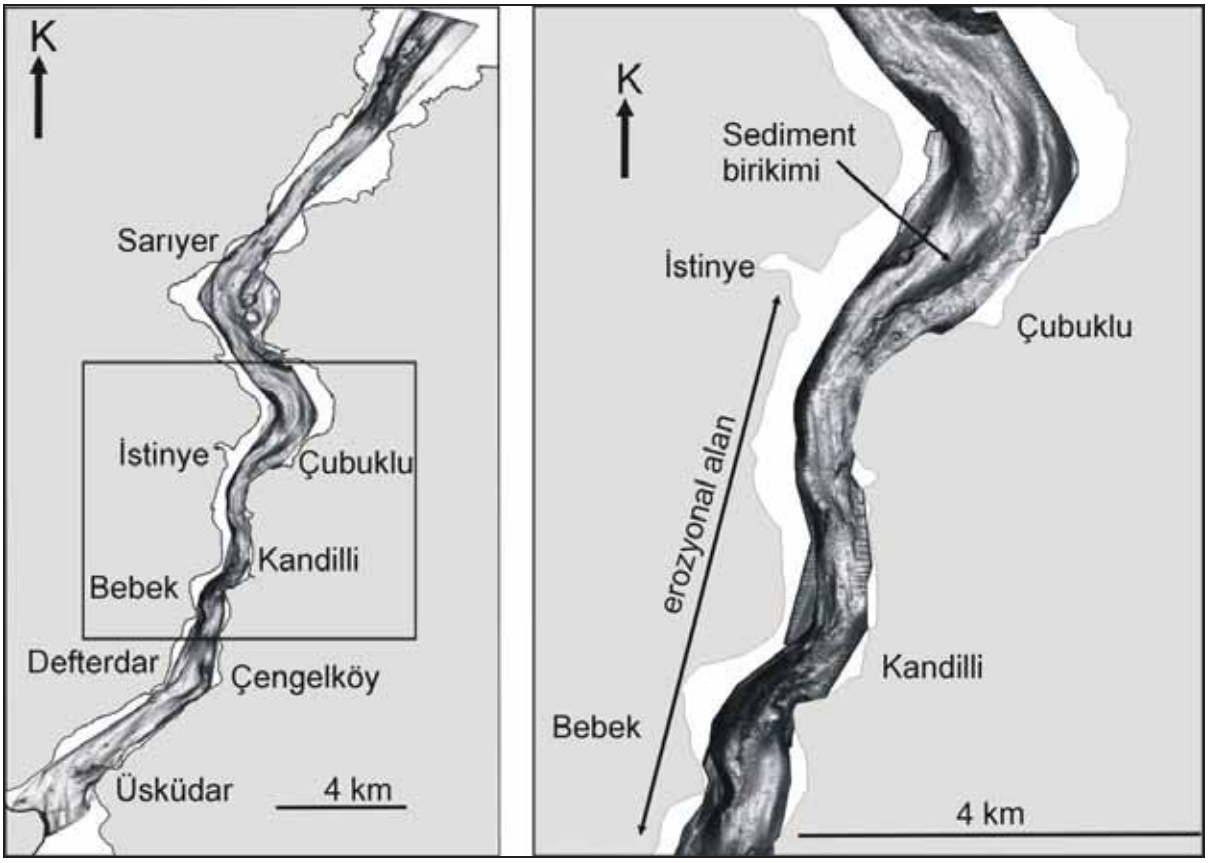
Şekil 7.10.B) Deniz Yığını. Antalya Travertenleri. Kıyı şeridinde, dalga enerjisi ile erozyon (sörf alanı erozyonu) sonucu bir burunun aşınmasıyla oluşan adacıklar **(= deniz yığını**; *sea stacks* **)** (12.11.2011).

Kıyıları ve plâjları; dalgalar yanında gel-git veya med cezir *(tides)* olarak adlandırılan su düzeylerinin dönemli yükselmeleri ve alçalmaları da etkiler ve plâjlar şekil değişikliklerine uğrarlar. Ay ve güneşin çekim gücü etkisiyle okyanuslarda görülen su yükselmeleri ve alçalmalarına **gel-git**, suların yükselme ve alçalmaları ile ortaya çıkan yükselti farkına ise **gel-git genliği** denir. Dünyanın çeşitli yerlerinde gel-gitlerle oluşan su yüksekliği farkı, zamanla ve yere göre de değişir. Karadeniz, Akdeniz gibi kapalı denizlerde gelgit genliği küçük olup cm'ler (30 cm - 80 cm) ölçeğinde, açık okyanus kıyılarında ise daha büyük olup yaklaşık 8 m ilâ 20 m arasında kabarmalar

oluşturabilirler. Ülkemizde, gel-git genliği 30 cm - 40 cm civarlarındadır. Gel-gitlerin aşındırıcı etkisi dalgalarla da birleşerek önemli olabilir. Gel-git ile kıyıya yaklaşan sular, yavaş ya da kilometrelerce hıza ulaşarak gel-git seli *(flood tide)* oluştururlar. Gel-git azalmaya başlayınca da sular çekilirler. Bu tür gelgit akıntıları ile menderesli ve akarsu kanallarını kesen, çamurlu veya kumlu gel-git düzlükleri *(tidal flat)* gelişmektedir. Sığ denizel ve kıyı alanlarındaki aşınım etkisi sadece kıyılarda meydana gelmez. Akıntı sistemlerinin yoğun olarak etkin olduğu alanlarda deniz tabanı bir akarsu vâdisi benzeri şekilde akıntılar tarafından aşındırılabilir. Aşındırılan sedimentler, akıntının etkisi ile başka alanlara taşınarak biriktirilirler. Bu tür sedimentlere yeniden işlenmiş *(reworked)* sedimentler adı verilir. Deniz tabanı erozyonu ile ilgili en belirgin örneklere boğaz gibi kanal türü morfolojiye sahip alanlarda rastlanır.

Özellikle İstanbul Boğazı, akıntıların etkisi ile deniz tabanı erozyonunun en belirgin olarak izlendiği alanlardan birini oluşturmaktadır. İstanbul Boğazı, bulunduğu coğrafya itibarıyla az tuzlu ve soğuk Karadeniz sularıyla, tuzlu ve sıcak Akdeniz kökenli sular arasında günümüzde bir geçiş alanı konumundadır. Bu iki farklı su kütlesi, boğaz boyunca birbirleriyle sınırlı miktarda karışırken, bir yandan da sahip oldukları farklı fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle boğazda iki tabakalı bir akış sistemi oluştururlar. Bu su kütlelerinden Karadeniz kökenli az tuzlu ve soğuk sulara birleşen nehirler boğazda güneye doğru bir üst akıntı oluşturarak Marmara Denizi'ne doğru akarken, Akdeniz kökenli tuzlu ve sıcak sular ise bu su tabakasının altından Karadeniz'e doğru ilerleyen bir alt-dip akıntısı oluştururlar. Bu iki akıntı sisteminin hızlarının İstanbul Boğazı boyunca var olan ince taneli sedimenti aşındırabileceği, yapılan çalışmalarla belirlenmiştir (Ergin vd., 1991).

Yakın dönemde yapılan çalışmalar ise İstanbul Boğazı tabanındaki erozyonun izleri, hassas batimetri verileri üzerinde belirlenebilmiştir (Şekil 7.11; Gökaşan vd., 2005; 2006). İstanbul Boğazı'nın dar olduğu Bebek-Kandilli ile İstinye–Çubuklu arasındaki bölgede akıntının hızlanmasına bağlı olarak deniz tabanından aşınan malzeme, Çubuklu'nun kuzeyinde boğazın anîden genişlediği alanda akıntının yavaşlamasına bağlı olarak biriktirilerek, deniz tabanında bir sedimenter yığının oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 7.11. İstanbul Boğazı mikro-batimetri haritası (Gökaşan vd., 2005; 2006).

7.3. Kıyılarda Yapılaşma

Kıyı alanlarının kullanımı ve bu alanlardaki yapılaşmaların tarihi, insanlık tarihi kadar eskidir. İnsanlar ilk çağlardan beri öncelikle tatlı su ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla akarsu ve göl kenarlarına yerleşmişler, daha sonra medeniyetin ilerlemesi ve ticarette deniz yollarının öneminin artışına bağlı olarak deniz kıyılarında oluşturulan liman kentleri, medeniyetlerin merkezi konumuna gelmiştir. Bu gelişime bağlı olarak kıyı alanlarındaki liman ve benzeri yapılar tarih boyunca gelişmiş ve önemini giderek arttırmıştır. Günümüzde, ticarî ilişkilere bağlı olarak kıyı alanlarının başlıca iki önemli kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi deniz taşımacılığı, diğeri ise turizmdir. Her iki kullanım türüne de hizmet etmek amacıyla kıyılarda otel, liman gibi yapılaşmalar gerçekleştirilmektedir. Bu yapıların güvenliklerinin sağlanması amacıyla kıyı ortamını oluşturan zeminin taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için zemin mekaniği *(soil mechanics)* çalışmaları ve bunun

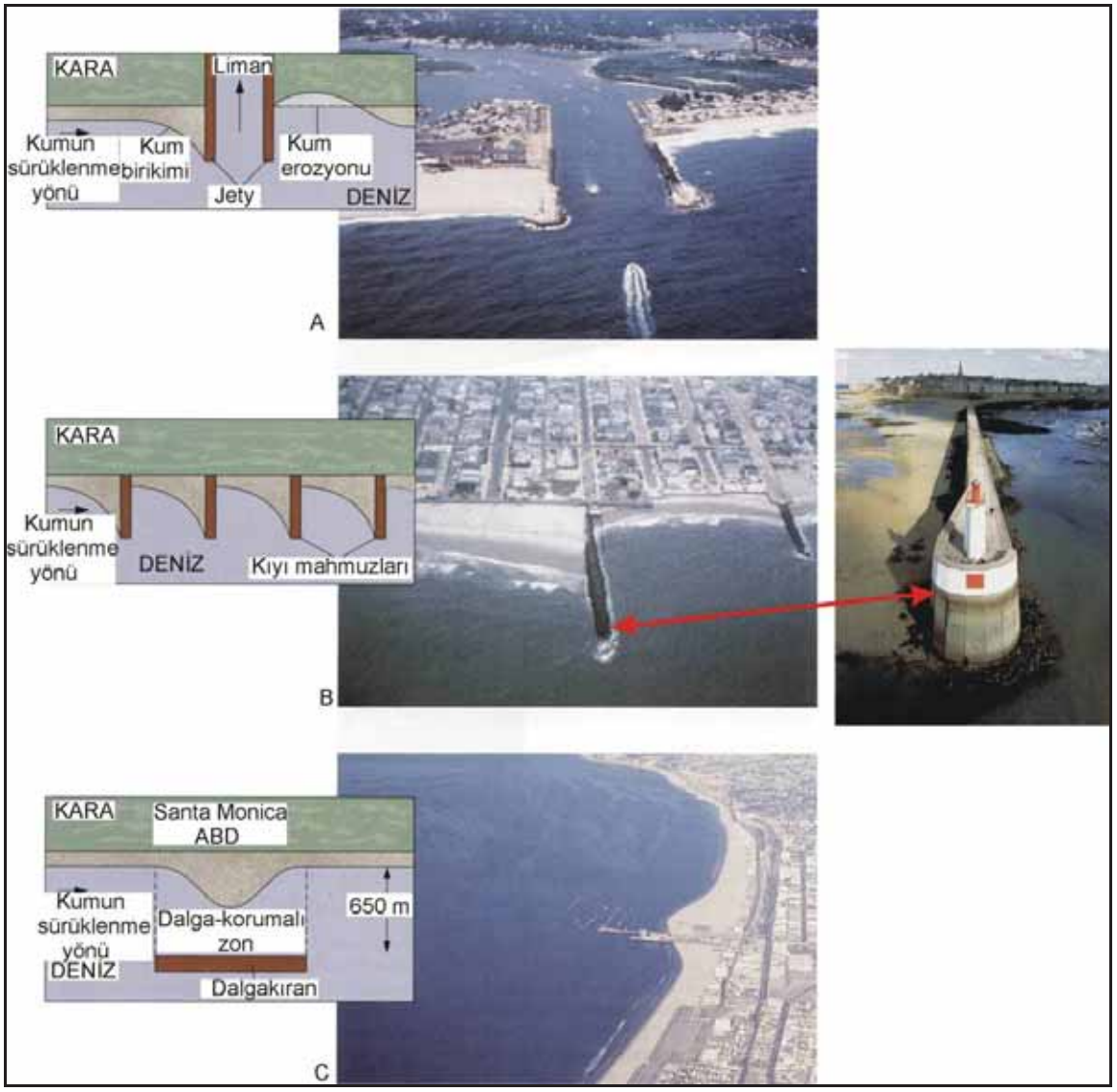
yanı sıra, kıyı gibi dinamik bir ortamın zaman içerisinde yapılara olan olumsuz etkisinin (erozyon, çökelme) belirlenmesi için kıyı dinamiklerinin araştırılması çalışmaları gerçekleştirilir. Bu nedenle, kıyılarda yapılan çalışmalarda, zemin mekaniği, kıyı mühendisliği, oşinografi, kıyı jeolojisi-jeomorfolojisi gibi araştırmalar ön plânda tutulur ve kıyının dinamik ortamından en az etkilenecek yapılaşma projelendirilir. Bu çalışmaların yanı sıra, özellikle turizm amaçlı kıyı kullanımlarında, yatırımcılar tarafından en çok istenilen niteliklerin başında uzun ve geniş bir plâjın varlığı gelir. Geniş bir sörf bölgesine sahip olan ve bu nedenle dalgaların yıkıcı-aşındırıcı özelliklerinden mümkün olduğunca korunan plâjlarda, bu isteğin yerine gelmesi doğal yollarla sağlanacağından, bu konuda ayrıca büyük bir yatırıma gerek yoktur. Ancak dalga enerjisinin önemli miktarda kıyıya ulaşarak, kıyıda bir erozyon yarattığı alanlarda ise bu sisteme dışarıdan müdâhale etme zorunluluğu doğmaktadır. Burada hemen belirtmek gerekir ki; doğanın hiç bitmeyen ve başa çıkılmaz enerjisine karşı, ona tezat bir yapıyı yapmakta ısrarcı olmak, sadece müdâhalenin yapıldığı kıyıya ve müdâhale edenlerin bütçelerine zarar vermekten öteye bir fayda sağlamaz. Bu nedenle, kıyı alanlarına dışarıdan yapılacak olan yapay müdâhalelerde, kıyı dinamiğini olabildiğince uzun periyotlar hâlinde incelemek ve ona en uygun yapıyı oluşturmak gerekir.

Kıyı alanlarında plâj olmayan bölgelerde doğal bir plâj oluşabilmesi için gerekli olan temel özellik, o kıyıya yamaç erozyonu ve/veya akarsu getirimi yolu ile gerçekleşen taneli (kum) sediment girdisinin çıktıdan daha fazla ve devamlı olmasıdır. Kırıntılı girdisinin çıktıdan daha az olduğu durumlarda, kıyıda erozyon meydana gelir ve plâj, oluşan erozyonun gücüne göre hızla veya tedrici olarak yok olur. Benzer şekilde kıyının kırıntılı kaynağında bir azalma meydana geldiğinde, aşınım ile birikim arasındaki denge yine bozulur ve kıyıdaki plâj yok olur. Bu dengenin bozulması için, meselâ kıyıyı besleyen akarsuyun üzerinde bir baraj yapılması yeterlidir. Söz konusu baraj, su ile birlikte kıyıya taşınan kırıntıların bir bölümünü de tutacağından, plâja giren kırıntılı bütçesi azalacak ve kıyı aşınmaya başlayacaktır. Bundan dolayı doğal dengeyi bozmamak için sadece kıyıdaki değil, kıyı ile ilişkili olan karadaki yapılaşma ve müdâhaleleri de iyi araştırmak ve plânlamak gerekir.

Yukarıda da değinildiği gibi kıyı boyunca plâj kumu, kırılan dalgalar ve kıyı boyu akıntılarının etkisi ile sürekli olarak dalga ilerleme yönü boyunca

sürüklenir. Eğer plâjda yeterli beslenme varsa sürüklenen malzemenin plâjda oluşturduğu boşluk, plâj boyunca geriden aynı yolla sürüklenen malzeme tarafından doldurularak sistem dengelenir. Ancak sistemi besleyen yeterli kaynak yoksa veya kaynaklar bir şekilde azalırsa, geriden kırıntılı getirimi olmadığından kıyıda sürüklenen malzemenin yerine yenisi konulamaz ve plâj erozyona uğrar. Bu durumda aşınan plâjın yeniden oluşturulabilmesi için kıyıya genelde iki şekilde müdâhale edilmektedir. Bunlardan birincisi kıyıda yapay olarak bir plâj oluşturmak için kum nakli yapmaktır. Ancak bu yöntem kıyıdaki dengeyi sağlayamayacağından, yığılan kum bir süre sonra kıyı erozyonu tarafından yeniden aşındırılır. Bu süre bölgenin sahip olduğu aşındırma enerjisine göre değişken olmakla birlikte, kıyıda oluşacak erozyon mutlaktır.

Son dönemlerde daha sıklıkla başvurulan bir başka yöntem ise kıyıya dik veya paralel olarak yapılan dalgakıran ve kıyı mahmuzu türü yapılardır (Yüksel, 2005). Bu sistemde dalga tarafından sürüklenen malzeme kıyı mahmuzları tarafından tutulur. Malzeme sürüklenmesi devam ettikçe, bir kapan görevi gören kıyı mahmuzlarının önünde kumlar yığılarak yarı yapay-yarı doğal bir plâjın oluşması sağlanır (Şekil 7.12.A-B). Ancak bu yapıların dalga cephesine veya kıyı boyu akıntılarına bakan yönünde bir birikim ve buna bağlı plâj oluşumu gerçekleşirken, kumun hemen tamamı bu yapılar tarafından kaplanmış olduğundan, yapının diğer tarafında ise geriden bir besleme olmaz. Bu durumda kıyı mahmuzunun gerisinde kalan kıyıda sedimentler tarafından bir beslenme gerçekleşmediğinden dolayı kıyı erozyonu çok daha şiddetli olur. Bu şekilde yapılan pek çok müdâhale sonucu komşu kıyının sediment getirisinin önünü kesmekten dolayı mahkemelerde açılmış davalar bulunmaktadır. Bu tür bir yapılaşmada en uygun yöntem, kıyının sistematik olarak kıyı mahmuzları ile donatılması (seri mahmuz, Yüksel, 2005) ve plâjın devamlılığının sağlanmasıdır. Kıyılarda yapılaşma ve dalga mekaniği ile ilgili ayrıntılı bilgi Yüksel vd. (1998)'de ve Yüksel (2005)'de yer almaktadır.



Şekil 7.12. Kıyılardaki yapılar ve buna bağlı olarak plâj oluşumu örnekleri.

7.4. Kıyı Alanları ile İlgili Hukukî Tanımlar

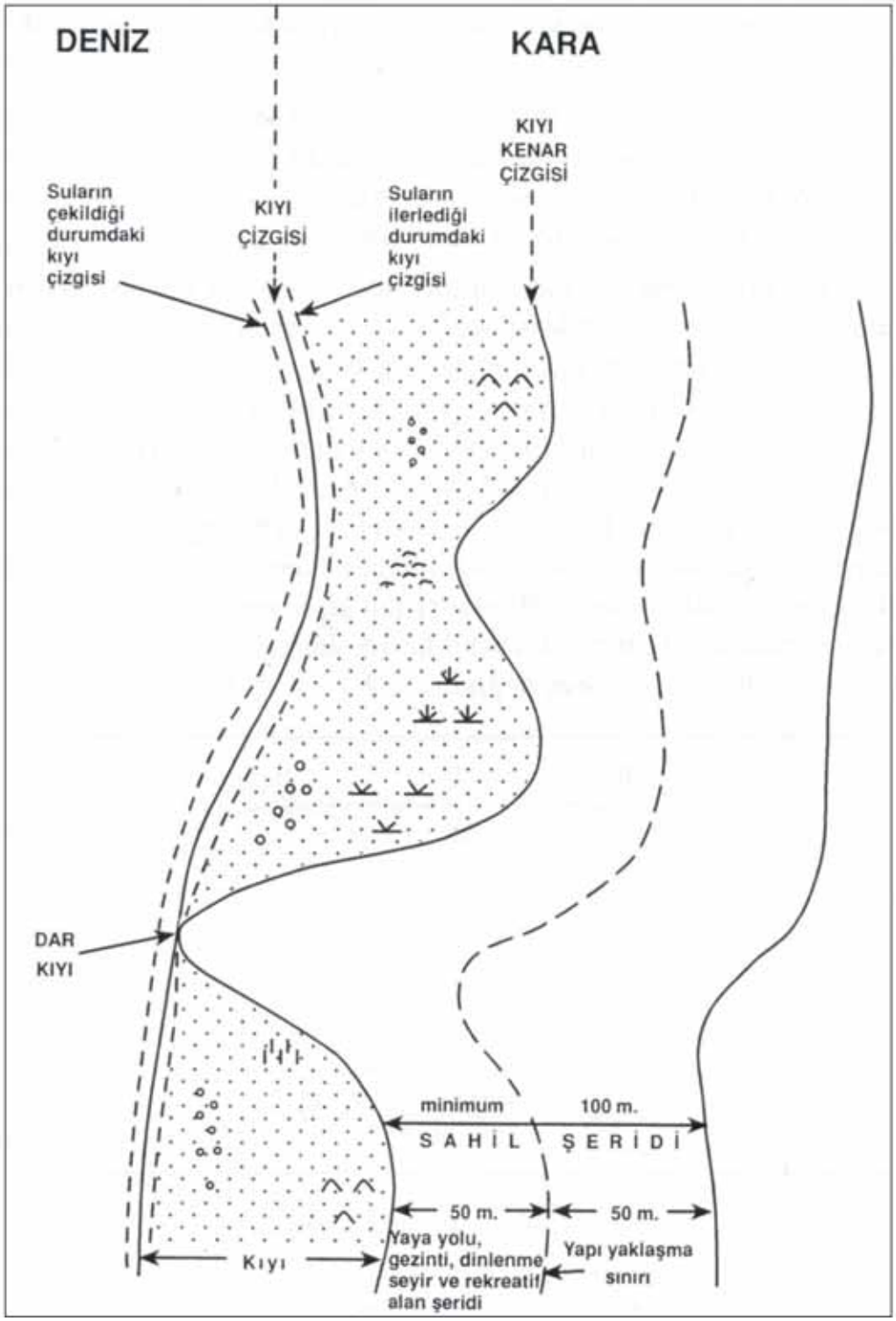
Kıyı bölgelerinde artan nüfus ve yerleşime bağlı olarak kıyılardan yararlanma ile ilgili kuralların getirilme zorunluluğu doğmuş ve zaman içerisindeki gelişmelere bağlı olarak Kıyı Kanunu güncellenmiştir. Buna göre kıyı alanını belirleyebilmek için kıyı, kıyı çizgisi, kıyı kenar çizgisi", sahil şeridi gibi tanımlamalardan yararlanılmıştır (Şekil 7.13). **Kıyı çizgisi**; deniz, tabiî (doğal) ve sunî (yapay) göl ve akarsularda, taşkın durumları dışında, suyun karaya değdiği noktaların birleşmesinden oluşan çizgidir. Bu çizgiler, taşkın durumları dışında meteorolojik olaylara göre değişen çizgiler olup herhangi bir dönemde kara ile denizi ayıran sınırdır. Bu sınır meteorolojik koşullara veya

gel-git olaylarına göre değişeceği için sabit bir sınır olarak kabul edilmez. Kıyı kanununa göre **kıyı kenar çizgisi**; deniz, tabiî ve sunî göl ve akarsularda, kıyı çizgisinden sonraki kara yönünde su hareketlerinin oluşturduğu kumluk, çakıllık, kayalık, taşlık sazlık, bataklık ya da benzeri alanların kara yönünde kalan doğal sınırıdır ve yapay olarak doldurulma ile arazi elde edilmesi hâlinde bile bu sınır değişmez.

Kıyı; "kıyı çizgisi" ile "kıyı kenar çizgisi" arasında kalan alandır. **Alçak (basık) kıyı** ise kıyı çizgisinden sonra da devam eden kıyı hareketlerinin oluşturduğu plâj, hareketli ve sabit kumları da içeren kıyı kordonu, lagün gölü, lagün alanları, sazlık, bataklık ile kumluk, çakıllık, taşlık ve kayalık alanları içeren kıyılardır. **"**Kıyılara moloz, toprak, cüruf gibi kirletici etkisi olan atık ve artıklar dökülemez. Kıyılarda, kıyıyı değiştirecek boyutta kazı yapılamaz, kum, çakıl vs. alınamaz veya çekilemez**"** (TC, Kıyı Kanunu no: 3621, www.mevzuat.adalet.gov.tr/html/790.html, 1992).

'Kıyı kenar çizgisi'nin deniz tarafında kalan bölümü, kıyı olarak kabul edilir ve yapılaşmaya kesinlikle izin verilmemesi gerekmektedir. Kıyı kenar çizgisinin kara tarafından kalan ve yatay olarak en az 100 m genişliğindeki alan **sahil şeridi** olarak adlandırılır ve iki bölüme ayrılır (Şekil 7.13). **Sahil şeridinin birinci bölümü:** Sahil şeridinin tümü ile sadece açık alanlar olarak düzenlenen yeşil alan, çocuk bahçesi, gezinti alanları, dinlenme ve rekreaktif alanlar ile yaya yollarından oluşan, kıyı kenar çizgisinden itibaren kara yönünde yatay olarak 50 m (sahil şeridinin ilk 50 m'si) genişliğinde belirlenen bölümdür (Açlar ve Çağdaş, 2008). **Sahil şeridinin ikinci bölümü:** Sahil şeridinin birinci bölümünden sonra kara yönünde yatay olarak en az 50 m genişliğinde olmak üzere belirlenen ve üzerinde sadece toplumun yararlanmasına açık günübirlik turizm tesisleri, taşıt yolları, açık otoparklar ve arıtma tesisleri gibi yapıların yapılabildiği (sahil şeridinin ikinci 50 m'si) bölümdür. Kıyı Kanunu'na göre, dar-yüksek kıyılarda, kıyı kenar çizgisi falez veya şevin üst sınırından geçirilmekte, yapı yaklaşma mesafesi ise bu çizgiden itibaren ölçülmektedir ve yapılaşma falezden minimum 50 m uzaklıkta bir sahil şeridi oluşturulmasını ön görmektedir. Falezin sırt düzlüğünü oluşturan plâtformda, yeşil alan olarak bırakılması ve imara açılmaması gerekli emniyet şeridinin plâtform kenarından itibaren minimum 50 m olması gerekmektedir. Ancak bu mesafenin heyelân ve benzeri kütle hareketlerinde görülebilecek stabilite

bozukluklarının daha gerilere devam ettiğinin tespiti durumunda, emniyet şeridini oluşturan mesafe arttırılabilmeli, can ve mal emniyetini sağlayacak yapılaşma öncesi minimum sınır, yerinde bu konuda uzman jeoloji mühendislerince belirlenmelidir.



Şekil 7.13. Kıyılarda tanımlanan bölgeler (4.4.1990 tarihli 3621 sayılı ve ek 1.7.1992 tarihli, 3830 sayılı kıyı kanunlarına göre; Erinç, 2001).

7.5. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR :

7.5.1. YORUM: Dünya Deniz Seviyelerinin Yükselmesi, Kıyı Alanları ve Tarihî Batık Kentler - Arkeoloji İlişkisi:

Genel olarak başta Akdeniz ve Ege Denizi olmak üzere kıyı şeritlerinde deniz dibinde kalan tarihî batık kentlerin ve yerleşim alanlarının tümünün depremler sonucu çökerek su altında kaldıkları belirtilmekte ve düşünülmektedir. Özellikle Alanya-Antalya/Kekova, Bodrum, Çanakkale gibi sahil şeritleri boyunca görülen ve bir kısmı veya tamamı deniz altında kalmış tarihî yapıların, sadece deprem sonucu deniz altına gömüldüğü anlayışı, doğru olarak bilinen yanlışlardan bir tanesini oluşturmaktadır. Bu konunun aydınlığa kavuşabilmesi için ise zamanda biraz geriye giderek günümüze kadar geçen sürede, doğada oluşan olayları sade, kesiksiz ve belli bir sıra içinde mümkün olduğunca anlaşılabilir düzeyde tanımlamak gerekmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan bir tanesi, dünyada meydana gelen global iklim değişikliği davranışıdır.

Dünya ölçeğinde büyük iklim değişiklikleri dikkate alındığında, bu değişikliklerin tek bir sürece bağlı olmadığı görülmektedir. Dünyanın güneş etrafındaki elips yörüngesinin geometrisinin yüzbin yılda bir, eksen eğikliğinin ise kırkbin yılda bir değişmesi, güneşin aktivitesinin (güneş lekelerinin artışı ve azalışı) periyodik değişimleri, güneş ışınlarının artışı ile sera etkisi yapan karbondioksit ve metan gibi gazlardaki artış, levha tektoniği, okyanus ve birkaç yüzbin yılda patlayan süper volkan faaliyetleri ile beşyüzbin sene ile 10 milyon sene arası süreçte dünyaya düşen ufak, 100 milyon senede bir düşen iri göktaşları (**asteroid** = çapları 1 km ilâ 500 km arasında değişen karbon, kaya ya da metalik olmak üzere üç tipte olabilen gezegen kalıntıları) vb. süreçlerin farklı ya da benzer zamanlarda etkimesi, küresel ölçekte iklim ve yaşam değişikliklerinin başlıca nedenlerindendir. Örnek olarak Dünyanın güneş etrafındaki hareketi esnasındaki dönme ekseni yörünge eksenine dik olmayıp (ya da ekvator düzlemi ile yörünge düzlemi arasındaki açı) kesişme açısı $\varepsilon = 23° 27$ dakikadır. Mevsimleri oluşturan bu eksen eğikliğinin kırkbin yılda bir periyodik olarak yaklaşık birkaç derece gibi çok küçük açılar arasında değişmesi bile güneş ışınlarının dünyaya daha dik veya eğik olarak gelmesine ve iklimlerde bölgesel olarak büyük değişikliklere neden olmaktadır (örn. Büyük Sahra Çölü, Afrika).

İklim ve yaşam değişikliklerinde en etken olan unsurların başında yer alan CO_2 gazı, ister aktif volkanlardan isterse diğer kaynaklardan veya insan eliyle çoğalmış olsun, bu gazın havada su buharı gibi yüksek oranda bulunması durumunda, okyanus yüzeylerince emilerek, okyanus yüzey sularının asit oranının artmasına neden olacaktır. Asit oranı artmış okyanus yüzeyi suları, CO_2 ile birleşip oluşan karbonik asit nedeniyle plankton, mercan ve diğer koruyucu kavkı üretmek zorunda olan diğer deniz canlılarının kalker kabuk oluşumlarının engellenip yok olmalarına, CO_2 salan yosunların deniz diplerinde çoğalmasına ve yaşam zincirinin yani ekosistemin bozulmasına neden olacaktır.

Yakın geçmişten günümüze doğru zamanda kısa bir yolculuk yapıldığında, günümüzden yaklaşık 40.000 yıl öncesinden başlayıp 21.000 yıl öncesine kadar hüküm süren son buzul döneminin bitmesiyle, ortalama yüzey sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak karalardaki buzulların erimesi ve okyanuslara akarak deniz su düzeyinin dünya çapında yükselmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu yükselim, ortalama dünya sıcaklığının gittikçe artmasına bağlı olarak yaklaşık 12.000 yıl önce Akdeniz'i de etkisi altına almıştır. Yükselmeye başlayan deniz seviyesi günümüzden 12.000 ile 9.500 yılları arası, giderek artan bir hızla yükselmesini sürdürerek, tuzlu Akdeniz sularını akarsu vâdisi olarak bilinen, karasal Çanakkale Boğazı'nı aşarak, günümüzden 9.000 yıl öncesi denizel ortama

dönüştürmeye başlamıştır. Aynı sular, bu tarihte daha düşük seviyede yer alan ve bir göl olan Marmara Denizi'ni de etkilemeye başlamış, suların yükselmeye devam etmesi ile Marmara Denizi, yine karasal ortamda akarsu ve ufak gölleri barındıran İstanbul Boğazı ile o tarihte bir göl niteliğinde olan ve bugünkü deniz seviyesinden 100'lerce m aşağıda yer alan Karadeniz'i doldurmaya başlamıştır. Dolayısı ile Akdeniz suları, dünya üzerindeki mevcut şelâleler ile mukayese edilemeyecek büyüklükte bir şelâle oluşturarak "Nuh Tufanı" benzeri şekilde İstanbul Boğazı'ndan Karadeniz'e dökülerek Karadeniz'in ve o dönemdeki sahil şeridini gözle, seneler içinde takip edilebilecek düzeyde hızla yükselmesine ve kısa bir zamanda dolmasına neden olmuştur. Günümüzden 7.500 yıl öncesinde ilk defa Akdeniz ile Karadeniz'in suları aynı seviyeye ulaşarak birbirine karışmış ve yaklaşık 5.500 yıl önce denizel ortam daha da yükselerek bugünkü deniz seviyesinin yaklaşık 5-6 m daha aşağı düzeyine ulaşmıştır. Deniz seviyesinin yükselmesi, günümüzden yaklaşık 9.500; 7.500; 5.500 ve 3.500 yıl öncesi gibi tarihlerde, okyanus sahil şeritleri yanında, Akdeniz-Karadeniz arası eski sahil şeritlerinde yaşayan insanların, deniz seviyesinin hızlı ve yavaş yükselim tarihlerine bağlı olarak o dönemlerde sular altında kalan deniz kıyılarındaki eski yerleşim alanlarını terk edip, denizden daha uzak ve yüksek yerlere yerleşmelerine neden olmuştur.

Kıtalarda, kutuplara yakın karalar üzerinde yer alan buzulların çok hızlı eriyip denizlere karışması yanında bu sürece ek olarak günümüzde atmosfere salınan insan kaynaklı sera gazlarının küresel ısınmayı tetikleyeceği, ortalama sıcaklıkları bir iki derece artırması durumunda ise deniz seviyelerini önümüzdeki 100 yıl gibi kısa bir süre içinde muhtemelen minimum 1 m yükseltebileceği görülecektir. Günümüzde de devam eden denizlerdeki su seviyelerinin yükselmesi, eski sahil şeritlerinin de sık sık yer değiştirmesine neden olmuştur. Bu sebeple, çoğu tarihî yerleşim yerlerinin sular altında kalmasının asıl nedeni, Akdeniz'de 12.000 yıl öncesinden günümüze kadar geçen süre içinde buzulların erimesiyle, deniz seviyesinin yaklaşık 120 m yükselmesinin bir sonucu olduğudur. Bu durum dikkate alındığında, insanlık tarihinin en eski medeniyet ve yerleşim yerlerinin, günümüzdeki deniz seviyesinin minimum -100 m ve -120 m gibi derinliklerinde, deniz tabanında ve deniz tabanı kumulları altında aranması gerektiği, arkeolojik araştırmalarda da dikkate alınmalıdır. Örnek olarak bugün Akdeniz Antalya sahillerinde kilometrelerce uzunlukta yer alan ve Antalya falezlerini oluşturan Antalya Travertenleri'nin (tufa), Akdeniz kıyı çizgisinden birkaç km kadar denizin içine doğru devam ettiği ve tüm kalınlıkları 300 m'ye ulaşan travertenlerin günümüzdeki kara haricinde deniz dibi içinde kalan kesimlerinin kalınlıklarının da ortalama 100 m civarında olması Türkiye Akdeniz sahil şeridinin, bölgenin yükselen deniz seviyesi ile sular altında kaldığını göstermektedir. Zira "travertenler karasal oluşumlardır ve deniz içinde oluşmazlar". Travertenler, karasal ortamda bol karbonatlı suların genellikle kırık hatları boyunca veya kaynaklardan yüzeye çıkarak karbondioksitin (CO_2) uçmasıyla karbonat tortularının karasal düzlük ve yamaç ortamlarında üst üste yığılmasıyla oluşurlar. Bu kayalar, deniz seviyesinin yükselmesi sonucu deniz altında kaldıklarında, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) bileşiminden oluşmaları ve denizin tuz oranının yüksek olması nedeniyle onlarca sene içinde yavaş yavaş erimeye başlarlar. Dolayısı ile deniz seviyesinin yükselmesi ile sular bugünkü Antalya sahil şeridini oluşturan falezlerin denize uzanan kesimleri, deniz tarafından sürekli şekilde eritilmektedir. Akdeniz'in traverten kayaları ile birleştiği sahil şeridinde, eritme işleminin devam etmesi ile falezin su ile irtibatta bulunduğu taban kesimleri boyunca mağaramsı erime boşluklarının günümüzde de oluşumlarını büyüyerek sürdürdükleri görülmektedir.

Burada dikkate değer önemli diğer bir husus ise Türkiye Akdeniz sahil şeridinin karbonatça zengin kayaçlardan oluşması, aşırı tuzlu su nedeniyle hızla eriyerek Akdeniz'e karışan ve deniz suyunda artan karbonat yoğunluğuna bağlı olarak gelen ışınların Akdeniz'e özgü parlak ve canlı

renkleri barındıran “Akdeniz Mavisi” ve “Turkuaz” gibi renklerin oluşmasını sağlayan başlıca etkeni oluşturmaktadır.

Sonuç olarak günümüzde deniz altında kalan tarihî batık kentlerin, sular altında kalmasının nedeninin, deniz seviyesinin son 12.000 yılda ortalama 120 m yükselmesinin bir sonucu olduğu söylenebilir. Bu gerçek kabul edildiğinde binlerce yıldır çeşitli medeniyetleri barındıran Karadeniz, Ege ve Akdeniz gibi sahil şeritlerinde yapılan arkeolojik çalışmalarda, günümüzden 12.000 yıl ve öncesine ait eski yerleşim alanlarının, deniz derinliğinin bugünkü deniz seviyesinden yaklaşık -120 m derinde yer alan eski deniz seviyesini oluşturan sahil şeritlerinde, güncel deniz dibi kumullarının içinde aranmasının gerektiği anlaşılmaktadır.

Antalya örneği ele alındığında da benzer şekilde denizin derinliklerinde en eski medeniyetlerin, günümüz sahiline doğru yükseldikçe, daha genç medeniyet izlerinin bulunacağı açıktır. Günümüz Antalya’da deniz seviyesi ile 120 m deniz derinliği arasında yer alan traverten kayalarının deniz içinde ve dibinde oluşturduğu yamaçlarda ise tarihî yaşam ve yerleşim izlerinin deniz seviyesinin yükselmesinden önce oluşmuş, mağara olarak bilinen eski karstik erime boşluklarının içinde aranması gerektiği arkeolojik çalışmalarda dikkate alınmalıdır. Ayrıca arkeolojik bulgu ve kayıtların anlaşılması, değerlendirilmesi ve yorumlanması, jeoloji, jeofizik ve geotekniğin, tüm disiplinlerinin birlikte çalışmasını gerektiren jeoarkeoloji biliminin, kavram metot ve birikimlerinin katkısıyla mümkün olabilmektedir (Yıldırım, 2011) .

7.5.2. Dünya Deniz Seviyelerinin Yükselmesine İstanbul, Marmaray Yenikapı Metro İstasyonu Örneği:

İstanbul’da Asya ile Avrupa’yı denizin altından raylı bir sistemle bağlayan Marmaray metro kazılarından, Marmara Denizi kuzey sahil şeridinde kara kısmında yer alan Yenikapı metro istasyonu için, 58 dönümlük bir alanda yapılan kazılarda 2008 yılında eski *Lykos* (Bayrampaşa) Deresi’nin Marmara Denizi’ne birleştiği alanda 4. Yüzyıla ait 1.600 yıllık Roma dönemine ait eski bir batık liman kalıntısına (*Theodosius* Limanı) rastlanılmıştır (Şekil 7.5.2.A). Bu batık limanda, o dönemdeki deniz seviyesinin tabanında yaklaşık 30’un üstünde batık tekne kalıntısı gün ışığına çıkarılmıştır. Kazıda 1.000 yıl ilâ 1.500 yıl öncesi arasına ait bulunan insan yaşamına ait çok farklı dönemlerde batmış tarihî kalıntı ve batıkların ekserisi (büyük bir kısmı) kazılar sonucu ulaşılan bugünkü deniz seviyesinden yaklaşık birkaç metre altında kumlu killerin içinde bulunmaktadır (Şekil 7.5.2.B). Şekil 7.5.2.C’de, fotoğrafın sağ ilerisinde naylon çadır ile muhafazaya alınmış gün yüzüne çıkarılmış bir batık yer almaktadır. Şekil “7.5.2.D” ve “7.5.2.E”de ise çoğu batığın üzerinde oturdukları o dönemin deniz tabanı ile aynı seviyede siltli killi bir çamur katmanı içinde yer alan ve kaos ortamını gösteren bol ve parçalanmış tarihî kalıntıların da (40 cm - 50 cm kalınlığındaki çamurlu tabaka düzeyi), 1.000 yılı aşkın bir süre öncesinde bu bölgede bir “**tsunami**”nin oluştuğunu göstermektedir.



7.5.2.A) İstanbul Marmaray Yenikapı Metro İstasyonu kazı alanı (kuzey yöne bakış). Zemin yüzeyinden toplam 17 m derinliğe ulaşacak olan kazıda, mevcut kazı derinliği 27.06.2008 tarihi itibarı ile 11 m'dir (27.06.2008).



7.5.2.B) Yenikapı Metro İstasyonu kazısında bulunan savaş gemisi kalıntısı. Zemin yüzeyindeki değişik tarihi dönemlere ait tüm yapay dolgu toprak alındıktan sonra bugünkü deniz seviyesinden birkaç metre daha derinde eski tabiî sahil şeridi tabanını oluşturan kum/kumlu kil içinde gömülü olarak rastlanılan batık gemi. Bu gemi, yaklaşık 20 m'yi aşan uzunlukta '**Çektiri'** adı verilen kürekli, yelkenli savaş gemisidir. Bir üstteki resimde görüldüğü üzere gemi, yaklaşık 1.000 yılı aşkın süre önce muhtemelen tsunaminin oluşturduğu kaos ortamında batmış olmalıdır (27.06.2008).



7.5.2.C) Yenikapı Metro İstasyonu kazısında tsunami sonucu oluşmuş ve çok miktarda tarihi kalıntıları içeren çamur tabakası. Kazı alanında 4. yüzyıla ait 1.600 yıllık, batık 1.*Theodosius* Limanı. Fotoğrafın sağ ilerisinde naylon çadır ile muhafazaya alınmış batık. Aynı seviyede yer alan diğer bazı batıklar ile bu seviyelerde gözlenen kaos ortamı ürünü bol miktarda parçalanmış tarihî kalıntıları içeren, 40 cm – 50 cm kalınlığındaki tsunami nedeniyle oluşmuş çamurlu tabaka (29.04.2008).



7.5.2.D) Yenikapı Metro İstasyonu kazısı şevinde tarihi kalıntı düzeyi (çamurlu tabaka) : Şekil C'deki tsunami sonucu kaos ortamında oluşmuş tarihî kalıntılardan oluşan düzeyin görünüşü (27.06.2008).



7.5.2.E) Yenikapı Metro İstasyonu kazısında, C ve D'de yer alan fotoğraflarda, tsunaminin neden olduğu tarihî kalıntılardan oluşan çamurlu düzeyin yakından görünüşü (foto: Yıldırım, M.; 27.06.2008).

Bugünkü deniz seviyesinin 6,3 m altından itibaren, eski alüvyal kalın siyah organik içerikli kil (çamur) tabakaları içinde 2011 yılı başlarında bulunan ve insanlık tarihinde, ilk yerleşik toplumların kurulması ile başlayan dönem olarak adlandırılan Neolitik çağa ait, günümüzden 8.500 - 9.000 yıl öncesine uzanan insan yaşamına ve mezarlarına ait buluntular, İstanbul'un tespit edilen en eski yerleşim tarihini belirlemekte ve bu tarihten daha öncesi dönemde henüz Marmara Denizi'nin daha sığ ve bir göl hâlinde bulunduğu, bugünkü sahil şeridinin insanların yaşadığı karasal alanlar olduğunu belirtmektedir. Marmara Denizi sahilinde günümüz sahil çizgisinden 6,3 m aşağıda yer alan eski deniz seviyesi ise günümüze dek, deniz yükseliminin muhtemelen yaklaşık 6.000 yıllık bir zamanda içinde gelişmiş olabileceğini göstermelidir.

Yenikapı Metro İstasyon kazısında -6 m kotu düzlüğünde deniz seviyesi yükseliminden önce yapılmış ve ortama ait olmayan taşınarak buraya getirilmiş eski Paleozoik yaşlı, yassı karbonat ve karbonatlı grovak kayaları ile düzenli döşenerek oluşturulmuş bir düz alan yer almaktadır (Şekil 7.5.2.F ve 7.5.2. G). Karbonatlı kayalar, deniz seviyesinin yükselmesi sonucu binlerce sene içinde yer yer eriyerek, yeni erime boşlukları oluşturmuştur. Düzlüğün altında koyu siyah renkli, eski alüvyona ait siyah organik içerikli kilden oluşan karasal ortamda bulunan antik mezar kalıntıları bu düzeylerin günümüzden 8.500 yıl ve daha öncesi tarihlerde yörenin sahil şeridi kıyısında kara ortamı olarak kalmış

olduğunu belirtmektedir (Şekil 7.5.2.H). Dolayısı ile bu tarihte dere ağzını oluşturan siyah çamurlu kara ortamı, denizin yükselimini devam ettirmesi sonucu, karasal ortam denizel ortama dönüşerek 6.000 yıl gibi bir süre içinde deniz seviyesi 6 m daha yükselmiştir.



7.5.2.F) Yaklaşık 9.000 yıl önce, insanlar tarafından o dönemde karasal olan zemin yüzeyi üzerine düzenli yerleştirilerek oluşturulmuş tarihî yüzey taş kaplaması (27.06.2008).



7.5.2.G) 7.5.2.F'de yer alan taşların yakından görünüşü. Yaklaşık 9.000 yıl öncesi insanı tarafından başka yörelerden getirilerek zemin yüzeyine düzgünce serilmiş taş kaplama. Fotoğrafta; Paleozoyik yaşlı mavimsi gri renkli karbonatlı kumtaşlarından oluşan yassı taş parçalarının üzerinde, yerleştirildikleri tarihten sonra deniz seviyesinin yükselip bu yöreyi istilası ile eski deniz suyunun, 6.000 yılda günümüze kadar taşlarda oluşturduğu belirgin ilâve erime boşlukları görülmekte (27.06.2008).



7.5.2.H) Yenikapı Metro İstasyonu kazısı, güneye Yenikapı Tren İstasyonu tarafına bakış. Ortama yabancı farklı yöreden getirilen karbonatlı grovak kayaları ile düzenli döşenmiş taş kaplama düzlük. Düzlüğün altında, koyu siyah renkli organik killerde (eski alüvyon) bulunan antik mezar kalıntıları, bu düzeylerin günümüzden minimum 8.500 yıl ve daha öncesi tarihleri belirtmektedir. Dolayısı ile bu tarihte siyah organik içerikli kil-çamur kara ortamı durumunda iken, denizin zamanla yükselimi ile üstünü deniz kaplamış (örn. G'de görülen ve üzerlerinde yer yer güncel fosil kavkılarının yapışık olarak gözlendiği erime boşluklu karbonatlı grovak taşları) ve 6.000 yıl gibi bir süre içinde de deniz seviyesi 6 m yükselmiştir. Fotoğrafta görülen koyu siyah renkli kil düzeyleri arasında Mart 2012 tarihinde, minimum 8.500 yıl öncesine ait insan ayağı izleri ile ağaç kökleri de tespit edilmiştir (17.07.2008).

7. Bölümün Özeti

Bir okyanus ile bağlantılı olan, büyük alanlar kaplayan, tuzlu su birikintilerine deniz adı verilir. Dünyadaki su kütlesinin en büyük miktarı okyanuslarda tutulmaktadır. Denizlerin veya okyanusların kıtalar ile olan sınırları kıyıları oluşturur. Denizlerde rüzgâr etkisi ile suyun üst tabakasında meydana gelen dinamik etkiler, su partiküllerinde dairesel bir hareket oluştururlar. Bu hareket derine doğru giderek azalır ve yok olur. Dalga tabanı olarak adlandırılan bu sınırın, kıyı alanlarında deniz tabanı ile temas etmesi sonucunda, dalga yavaşlayıp yükselerek kırılır. Dalganın kıyının şekillenmesinden etkilenerek yükselip kırılarak kıyıya ulaştığı bölgeye sörf bölgesi denir. Dalganın deniz tabanını etkilemeye başladığı hattan, karaya kadar olan bölgeye kıyı alanı, bunun açığındaki bölgeye ise açık deniz adı

verilir. Dalgaların kıyıya belirli bir açı ile yaklaşmaları ile kıyı boyu akıntıları oluşur. Bu akıntılar kıyıda yer alan ve çoğunlukla kum boyutlu malzemeden oluşan plâjın, kıyı boyunca hareket etmesine neden olur. Plâj; kum ve çakıllardan oluşan bir kıyı kesimidir. Kıyılara sediment sağlayan kaynaklardan en önemlisi karadan akarsularla sediment getirimidir. Bu sayede kıyıda deltalar ve bu deltalardan kıyı boyu akıntıları yoluyla aşındırılan malzeme ile plâjlar oluşturulur. Kıyıları ve plâjları, dalgalar yanında gel-git olarak adlandırılan su düzeylerinin dönemli yükselmeleri ve alçalmaları etkileyerek, plâjlar şekil değişikliklerine uğrarlar.

Kıyılara sediment girdisi sağlayan diğer önemli kaynak ise kıyıda dalgaların yaratmış olduğu erozyonal etkidir. Deniz kıyılarında tamamen dalga yönüne bağlı olarak aynı yönde sürüklenerek birikmiş kumul kırıntılardan oluşan plâj uzantısına kıyı oku adı verilir. Bir kıyı oku bir koyun önünü kapatırsa oluşturduğu göle, lagün, bir adayı veya adacığı karaya bağlamış ise bu özellikteki setlere tombolo denir. Kıyı alanlarını belirlemek için; kıyı, kıyı çizgisi, kıyı kenar çizgisi ve sahil şeridi gibi tanımlamalardan yararlanılmaktadır. Kıyı çizgisi ile kıyı kenar çizgisi arasındaki alana “kıyı”, kara ile denizi ayıran sınıra kıyı çizgisi, kıyı çizgisinden sonraki kara yönünde su hareketlerinin oluşturduğu kumluk, kayalık, sazlık, bataklık ya da benzeri alanların kara yönünde kalan doğal sınıra “kıyı kenar çizgisi” denir. Kıyı kenar çizgisinin denize bakan tarafında kalan kum-çakıldan oluşan kara bölümü kıyı olarak kabul edilir ve bu kıyıların yapılaşmaya kesinlikle izin verilmemesi gerekmektedir. Kıyı kenar çizgisinin diğer kara tarafında kalan ve yatay olarak en az 100 m genişliğindeki alan “sahil şeridi” olarak adlandırılır. Sahil şeridinin ilk 50 m’si yaya yolu ve gezinti alanını, sonraki 50 m’si ise sadece toplumun yararlanmasına açık olması gereken, yapı yaklaşma sınırını oluşturmaktadır.

Kıyı Kanunu’na göre, dar-yüksek kıyılarda, kıyı kenar çizgisi hemen hemen kıyı çizgisi ile çok yakınlaşmakta ve yapı yaklaşma mesafesi de, falez veya dik şevin son bulduğu en üst kottan itibaren, minimum 50 m uzaklıkta bir sahil şeridi oluşturulmasını ön görmektedir. Kıyılar insanlık tarihî boyunca son derece önemli yerleşim alanları olmuşlardır. Bu durum, günümüzde de devam etmekte olup kıyılardaki büyük çaplı kaçak yapılaşmayı da beraberinde getirmektedir. Ancak kıyı alanları yapılaşmaya değil, halka açık rekreasyon alanları olarak düzenlenmesi gerekmektedir.

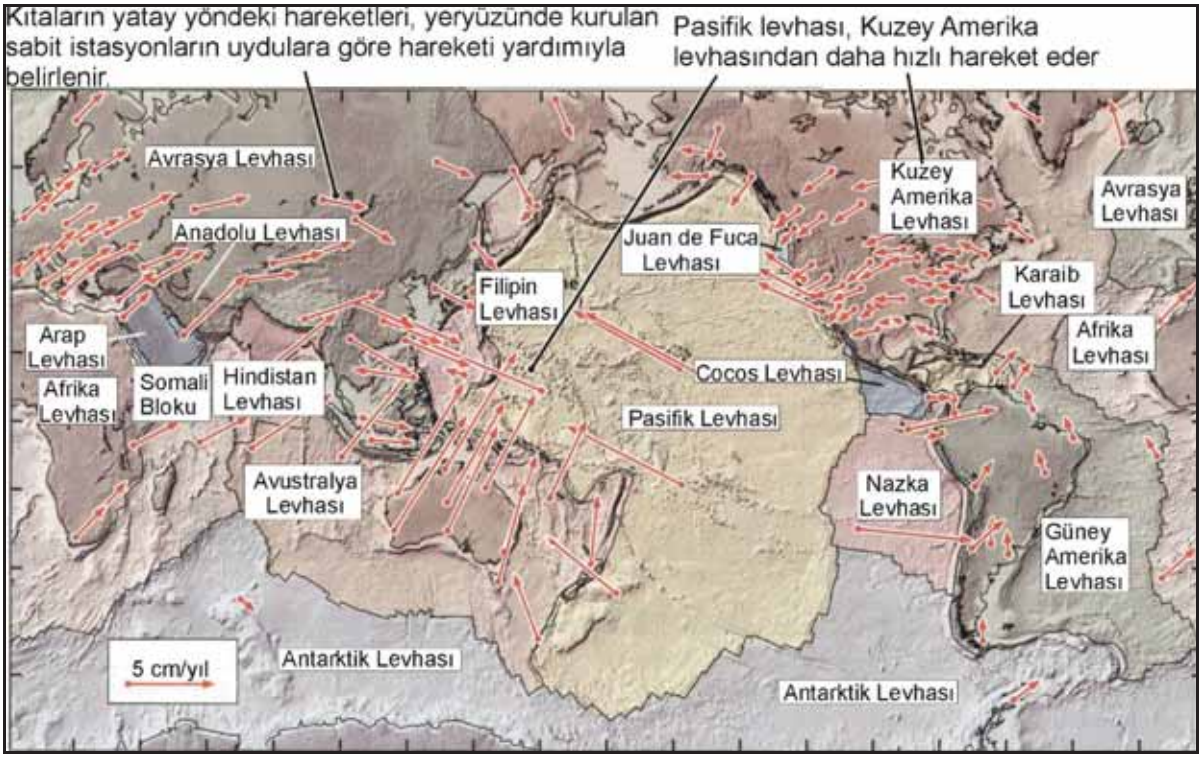
8. BÖLÜM: AKTİF TEKTONİK, DEPREMLER, SIVILAŞMA, TSUNAMİLER ve TÜRKİYE AKTİF FAYLARI

8.1. Giriş

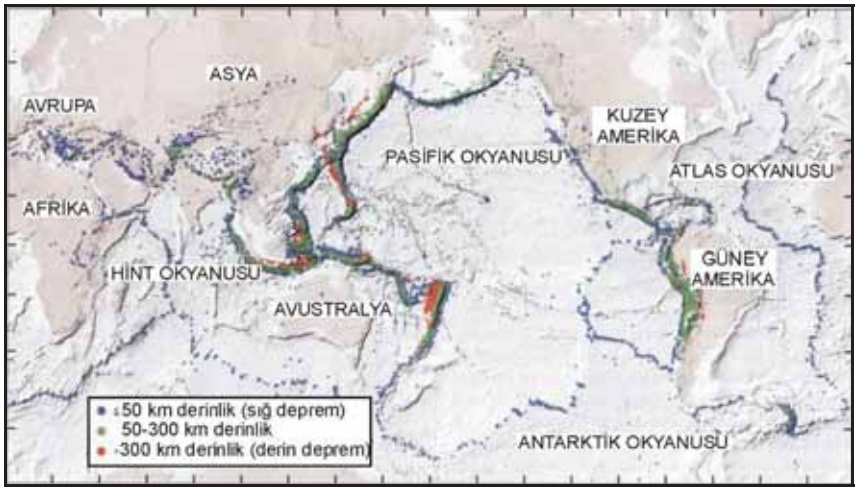
Tektonik olaylar, iklimsel süreçlerle birlikte, yeryüzünü etkileyen jeolojik olayların başlıca nedenini oluştururlar. Bu iki faktör, birbirinden bağımsız olarak yeryüzünü etkiledikleri gibi birbirlerini etkilemek suretiyle de yerkürenin sürekli olarak gelişmesini sağlamışlardır. Meselâ, tektoniğe bağlı olarak gelişen dağ kuşakları ve okyanus oluşumları, büyük okyanus akıntılarını ve atmosferik döngüleri etkilemekte ve uzun vadeli iklim değişikliklerine de neden olmaktadır. Buna karşı iklimsel etkenlerden kaynaklanan buzul dönemleri, küresel ölçekte deniz düzeyi değişimlerine neden olarak yeryüzündeki aşınım ve birikim dengesini ve dolayısıyla yeryüzü şekillenmesini (jeomorfoloji) değiştirmektedir. Bunun dışında, buzul dönemlerinde karaların üzerine biriken buzulların ağırlığı ile levhalarda astenosferin içerisine doğru batmalar meydana gelmektedir. Bu iki faktörün etkisi altındaki dinamik; yeryüzünü jeolojik zamanlar boyunca yenileyerek geliştirmiştir.

Bir bölgede, jeolojik dönemler boyunca süregelen tektonik rejimlerden, bölgeyi etkileyen en sonuncusuna neotektonik rejim adı verilir. Bu tanım zamansal bir ifâdeden çok, bir bölgede hâkim olan son tektonik dönemi işaret eder. Meselâ, yaklaşık 200 milyon yıldır sürekli olarak devam eden Atlantik Okyanusu'ndaki açılma nedeniyle bu okyanus ve çevresindeki kıtaların (Amerika Kıtası'nın doğu kıyıları ile Afrika-Avrupa Kıtası'nın batı kıyıları) neotektonik dönemleri 200 milyon yıl önce başlamıştır. Ancak bu rejim Anadolu'da, Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fayları boyunca, Anadolu'nun batıya doğru hareket etmesi ile başladığından dolayı yaklaşık olarak en aktif döneminin son 5 milyon yıldır hüküm sürdüğü çok daha kısa bir dönemi kapsar. Bu rejim

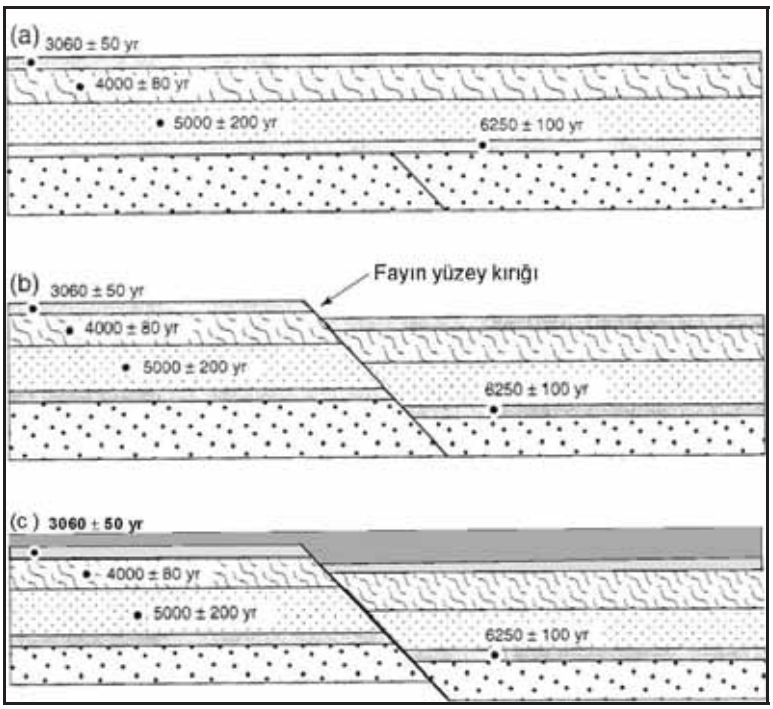
altındaki olaylara bağlı olarak oluşan levha hareketleri, levha sınırlarında günümüzde yer alan ana fayların gelişmesine neden olmuşlardır (Şekil 8.1). Günümüzde aktif ana fayları oluşturan bu zonlar, aynı zamanda yerkürede meydana gelen depremlerin çok önemli bir bölümünün de gerçekleştiği bölgelere karşılık gelir (Şekil 8.2). Neotektonik rejim öncesi bir bölgede hâkim olan daha eski ve etkisini yitirmiş olan tektonik rejimler paleotektonik rejimler olarak adlandırılır. Yapılan bu tanımlara göre aktif tektonik kavramı ile neotektonik tanımları genel olarak bir benzerlik gösteriyor olsalar da; neotektonik rejim içerisinde gelişmiş olan, ancak günümüzde aktivitesini kısmen veya tamamen yitirmiş olan yapılar “Aktif” olarak tanımlanmazlar. Jeolojik açıdan aktif tektonik tanımı, aletsel veya tarihsel dönemde bir deprem üretmiş olan veya bu dönemlere karşılık gelebilecek kadar genç bir aktivite gösterdiği belirlenen tektonik olaylar için kullanılır (Şekil 8.3). Bu anlamda aktif tektonik yapılar, büyüklüğü değişen düzeyde deprem üretme potansiyeline sahiptirler.



Şekil 8.1. Litosferi oluşturan levhalar ve levhaların hareket yönleri. Levhaların birbirlerine göre yapmış oldukları hareketler nedeniyle levha sınırlarında ana fay zonları gelişir (*Press* vd., 2004).



Şekil 8.2. Depremlerin kaynağı. Levha sınırlarındaki ana fayların hareketi yeryüzündeki depremlerin temel kaynağını oluşturur. Bu fayların hareketlerine göre sığ, orta ve derin odaklı depremler oluşur (*Press* vd., 2004).



Şekil 8.3. Aktif bir fayın, genç sedimentler içerisindeki gelişimi. a) Fay, şekilde verilen örnekte, günümüzden 6.250±100 ilâ 3.060±50 yıllar arasında çökelmiş olan istifi kesmemiş olduğundan dolayı, en son aktivitesini 6.250±100 yıldan önceki bir dönemde gerçekleştirmiş ve günümüz ile 3.060±50 yıl öncesi arası zamanda da hareket etmemiştir. b) İkinci aşamada normal fay aktivite kazanarak 3.060±50 yıla kadar olanlar da dâhil olmak üzere, tüm çökelleri kesmiştir. c) Fay, 3.060±50 yıllık dönem sonundan itibaren aktifliği sona ermiş, yeni çökelme döneminde pasif duruma geçmiş ve yeni çökel dizisi, henüz zemin yüzü erozyona uğramadan çökelmeye başlamıştır. Bir bölgedeki deprem oluşum periyotlarının aletsel ve tarihsel kayıtlar dışında fayların kestiği genç çökellerin yaşlandırılmasına dayalı olarak belirlenmesi çalışmaları da paleosismolojik araştırmalar bünyesinde gerçekleştirilmektedir (*Keller* ve *Pinter*, 2002'den değiştirilerek).

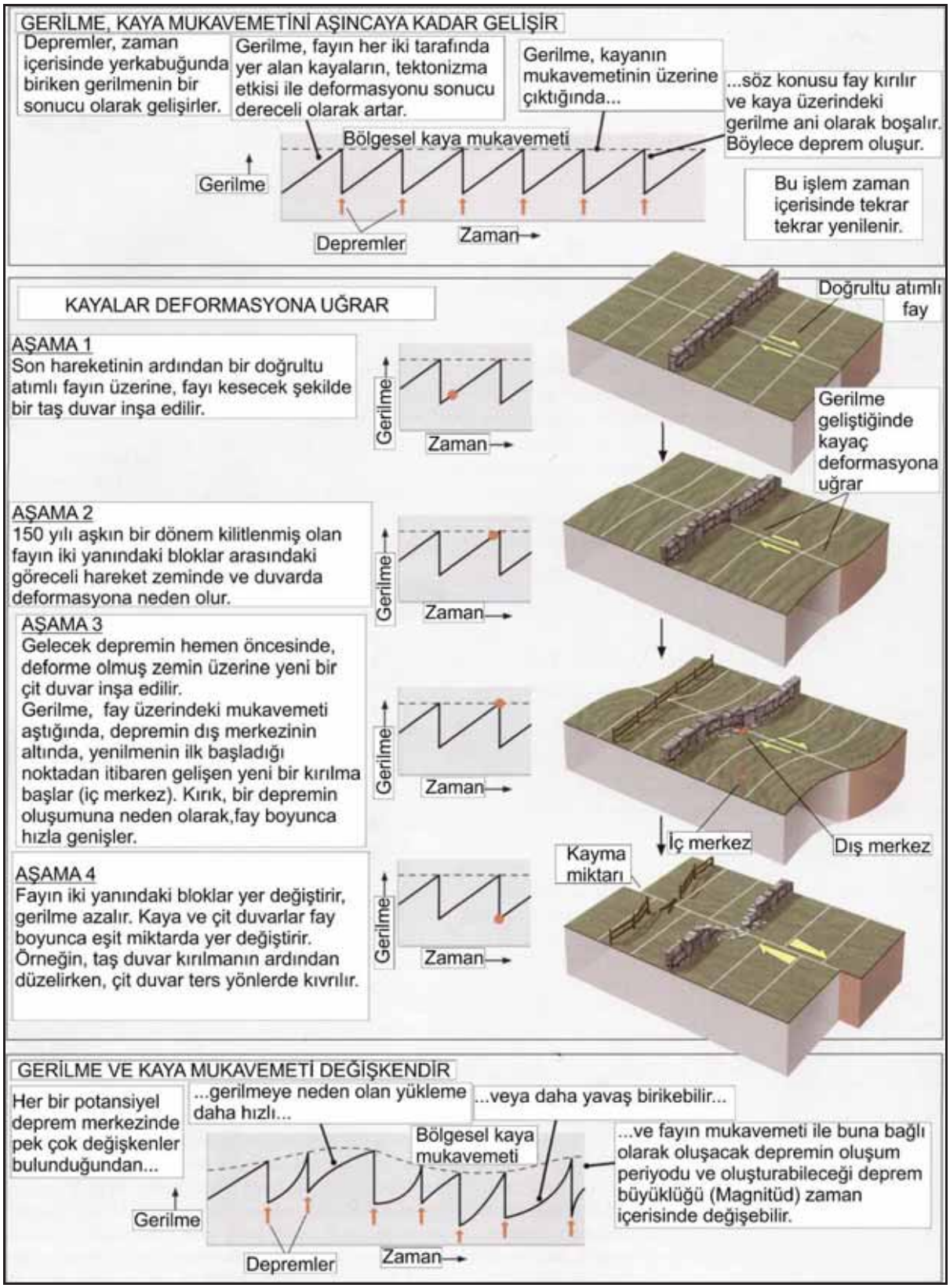
Depremleri en basit hâli ile yer sarsıntıları olarak tanımlamak mümkündür. Bu anlamda, yere çarpan herhangi bir malzeme, bu çarpmanın şiddeti ile orantılı olarak bir sarsıntı üretebilir. Ancak burada sözü edilen deprem tanımı belli bir jeolojik olaydan kaynaklanan yer sarsıntılarıdır. Hissedilebilir bir deprem oluşturabilecek önemli jeolojik olayların başında ise aktif fay hareketleri ve volkanik faaliyetler gelmektedir. Ancak aktif fayların yaratabilecekleri büyük deprem potansiyeli, diğer jeolojik faaliyetlere göre çok daha fazla olduğundan depremler genelde aktif tektonizma ile ilişkilendirilirler Özaydın vd., 2004; Ansal vd., 2004, 2007).

8.2. Kayaçlardaki Gerilme-Mukavemet İlişkisi ve Deprem Oluşumu

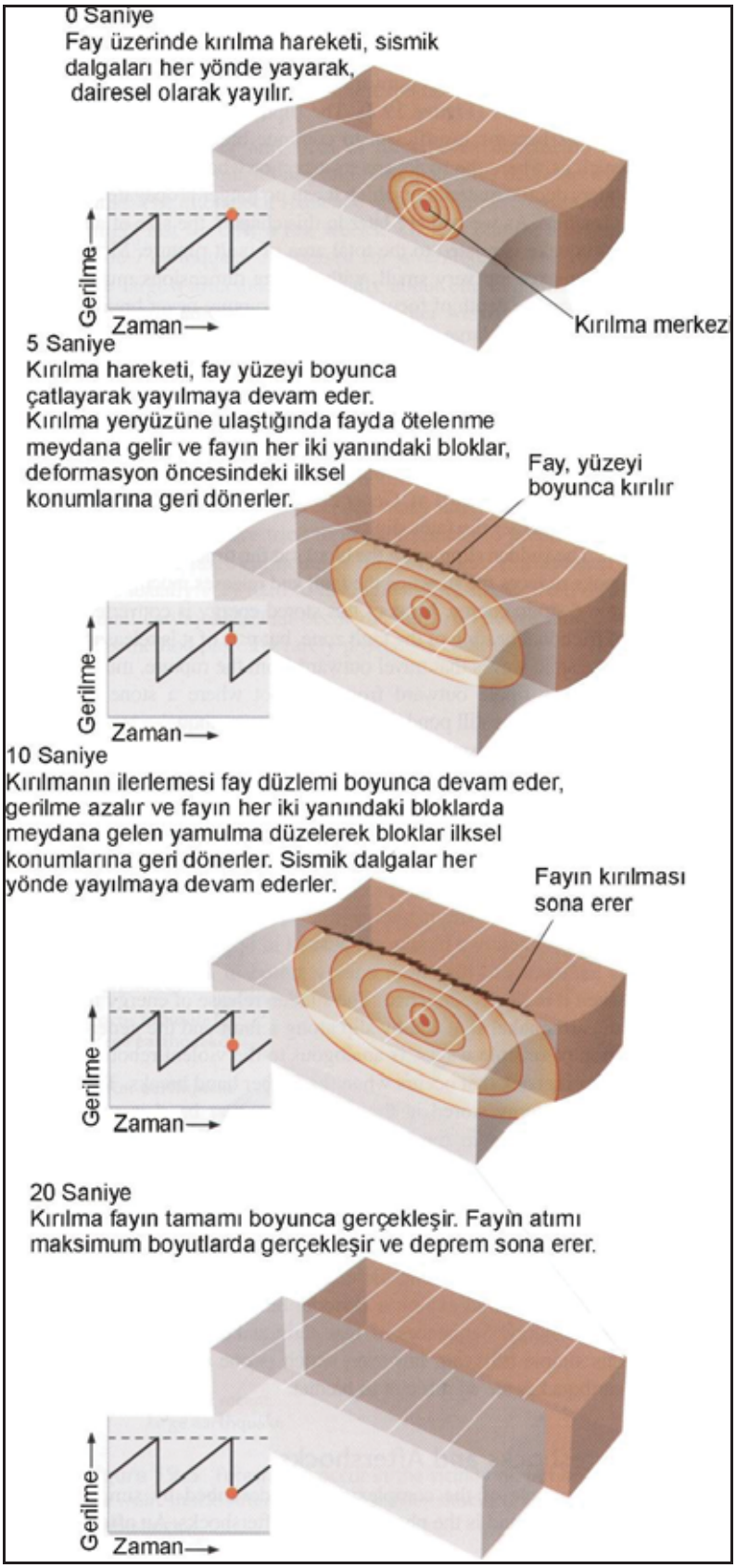
Tektonik olayların etkisi altında sınırları boyunca birbirlerine göre hareket eden levhalar, birbirlerine yaklaşır, uzaklaşır veya birbirlerine göre yanal yönde hareket ederler (transform levha sınırları). Sınırlarında meydana gelen bu hareketler sırasında levhalar üzerinde gerilme oluşur. Kırılgan bir yapıya sahip olan levha, ilk aşamada bu gerilme karşısında elâstik deformasyona uğrar. Deformasyon altında şekil değiştiren kayaçlar, gerilmelerin kayacın mukavemetini aştığı noktada kayacın en zayıf yüzeyi boyunca kırılırlar. Bu kırılmanın oluşturduğu fay, kayaç içerisinde ilk kez meydana gelebileceği gibi söz konusu hareket daha önce oluşmuş olan faylar üzerinde de meydana gelebilir. Eğer bir kayada aktif bir fay varsa, bu fay gerilmeye karşı düşük mukavemete sahip olduğundan yeni kırılmalar, daha çok söz konusu fay üzerinde gerçekleşecektir. Böylece tektonik rejim değişmediği sürece var olan aktif faylar deprem yaratma potansiyeline sahip olmaya devam ederler. Fay düzlemi boyunca, eğer bir kilitlenme meydana gelmezse, hareket eden bloklar fay boyunca bu hareketlerini devam ettirirler ve fay yavaş fakat devamlı bir biçimde ötelenir. Buna akma adı da verilir. Ancak fay yüzeyi boyunca kaymayı engelleyici yönde bir kilitlenmenin oluşması ile fayın akma hareketi durur ve kaya üzerindeki hareketi sağlayan gerilme, fay yüzeyindeki mukavemeti yenebileceği değere ulaşana kadar birikmeye başlar. Kırılma sonucu, kayacın deformasyona uğrayarak şekil değiştiren bölümleri, kırılma yüzeyi boyunca büyük bir hızla eski konumlarına geri döner ve kırılma yüzeyi boyunca kayacın toplam yer değiştirme miktarı

kadar bir ötelenme (atım) meydana gelir (Şekil 8.4 ve 8.5). Söz konusu kırılma ve hareket sonucu kayaç üzerinde biriken gerilme anîden boşalır. Ortaya çıkan enerjinin önemli bir bölümü sismik dalgalar hâlinde kayaç içerisinde yayılmaya başlar. Yeryüzünde bu şekilde oluşan yer sarsıntılarına veya sismik dalgaların oluşturdukları titreşimlere **deprem** (yer sarsıntısı, zelzele; *earthquakes*) adı verilir. Depremin başlangıç noktasına **hiposantr** (alt merkez, odak/fokus, *hypocenter, focus*); alt merkezin yeryüzündeki izdüşümü karşılığına ise **episantr** (üst merkez, merkez üssü, dış merkez, *epicenter*) denir. Deprem odağı, matematik anlamda bir nokta değil, belirli bir alandır (Şekil 8.6). Bu tanımlama ışığında depremi, kayacın mukavemeti ile üzerinde biriken gerilme arasındaki dengenin gerilme yönünde bozulması sonucu meydana gelen bir enerji boşalması olarak basitçe tanımlamak da mümkündür. Ancak bu iki kuvvet arasındaki denge, yeryüzü heterojen ve anizotrop olduğundan çok değişkendir ve pek çok faktör tarafından etkilenir. Bu nedenle, günümüz bilgi birikimi teknolojik olanakları içerisinde depremin ne zaman gerçekleşebileceğinin belirlenmesi henüz mümkün değildir. Bununla birlikte volkanik aktiviteler sırasında oluşan orta-küçük depremler hariç tutulacak olursa dünyada oluşan depremlerin ana kaynağı aktif faylanmalardır. Bu açıdan ne zaman olacağı bilinmese de, depremlerin aktif faylar üzerinde olacağı ve bu fayların çevresinde yer alan yapıları etkileyeceği muhakkaktır.

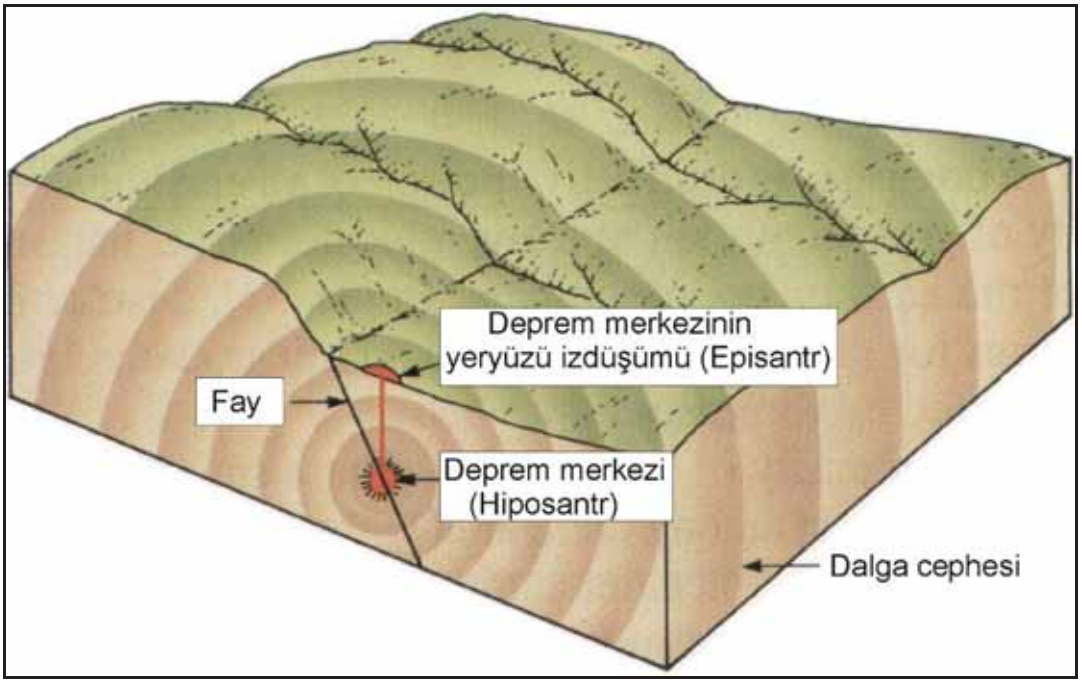
Bir bölgede yer alan herhangi bir fay son onbin yıl (10.000 yıl) içinde hareket etmiş ise **aktif fay**, etmemiş ise **pasif** (ölü) **fay** adını alır ve bu zaman dilimi normal bir mühendislik projesi için yeterli, ancak nükleer santral gibi çok önemli projelerde ise bu zaman standardı daha yüksek alınabilir. Aktif fay içeren bölgelerde yer alan yapıların depremden etkilenmesi ise fayın deprem sırasında hareket eden bölümünün uzunluğu, yapıların faya olan uzaklıkları ve üzerlerinde bulundukları zeminin şartları ile yapıların depreme olan dayanıklılıkları gibi faktörlere göre değişir. Fay boyunca kırılma hareketi, gerilmede yenilmenin meydana geldiği noktadan çevreye doğru fay yüzeyi boyunca yayılır. Kaya mukavemetinin yenildiği ve kırılmanın ilk olarak başladığı nokta aynı zamanda yayılan deprem dalgalarının da merkezini (deprem merkezi, hiposantr) oluşturur (Şekil 8.6). Kırılma hareketi yüzeye ulaştığında, fayın yüzeydeki kırığını oluşturur. Buna, **fayın yüzey kırığı** *(surface rupture of the fault zone)* adı verilir.



Şekil 8.4. Kayaçların üzerlerinde biriken gerilmeye bağlı olarak deformasyona uğramaları ve deprem oluşumu (*Press* vd., 2004'den değiştirilerek).



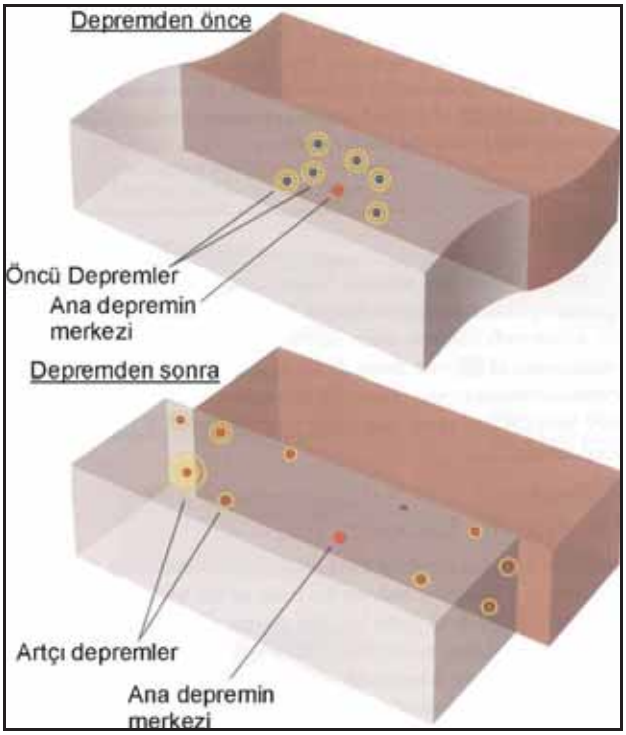
Şekil 8.5. Deprem oluşum mekanizması ve depremin oluşumunu izleyen dönemde sismik dalgaların, depremin merkezinden dışa doğru yayılması (*Press* vd., 2004).



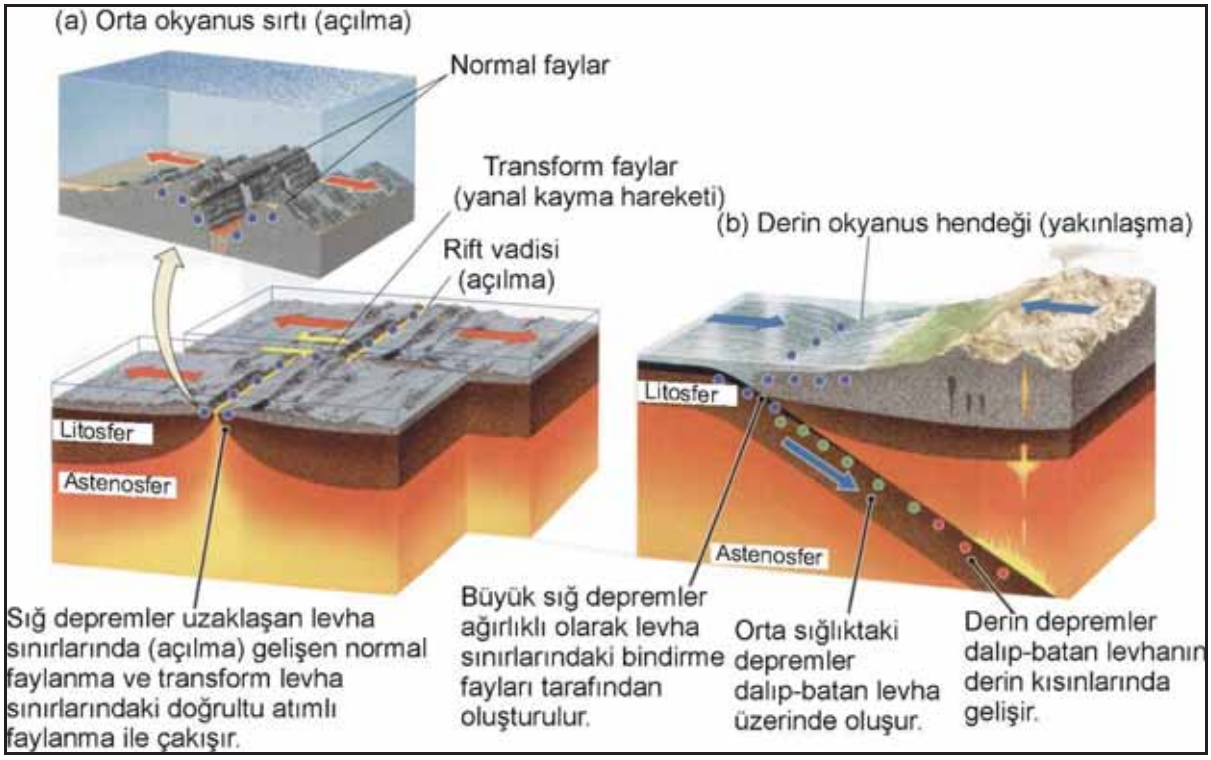
Şekil 8.6. Depremde sismik dalga yayılımı ve depremin Hiposantrı ile Episantrı (*Hamblin* ve *Christiansen*, 2004).

Yüzey kırığı; bir fay boyunca oluşan sürekli deformasyondur. Bazı depremlerde kırığın yayılımı, kırılan kesimin uzunluğuna bağlı olarak yüzeye kadar ulaşmayabilir. Bu durumda yüzey kırığı oluşmaz. Büyüklüğü 6.0 ve daha yukarı olan depremlerde ise bu deformasyon yüzeye kadar ulaşır ve yüzey kırıkları oluşmaya başlar. Kırılma sonucu açığa çıkan dalgalar da dalganın kayalar içerisindeki hızına bağlı olarak ve küresel olarak yayılırlar. Genelde deprem oluşumu öncesinde, oluşacak depremin yakın çevresinde bir grup daha küçük deprem meydana gelir. Bunlara **öncü depremler** adı verilir. Ancak her deprem öncesinde öncü deprem gerçekleşmesi gerekmez. Bu nedenle, bir bölgede meydana gelen her küçük veya orta ölçekli depremi, öncü deprem olarak yorumlamak doğru olmaz. Depremin sonrası kırılan fay zonunda ve fayın her iki kesiminde aylarca sürebilen ve ufak çapta kırılmalar ile sonuçlanan depremlere **artçı depremler** adı verilir (Şekil 8.7).

Levha sınırlarında oluşan depremler, oluştukları derinliklere göre, sığ odaklı depremler, orta sığ odaklı depremler ve derin odaklı depremler olarak sınıflandırılırlar (Şekil 8.8).



Şekil 8.7. Bir ana deprem öncesi ve sonrasında gelişen öncü ve artçı depremlerin, deprem sırasında kırılan fay yüzeyi üzerindeki dağılımları (*Press* vd., 2004).



Şekil 8.8. Depremlerin oluşum derinlikleri ve farklı derinliklerde depremin oluşmasına neden olan tektonik mekanizma (*Press* vd., 2004).

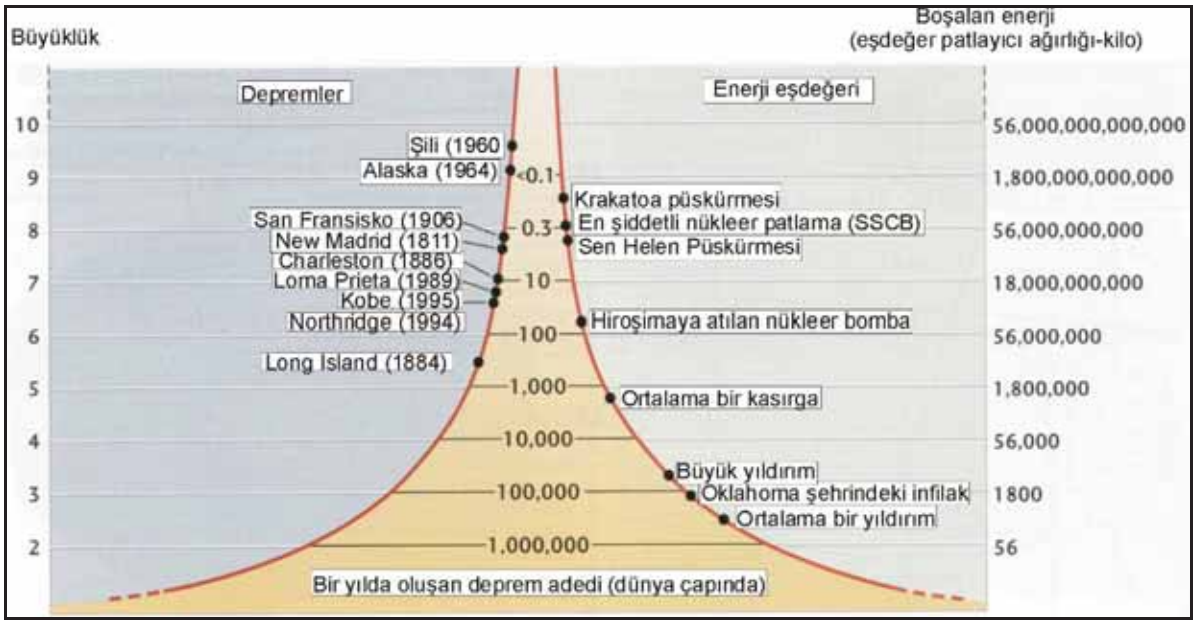
Depremlerin çoğunluğunun odakları, 10 km ilâ 30 km arasındaki derinliklerdedir. Bunlardan, odak derinliği 60 km'ye kadar olan depremlere ***sığ odaklı depremler****;* 60 km ilâ 300 km arasında olanlara ***orta sığ odaklı depremler***; odak derinliği 300 km ilâ 700 km arasında olanlara da ***derin odaklı depremler*** denir.

Okyanus orta sırtlarında ve bu sırtlarda gelişen transform faylarda genelde sığ odaklı depremler gelişir (Şekil 8.8.a). Kıtalarda ise deprem hiposantr derinliği nadiren 20 km'nin altına iner (*Press* vd., 2004). Bunun nedeni, depremin oluşabilmesi için kırılgan kabuğa ihtiyaç duyulmasıdır (örn. Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fayları).

Litosferin derinliklerinde artan ısı ve basınç etkisi yüzünden kabuk malzemesi kırılganlığını kaybeder ve bu derinliklerde kırılma ve dolayısıyla deprem oluşumu yerine plâstik bir akış meydana gelir. Bununla birlikte yakınlaşan kıta kenarlarındaki dalma-batma zonlarında okyanusal levha kabuğunun yoğunluğunun kıtasal kabuğa nazaran daha fazla olması nedeniyle kıtasal kabuğun altına dalarak manto içerisinde ilerler. Kıta altına dalarak oldukça hızlı ilerleyen soğuk okyanusal kabuk, bu hızlı ilerlemeden dolayı derinlerde hemen eriyemediği için kırılgan yapısını korur. Bu durumda, söz konusu alta dalan levha üzerinde yer alan sıkışan kıta (örn. Türkiye güneyi, Toros Dağları), alta dalan levha parçasında hâlen devam eden dalma-batma hareketleri nedeniyle kıta parçasında derin odaklı depremlere neden olurlar. Söz konusu şartlar altında, gerçekleşmiş ve odak derinliği nadir de olsa 690 km'ye kadar ulaşabilen depremler kaydedilmiştir ve bu tür depremler derin odaklı depremleri oluştururlar (Şekil 8.8.b). Derin odaklı depremler sadece dalma-batma zonlarında görülürler.

Dünyada her yıl değişik odak derinliklerinde ve değişik büyüklükte pek çok deprem olmaktadır. Bu istatistiksel yaklaşıma göre, hissedilebilir niteliğe sahip M= 4 büyüklüğündeki bir depremden dünyada her yıl 10.000 adet deprem meydana gelirken, 17 Ağustos 1999 yılında İzmit Körfezi içerisinde meydana gelen moment magnitüdü büyüklüğü M_W= 7.4 olan (süre: 45 sn) depremlerden her yıl yaklaşık olarak 10 adet meydana gelmektedir. Aynı istatistiksel sonuçlar, *Sumatra*'da 2004 yılı sonunda meydana gelen 9

büyüklüğündeki bir depremin ise yaklaşık 10 yılda bir meydana geldiğini işaret etmektedir (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Yeryüzünde 1 yılda meydana gelen deprem sayısı ve büyüklüğü ile bu depremleri, aynı enerjiyi üretebilecek diğer doğal-yapay olaylarla kıyaslanması (*IRIS Consortium*; www.iris.edu).

8.2.1. Büyüklük (magnitüd) ve şiddet kavramları

Deprem büyüklüğü (magnitüd), yer kabuğunun veya levhalarının bir deprem anında boşalan enerji düzeyinin, sismik aletler tarafından ölçülen değeridir. Diğer bir ifâde ile **magnitüd** *(magnitude)*; yer hareketinin **sismograf** (depremin büyüklüğünü ölçen alet, *seismograph*) ve akselograf'lar ile (deprem esnasında deprem dalgalarının yarattığı ivmeyi ölçen alet, *accelerograph*) alınan kayıtlara ve saha araştırması denilen, faylanma yapısının ve kırık uzunluklarının yerinde incelenmesi sonucu tanımlanan, deprem hareketinin mesûl (=sorumlu) olduğu yerdeki dalga hareketlerinin sayısal ifâdesidir. Bu yöntem ilk olarak ABD'li sismolog *Charles Richter* (1900-1985) tarafından 1935'de kullanıldığı için, bu ölçeğe ***Richter* Ölçeği** denmiştir. *Richter* ölçeği logaritmik bir değerdir. Bu depremi büyüklüğündeki 1 birimlik artışın sismogram genliğinin 10 kat, deprem sırasında açığa çıkan enerji miktarının ise 30 kat artması anlamına gelir. Yani; 7 büyüklüğündeki bir deprem, 5 büyüklüğündeki depremden 900 kat daha güçlüdür. Genellikle büyüklüğü 3'ten küçük (fay atım miktarı birkaç cm) depremler insanlar tarafından hissedilmez.

Deprem şiddeti; yer hareketinin yeryüzünün belirli bir noktasında binalar üzerindeki yıkıcı ve insanlar üzerindeki panik, korku, kaçma gibi yaptığı etkinin derecesi ile belirlenir. Diğer bir ifâde ile şiddet; ölçeği aletsel olmayan dönemde depremin ölçüsünü belirleme amacı ile depremin canlılar, yapılar ve toprak üzerindeki etkilerinin sınıflandırılması sonucunda çıkmıştır. Şiddet, etkilenen bölgede bir yerden diğerine uzaklığa ve ana kaya *(bedrock)* çeşidine göre değişir. En çok kullanılanı *Mercalli* Şiddet Skalası'dır.

Bu duruma göre depremin büyüklüğü ve şiddeti farklı kavramlardır. Depremlerde büyüklük kavramı, depremin çıkardığı enerjidir ve *Richter* ölçeği depremin büyüklüğünü ortaya koyar. **Şiddet** ise deprem büyüklüğünün doğurduğu bir sonuçtur ve *Mercalli* ölçeği doğrudan depremin şiddetini verir (Karaman ve Kibici, 2008). Deprem şiddeti, depremin büyüklüğü ile ilgili olduğu kadar, o bölgedeki inşaat kalitesi ile de doğrudan ilişkili bir kavramdır. Her ülkedeki bina kalitesi o ülkenin ekonomik koşullarına göre biçimlendiğinden, meselâ Türkiye'de orta kalite sayılabilecek bir bina, Japonya'da düşük kalite sayılabilir. Bu nedenle, Türkiye'de 7 *Richter* büyüklüğünde bir deprem, *Mercalli Şiddet Cetveli'nde* yaklaşık Imax= X olarak kestirilebilir. Tarihsel bir değer taşıyan ve Romen rakamları ile belirlenen 12 düzeyden (derece) oluşan Değiştirilmiş *Mercalli* şiddet ölçeği, hiçbir matematiksel temeli olmayıp, bütünü ile insanların gözlemlerini esas alarak belirlenmektedir.

Değiştirilmiş *Mercalli* Ölçeği (*modified Mercalli intensity scale*) hissedilemeyecek kadar az olandan felâket şeklindeki yıkıma doğru artan 12 seviyeli deprem şiddet grupları, özellikleri, etkileri ve parantez içinde de yaklaşık *Richter* magnitüdü (deprem büyüklüğü) karşılıkları aşağıda özetlenmiştir. Ancak burada hatırlatılması gereken husus, depremin odak derinliği ne kadar zemin yüzeyine yakınsa şiddeti de o derece artacağı bilinmelidir:

I. *derece:* İnsanlar tarafından hissedilmez, yalnız sismograflar tarafından kaydedilen mikrosismik sarsıntılardır. Çok elverişli şartlar altında bulunan birkaç kişi hissedebilir.

II. *derece:* Çok hafif depremler olup, ancak dinlenmekte olan ve bir binanın üst katlarında bulunan kimseler tarafından hissedilebilen en küçük depremdir (*yaklaşık Richter Ölçeği/Richter magnitüdü*: <2).

III. *derece:* Hafif depremlerdir. Ev içinde ve özellikle üst katlardaki şahıslarca hissedilir. Park etmiş araçlar sallanabilir. Sarsıntılar,

yakından geçen bir kamyon hissi verir. Deprem süresi tahmin edilebilir (yaklaşık *Richter magnitüdü*: <2,9).

IV. *derece:* Az şiddette depremlerdir. Bina içindeki pek çok kişi ve dışarıda bulunan az sayıda insan tarafından hissedilir. Bazı kimseleri gece uykudan uyandırır, mutfak eşyası, pencereler ve kapılar sarsılır, duvarlardan çatlama sesi çıkar, duran araçlar görünür bir şekilde sallanırlar (*yaklaşık Richter magnitüdü*: <3,9).

V. *derece:* Hemen hemen herkes tarafından hissedilir. Uykudakilerin pek çoğu uyanır, bazı tabak ve pencereler kırılabilir, sıvalar çatlar, desteksiz nesneler dengesini kaybeder, ağaçların ve direklerin sallandıkları görülür, sarkaçlı saatler durabilir (*yaklaşık Richter magnitüdü*: 4,6).

VI. *derece:* Herkes tarafından hissedilir ve birçok kimse korkarak dışarı kaçar. Ağır ev eşyaları yerlerinden oynar. Bu derecede, standart dışı yapılmış binalarda çatlaklar oluşur, birçok hâllerde sıvalar düşer, genellikle hafif hasar oluşur (*yaklaşık Richter magnitüdü*: 5,2).

VII. *derece:* Herkes dışarı fırlar, otomobil kullananlar tarafından fark edilir, bazı bacalar devrilir. İyi yapılmış binalarda (iyi işçilik, harç ve tasarım; demir, beton vb. malzeme ile donatılı olarak inşa edilmiş, yatay kuvvetlere dayanıklı sağlam yapı) hasar olmaz. Orta derecede yapılarda (yatay kuvvetlere dayanıklı tasarlanmamış) hasar çok az, kötü inşa edilmiş binalarda [kerpiç (adobe), taş gibi zayıf malzeme, kötü harç, standart dışı işçilik ve yatay kuvvetlere karşı zayıf] orta hasar oluşabilir. Havuzda dalgalanma, su birikintilerinde küçük kaymalar ve çukurlar oluşur (*yaklaşık Richter magnitüdü*: 5,7).

VIII. *derece:* Özel olarak dizayn edilmiş iyi yapılmış yapılarda hasar yok, orta kaliteli binalarda az hasar, kötü inşa edilmiş binalarda orta hasarlar oluşabilir. Bacalar, sütunlar, anıtlar ve duvarlar yıkılabilir. Otomobil kullananlar rahatsız olurlar. Kuyularda yeraltı su seviyesinde değişimler ve sıvılaşma ile zemin yüzeyine az miktarda kum fışkırmaları ile çamur akmaları görülebilir. Sıvılaşma ile zemin taşıma gücünü tamamen kaybedip üzerindeki yapılar zemin içerisine doğru batabilir, yan yatabilir veya devrilebilir, gevşek kayalar düşebilir, çatlaklar ve heyelânlar oluşabilir (*yaklaşık Richter magnitüdü*: 6,4).

IX. *derece:* Şartnamelere ve projeye uygun yapılarda hasar oluşmaz, orta kaliteli yapılarda orta hasar ve kısmi göçükler oluşabilir. Kötü,

standart dışı yapılmış yapıların çoğu yıkılır. Yeryüzünde yarık, çatlak ve kırıklar oluştuğu gözlenir, yer altındaki borular kopabilir. Kumlu zeminlerde sıvılaşma olur (yaklaşık *Richter magnitüdü*: 7).

X. *derece:* İyi yapılarda hasar oluşmaz, ancak şartnamelere tam uygun yapılmamış betonarme yapıların çoğunluğunda az ya da orta hasar veya kırılma başlangıcı görülür. Şartnamelere uyulmadan yapılmış olan yapıların tümü yıkılır. Zeminde büyük çatlak ve yarıklar oluşur, sıvılaşma görülür, demiryolu rayları bükülür, ırmak kenarlarında, dik yamaçlarda heyelânlar oluşur. Kum ve çamur akmaları görülür. Baraj ve bentlerde önemli hasarlar gözlenebilir (yaklaşık *Richter magnitüdü*: 7,4).

XI. *derece:* Afet depremler olup günümüz yeni şartnamelerine tam uygun yapılmış binalar dışında, çok az bina ayakta kalabilir. Yeryüzünde büyük çatlaklar oluşur. Köprülerde ve barajlarda yıkılma, demiryolu raylarında ileri derecede bükülmeler, yüzeyde kaymalar, faylar ve büyük heyelânlar oluşabilir. Yer altı hatlarının çoğu, devre dışı kalabilir (*yaklaşık Richter magnitüdü*: 8,2).

XII. *derece:* Büyük afet depremlerdir. Depremin oluştuğu yer ve yere çok yakın çevresindeki çok özel olarak dizayn edilmiş binalar orta-ağır hasar görür. Bu çok özel şartları sağlamayan bütün binalar yıkılır, insan eli ile yapılmış eserlerin çoğu harap olur, eşyalar havaya fırlar, yeryüzünde deprem dalgalarının ilerleyişi görülür, büyük atımlı faylar meydana gelir. Yeni göller ve yeni sıcak su kaynakları oluşur. Yeryüzü biçimi değişir. Ufuk ve yataylık kavramı kaybolur. İvme 980 cm/sn^2 den büyüktür (*yaklaşık Richter magnitüdü*: ≥ 8,9).

Yukarıdaki ifâdelerden de anlaşıldığı üzere depremde oluşan fayın yüzey kırığı çoğunlukla magnitüdü 6 ve üzerinde olduğunda görülmektedir. Magnitüdü 6 ise yeryüzünde oluşacak fayın uzunluğu yaklaşık 50 km; 7'de 150 km; 7,5'da 250 km; 8'de 350 km; magnitüd 8,5'da ise 550 km civarındadır.

8.3. Sismik Dalgalar

Enerjinin yerin içinde bir noktadan diğer bir noktaya transfer olması **sismik dalga** *(seismic wave)* olarak tanımlanır. Bir deprem dalgasının hızı sabit olmayıp, pek çok faktöre bağlı olarak değişir ve hız büyük ölçüde

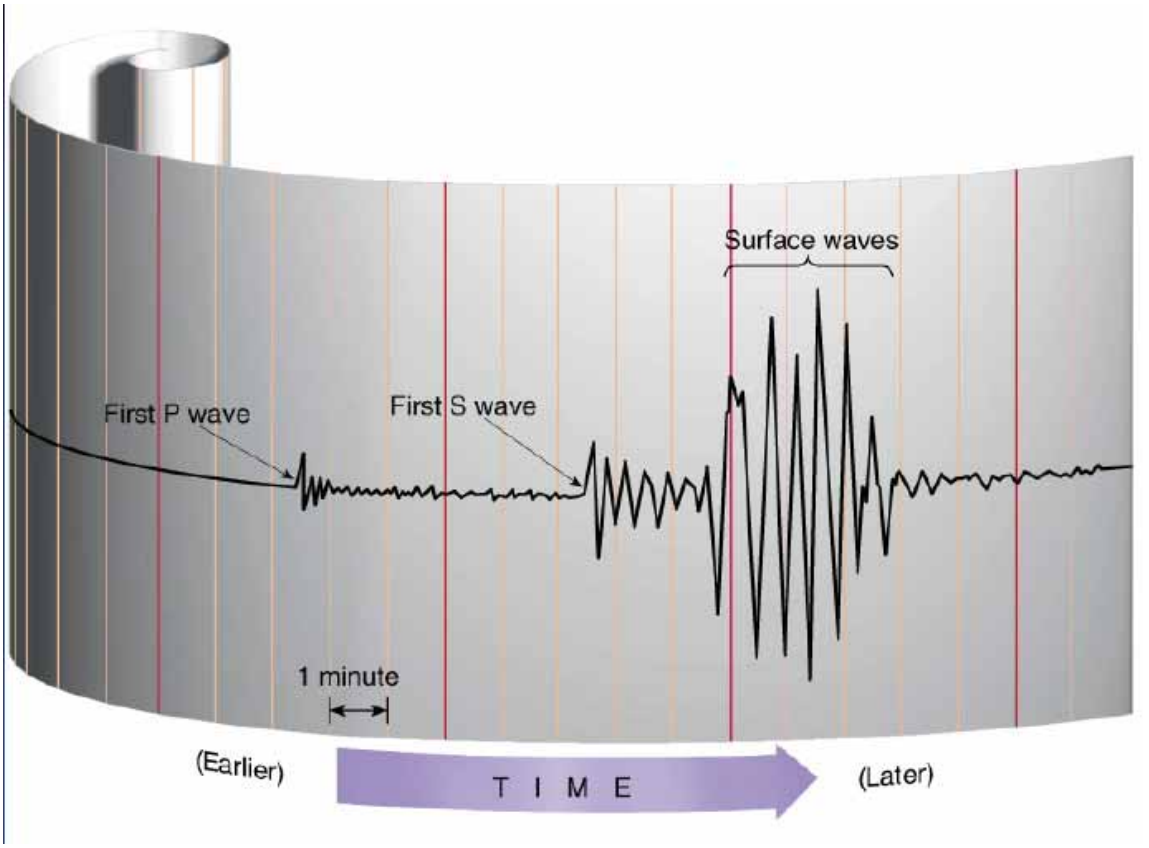
derinliğe ve kaya/zemin türüne bağlı olarak değişir. Sert, som kayaların sismik dalga hızları yüksek, ortam yoğunluğunun giderek azaldığı yumuşak zemin ve gevşek tutturulmuş çökellerin sismik dalga hızları düşüktür.

Deprem sırasında oluşan ve farklı hız ve yayılma karakterine sahip olan sismik dalgalar vardır. Bu dalgalara **"P** (primer) **dalgaları", "S** (sekonder) **dalgaları"** ve **"yüzey dalgaları"** adları verilir. Her üç dalga da yerküreyi farklı hızlarda ve derinliklerde kat ederler. Cisim dalgaları olarak adlandırılan P ve S dalgalarının yayılma hızları geçtikleri jeolojik birimlerin özellikleri ile katman kalınlığı, süreksizlikler, porozite vb. yakından ilişkilidirler. P ve S dalgaları derinde yayılırken, yüzey dalgaları ise yüzeyde yayılarak ilerler. S dalgalarının hızı, içerisinden geçtikleri cismin rijidite ve yoğunluğuna bağlıdır; bu bakımdan pratik olarak sıvı özelliği gösteren ortamlarda meydana gelemediklerinden, dünyanın çekirdeğinden geçemezler. Bu olay, yeryüzünden 2.891 km derinlikte meydana gelir ve bu derinlik de manto çekirdek sınırını oluşturur. Deprem esnasında da, sıvılaşan zeminde tekrarlı yüklemeler altında zeminin kayma gerilmesini büyük ölçüde kaybetmesi olgusu, yıkıcı özellik taşıyan S dalgaları yayılamayacağından dolayı bu tür zeminlerin üzerine inşa edilen binalarda yapısal hasar çok alt düzeyde kalacak, ancak binalarda zemin taşıma kapasitesinin kaybından kaynaklanan oturma ve yana yatma gibi deformasyonlar gözlenecektir (Arıoğlu, Yılmaz, 2006). Yayılım hızları farklı olan her üç dalga da sismograflara farklı zamanlarda ulaşırlar. Bu zaman farkı, deprem merkezinin yakınlarında saniye mertebesinde iken, yerkürenin uzak mesafelerinde ise dakika mertebesine kadar ulaşabilir. Bu dalgalardan daha hızlı olan ve sismografa ulaşarak kaydedilen ilk dalga P dalgasıdır. P dalgasının hemen ardından S dalgası ve en son olarak da yüzey dalgası sismografa ulaşarak kaydedilir.

Deprem dalgalarının yayılımı, ölçme, yöntem ve kayıtların değerlendirilmesi ve yer hareketlerini inceleyen jeofizik (*geophysics*) bilim dalına **sismoloji** *(seismology)* veya **deprem bilimi**; depremlerin büyüklüğünü, süresini, merkezini, oluştuğu zamanı ve diğer sismik dalgaları kaydeden aletlere **sismograf** *(seismograph)* veya **sismometre** *(seismometer)*, sismometre üzerinde deprem dalgalarının ya da diğer yer hareketlerinin zamana bağlı olarak üç yönde (x, y ve z) kâğıt üzerindeki grafiksel gösterimine **sismogram** *(seismogram)* denir (Şekil 8.10 A ve B).



Şekil 8.10.A) Yerkürenin yaklaşık olarak 8.000 km'lik bir bölümünü, farklı hız ve yayılma karakterine bağlı olarak kateden sismik dalgaların, sismograf tarafından kaydedilmiş izleri (*Press* vd., 2004).



Şekil 8.10.B) Bir deprem sonrası gelişmiş sismik dalgaların sismogramı (grafik çıkışı).

P dalgaları (boyuna dalgalar, sıkışma dalgaları), katı, sıvı ve gaz hâlindeki maddeler içinde yayılabilen, kayıt merkezlerine ilk gelen (primer) dalgalardır. Havada hareket eden ses dalgalarını andırırlar ve ses dalgaları gibi kompresyonel (sıkıştırıcı) dalgalardır. Her türlü ortamda yayılabilen bu dalgalar,

yayılma sırasında kayaları ileri-geri itip-çekerek dalgaların ilerleyiş yönüne paralel hareket yaparlar. P dalgaları, bir çeşit itme çekme hareketi yapmalarından dolayı, geçtikleri ortamları hacimce değiştirirler. Yayılma hızları ise yer kabuğunda 6 km/sn - 8,1 km/sn arasında değişmekte, ancak derinlere inildikçe artmakta ve manto/dış çekirdek sınırına kadar en yüksek değerine (13,6 km/sn) ulaşmaktadır. Manto ile sıvı karakterdeki dış çekirdek sınırını oluşturan 2.891 km derinlikten itibaren **(Gutenberg Süreksizliği)** P dalgası hızları anîden 8,1 km/sn'ye düşüp, yerin içine doğru tekrar düzenli bir artış göstererek, katı iç çekirdekte hızları 10 km/sn - 11,2 km/sn'ye yükselmektedir. Bu dalgalar ilerlerken, yer kabuğundaki taneciklerin titreşim doğrultusu dalganın yayılma doğrultusu ile aynıdır ve ses dalgası gibi taneler üzerinde Akordeon'un açılıp kapanması gibi hareket ederek sıkışma-germe etkisi yaratarak ilerlerler. Diğer bir ifâdeyle tıpkı bir ucu sabit olan bir spiral yayı gerip de bıraktığımızdaki salınım gibi hareket ederler. P dalgalarının yıkım etkisi yok denecek kadar azdır.

S dalgaları, deprem istasyonuna ikinci sırada ulaşan dalgalar olup taneler üzerinde makaslama benzeri bir hareket yaratır, titreşim hareketleri yayılma doğrultusuna dik düzlem üzerinde aşağıya-yukarıya ve sağa-sola doğrudur, bu bakımdan bunlara enine dalgalar denir. Yayılma özelliklerinden dolayı bir çeşit burulma hareketi yaptığından geçtikleri ortamda şekil bozukluğuna yol açarlar ve kesme kuvvetlerine karşı direnci olmayan yani sıvı ve gazlar içerisinde yayılamazlar. S dalgaları kayaçlar içinde ilerlerken, kayaçları aşağı-yukarı, sağa-sola doğru hareket ettiren dalgalardır.

P ve S dalgalarının farklı yayılım şekilleri, sadece dalga yayılım hızlarını değil, aynı zamanda dalganın katı-sıvı malzeme içerisindeki hareket niteliğini de etkiler. P dalgaları, içerisinden geçtikleri cisimlerin zerrelerini birbirlerine yaklaştırıp uzaklaştırdıklarından, bu hareketler nedeniyle sıvı ortam içerisinden de geçebilirken, S dalgaları ise sadece katı ortamlarda ilerleyebilmekte, kayma direnci olmayan gaz ve sıvı ortamlardan belirgin ve büyük ölçüde (viskozitesine bağlı olarak) geçememektedirler. S dalgalarının hızı, yer kabuğunda 3-4,5 km/sn iken, manto/çekirdek sınırında en büyük değerini (7 km/sn) alır. S dalgalarının *****frekansları daha düşük, buna karşın **genlikleri** (=******amplitüd) P dalgasına

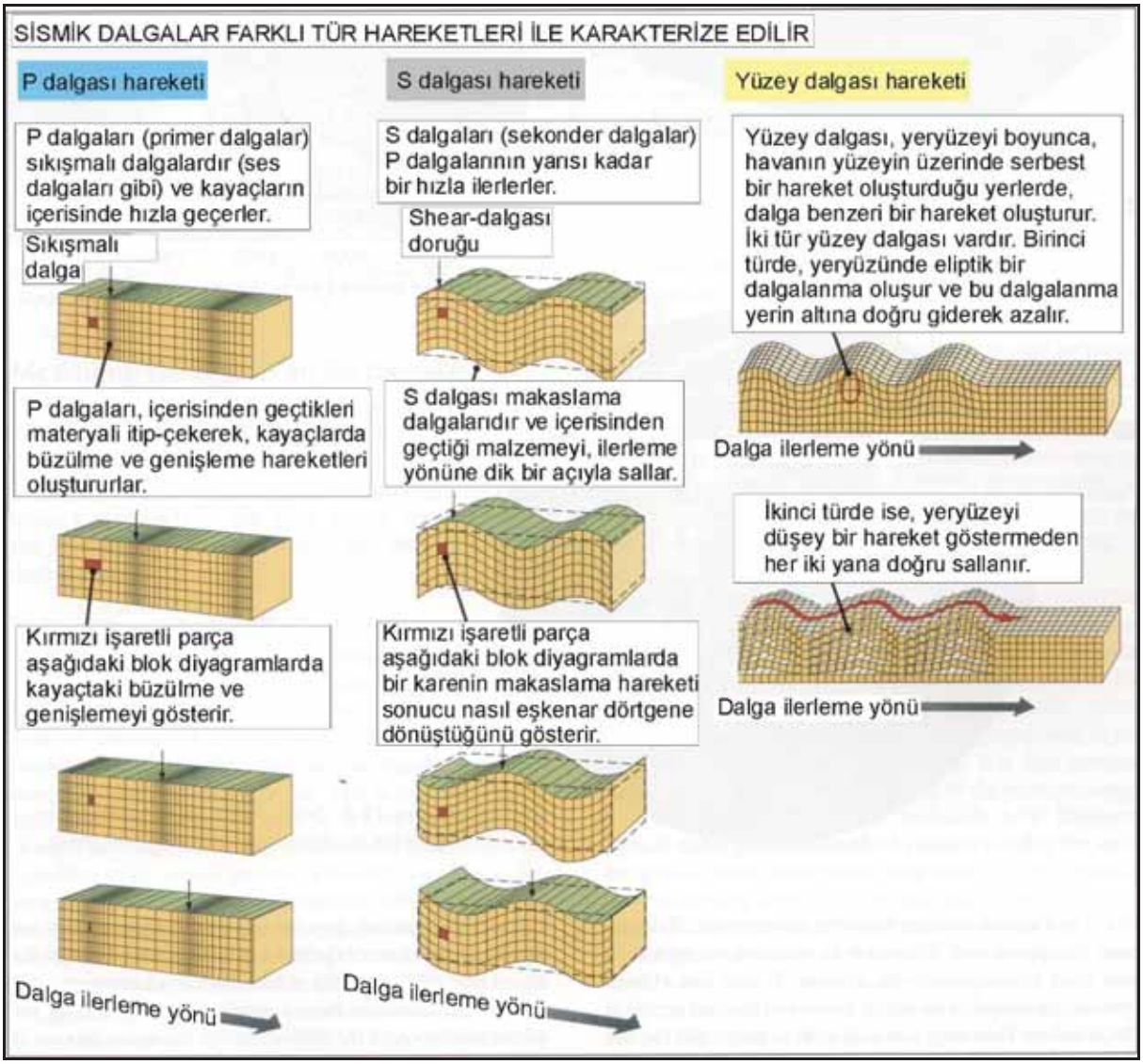
kıyasla daha büyüktür. Bu yüzden S dalgalarının etkime süresi daha uzun, yıkım etkisi yüksek ve diğer dalgalar arasında tahripkâr olanıdır.

*** [Frekans**: Belli bir noktadan bir saniyede geçen tam dalgaların titreşim sayısı.

****Amplitüd**: Dalgaların dikey büyüklüğünün ölçüsü: Bir dalga tepesi ile dalga çukuru arasındaki uzaklığın yarısı**]**.

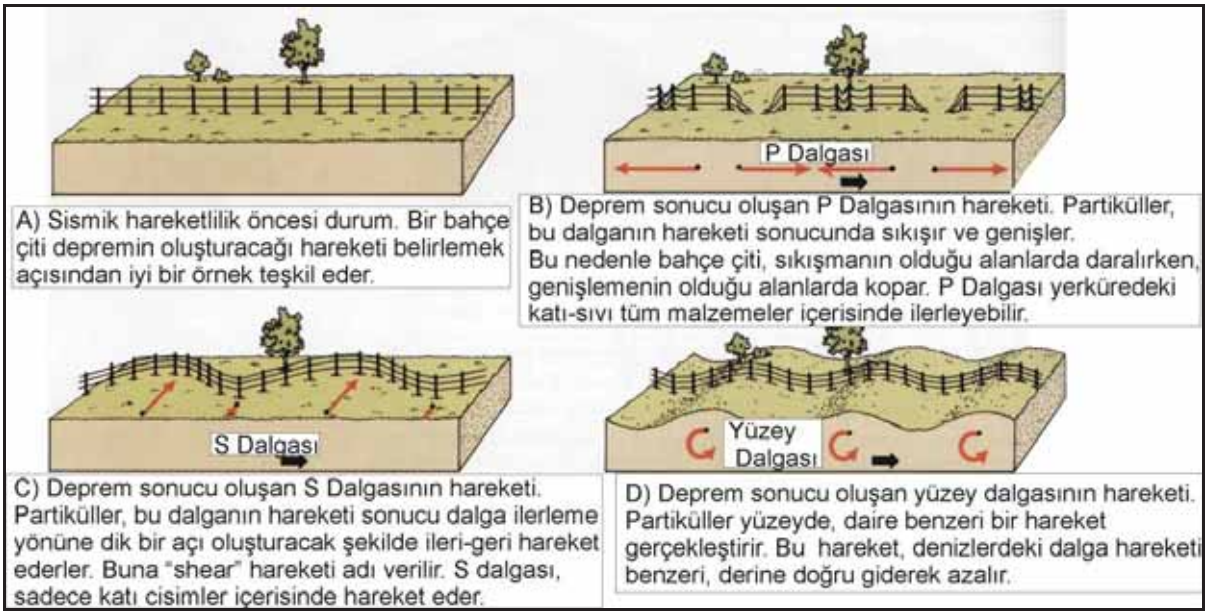
Yüzey dalgaları (*Love ve Rayleigh dalgaları*), diğer dalgaların (P ve S) yüzeye yaklaştıkça birleşmeleriyle meydana gelen ve en yavaş ilerleyen deprem dalgalarıdır. En çok bilinen yüzey dalgaları ***Love* ve *Rayleigh* Dalgaları'dır. *Love dalgaları***; yüzey dalgalarının en hızlısı olup yeri sadece yatay düzlemde hareket ettirir. ***Rayleigh Dalgası***; bir göl veya denizin üzerinde yayılan dalgalar gibi yerin yüzeyi boyunca yuvarlanarak ilerleyen dalgalardır. *Rayleigh dalgaları* yeryüzü boyunca yayılırken bir çeşit yuvarlanma hareketi yaptıklarından, geçtikleri ortam içinde bulunan tanecikler, yayılma doğrultusu boyunca ters bir elips hareketi çizerler. Bu hareket derinlere doğru küçülerek etkisini kaybeder. Deprem sırasında hissedilen sallantıların çoğu, diğer dalgalardan çok daha büyük genlikli olan bu dalgalardan kaynaklanmaktadır. Yüzey dalgalarının hızları 1,5 km/sn ilâ 2,4 km/sn arasında değişir. Kayıt merkezlerine en son gelirler fakat sismogramlar üzerinde en şiddetli hareketleri yansıtırlar. P ve S dalgalarına nazaran hızları daha az, *****periyotları daha büyük ve genlikleri daha uzundur. Genlikleri derinlikle azalır. Bu nedenle derin odaklı depremlerde kaydedilmezler. Bu dalgalar, yeryüzünün hemen altında ilerlediğinden dolayı etkileri yüzeyde fazladır ve yer içine doğru kısa bir mesafe ilerlendiğinde, sudaki dalga hareketi benzeri, hemen zayıflayıp yok olurlar (Şekil 8.11). Yüzey dalgalarının yıkım etkisi yüksektir ve hasara neden olurlar; zira bu dalgaların diğer dalgalara nazaran etki etme süresi daha fazla olması nedeniyle zemin yüzeyinde daha fazla yer hareketi oluşmaktadır.

***[Periyot**: bir tam dalganın üretilmesi için geçen süre**]**.



Şekil 8.11. P, S ve Yüzey Dalgalarının yayılım şekilleri (*Press* vd., 2004).

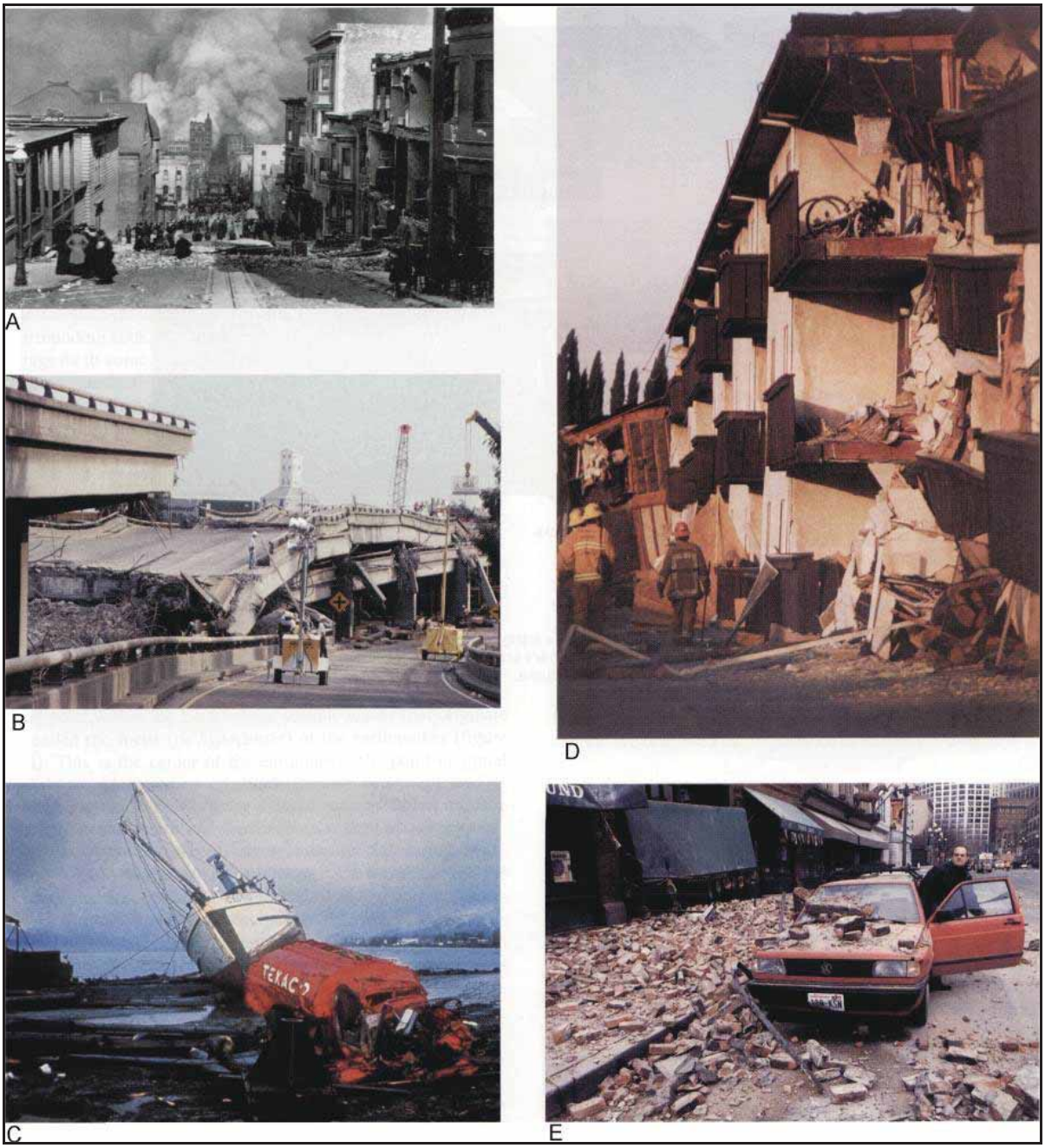
Her üç dalganın hareketlerini daha iyi anlayabilmek için depreme mâruz kalan bir bahçe çitini ele almak mümkündür (Şekil 8.12). Söz konusu çit, depremin ardından yayılan P dalgaları sırasındaki sıkışma-germe işlemi nedeniyle gerildiği noktalarda kopar. Aynı çit, S dalgasının makaslama etkisi sonrasında yanal yönde öteleneceği için zikzak bir yapı kazanır. Yüzey dalgasının yayılımı sırasında ise çitteki dalgalanma hareketi yukarı-aşağı yönde olacaktır (Şekil 8.12). Bu etkilere mâruz kalan ve yeterli mühendislik önlemlerinin alınmadığı yapılarda ise önemli düzeyde yıkımlar meydana gelir.



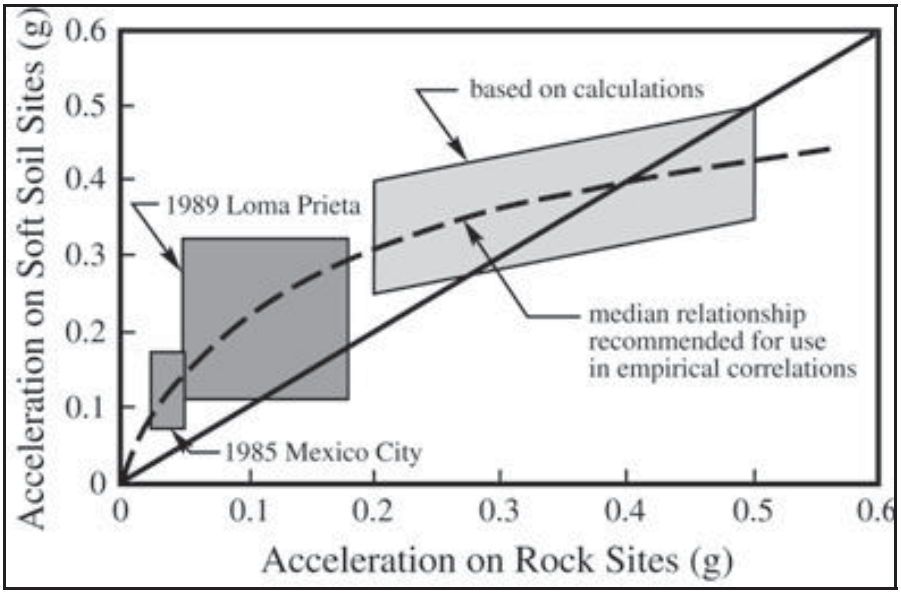
Şekil 8.12. P, S ve Yüzey Dalgalarının bir bahçe çiti üzerindeki farklı etkileri (*Hamblin* ve *Christiansen*, 2004).

Deprem dalgaları yayılırken kayalık alanlarda hareketleri büyütülmemekte, ancak depremden oldukça uzak bölgelerde yer alan gevşek tutturulmuş ya da tutturulmamış zemin ortamlarında, zemin; deprem hareketini (ivmesini) büyütmektedir. Diğer bir deyişle; kalın, yumuşak/gevşek zemin tabakaları içinde hareket eden deprem titreşimlerinin genliklerinde ortaya çıkan artış **zemin büyütmesi** *(soil amplification)* olarak nitelendirilebilir. Zemin tabakalarının düşük kayma dalgası hızına sahip olması, taban kayasından gelecek olan deprem dalga kuvvetinin zemin yüzeyinde büyümesine neden olacaktır. Bir başka deyişle; sert ana kayadan *(bedrock)* yumuşak zemin tabakalarına geçen deprem dalgalarının genliği büyümektedir. Bu; tıpkı sahile yaklaşan deniz dalgalarının genliklerinin artması gibidir ve kıyıdan uzakta önemli bir dalga genliği görülmezken, aynı dalga sahile yaklaştıkça hızı yavaşlar ve buna bağla olarak da genliği büyür. Bu yüzden, göl ve deniz kıyı düzlükleri, dere yatakları ile ovaları oluşturan gevşek tutturulmuş ya da tutturulmamış alüvyal sahalarda ve "zemin kaya dokanaklarında" küçük ve büyük depremlerde, depremin şiddeti oldukça büyük değerlere ulaşacağından, bu tür yerlerde şartnamelere uygun yapılmayan binalarda çok ağır hasarlar meydana gelebilecektir. Ancak yüksek ivme değerlerine ulaşan çok büyük depremlerde, kaya üzerinde yer alan yumuşak ve gevşek zeminler depremin

ivmesini (hızlanma hızını) büyütmek yerine kısmen azaltacağı da unutulmamalıdır (Şekil 8.13.A ve B).



Şekil 8.13.A) ABD'de meydana gelmiş önemli depremlerin yarattığı hasarlar (*McGeary* vd., 2004). A) 1906 *San Fransisco* Depremi sonrası; B) 1989 *Loma Prieta* Depremi sonrası *Oakland*'daki iki katlı yol; C) 1964 Alaska Depremi sonrası oluşan tsunami ile karaya vuran gemiler; D) 1994 Güney *Kaliforniya* Depremi sonrası; E) 2001 *Nisqualy* Depremi sonrası *Seettle*.



Şekil 8.13.B) Yerel zemin koşullarının deprem ivmesine etkisi (*Idriss*, 1990).

Kaya ortamında oluşan deprem ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak ivmenin değişimi şekil 8.13.B'de görülmektedir. Burada yatay eksen kayadaki ivme; düşey eksen ise yumuşak zemindeki ivme değerlerini göstermektedir ve sağlam kaya ortamında ivme değişimi olmaz iken, zemin ortamında ise ivmeler büyütmeye uğramakta (=zemin büyütmesi) veya küçülmektedir (*Idriss*, 1990).

8.4. YEREL ZEMİN KOŞULLARININ YAPI DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Yerel zemin koşullarının bina davranışına ve deprem hasarına etkisinin de iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Depremlerin yapılarda yol açtığı hasarların, arazi zemin profili, topoğrafik özellikler ve yerel zemin ortamı koşullarının değişik etkileri altında kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle, yapıların inşaasından önce yapılan, temel zemini etütlerinde; arazideki temel zeminini oluşturan tabakaların muhtemel bir deprem sırasında göstereceği davranışın da incelenmesi gerekli olmaktadır. Depremler sırasında gözlenen yapısal hasar, zemin yüzünde büyük deplâsmanlara yol açan toptan zemin göçmelerinin sonucu oluşmuşsa, meydana gelen yapısal hasar ile yerel zemin koşulları arasındaki ilişki açık olarak görülebilir. Örnek olarak gevşek yerleşimli taneli (=dâneli) zeminler, yer

sarsıntıları sonucu sıkışarak zemin yüzünde toplam ve farklı oturmalara ve böylece taşıdıkları yapılarda büyük yapısal hasarlara yol açabilmektedirler. Gevşek yerleşimli dâneli zemin tabakalarının suya doygun olması hâlinde ise titreşimlerin yol açtığı sıkışma sonucu boşluk suyundaki *(pore water)* hidrostatik basınç artışı, zeminin sıvılaşmasına ve üzerindeki yapıların oturmasına, yatmasına veya zeminin içine batmasına neden olabilmektedir. Depremler sırasında oluşan dinamik gerilmeler ve boşluk suyu basıncı artışlarının, yumuşak kil ve kum tabakalarında büyük toprak kaymalarına ve şev göçmelerine de yol açtıkları gözlenmiştir.

Depremlerde gözlenen yapısal hasara, zemin koşullarının etkisi yönünden daha az açık olan bir etki de; zeminde hiçbir göçme olmadığı hâlde, zemin koşullarının yapılara etkiyen sarsıntı şiddetine ve dolayısı ile üzerindeki yapıların göreceği hasara yaptığı etkidir. Yerel zemin koşulları, deprem sırasında yapılara etkiyen yer ivmesinin genliğini, frekans özelliklerini ve buna bağlı olarak da atalet kuvvetlerini büyük ölçüde etkilemektedir.

SONUÇ OLARAK:

Zemin tabakaları, deprem hareketinin özelliklerini değiştirmeleri yanında, depremlerin yol açtığı tekrarlı (çevrimli) gerilmelerden olumsuz etkilenebilirler:

a) Titreşimli yükler, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerinde yumuşamaya (rijitlik azalmasına) yol açarlar,

b) Titreşimli yükler, zeminlerde boşluk suyu basıncı artışlarına ve artık boşluk suyu basıncı birikimlerine neden olurlar,

c) Yumuşama ve artık boşluk suyu basıncı birikimleri kayma mukavemeti azalmasına neden olabilir. Killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemetinde *(undrained shear strength)* azalma; kumlu zeminlerde ise sıvılaşma durumu ortaya çıkabilir. Ve sıvılaşma sonucu temel zemininde yanal akmalar ve temel altının boşalması meydana gelebilir. Bu durum ise temelin taşıma gücünü kaybetmesine ve göçmeye yol açabilir.

Ayrıca depremler sırasında ve sonrasında bina temelleri altında ilâve oturmalar meydana gelebilir. Bunlar:

a) Rijitlik azalması, anî oturmalara ve

b) Gevşek kumlarda titreşimler, hacimsel şekil değiştirmelere yol açabilmekte,

c) Titreşimlerin etkisi ile meydana gelen boşluk suyu basınçları ilâve konsolidasyon *(consolidation)* oturmalarına da neden olabilmektedir.

Depremde ayrıca yer yer şev kaymaları da görülmektedir. Şev üzerinde yer alan binalarda, depremin tetikleyeceği zemin hareketleri ve kaymalar, temel zemininde düşey ve yanal yer değiştirmelere yol açabilmekte, bu tür yer değiştirmeler, üst yapıda aşırı zorlanmalara neden olmaktadır.

Bu sebeplerden dolayı yapıların yer seçiminde ve tasarımında, inşaat alanının zemin koşullarının göz önüne alınmasını gerektirmektedir. Güvenli ve ekonomik yapılaşma için:

a) Yapılara etkiyecek deprem kuvvetlerinin daha az olacağı,

b) Muhtemel bir deprem sırasında yapı temelleri altında, taşıma gücü kaybı ve aşırı yer değiştirmelerin ortaya çıkmayacağı zemin koşullarına sahip araziler tercih edilmelidir.

8.5. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

Genellikle, suya doygun bir kum tabakası, deprem titreşimlerine uğradığı zaman sıkışmaya ve hacmini azaltmaya eğilim göstermekte, fakat eğer drenaj mümkün değilse, hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncının artması sonucunu doğurmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncının da artmasına neden olmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncına eşit olacak mertebeye ulaştığı zaman efektif (etkin) gerilmeler sıfır olmakta, kohezyonsuz zemin (örn. kum) tabakası mukavemetini tamamen kaybetmekte ve sıvılaşmış bir duruma gelmektedir.

Suya doygun kohezyonsuz *(cohesionless, non-cohesive)* zeminlerde, dinamik yüklerin etkisiyle kayma mukavemetinin kaybolması ve zeminin bir sıvı gibi davranması olayına **Sıvılaşma** *(liquefaction)* adı verilir. Zeminin mukavemetini kısmen veya tamamen kaybetme sebebi, derinlik boyunca boşluk suyu basıncındaki artışa koşut olarak taneler (dâneler) arasındaki temas olarak tanımlanabilecek mevcut efektif gerilme değerinin azalmasıdır. Sıvılaşma, deprem sırasında ve/veya akabinde görülebilen ve sonuçları son derece hasar verici olabilen bir zemin problemidir. İlk olarak 1906 yılında *San*

Fransisco depreminde dikkati çeken ve özellikle 1964 *Niigata* ve *Alaska* depremlerinin ardından araştırmacıların ilgi odağı hâline gelen bu olay, daha sonraki yıllarda da 1971 *San Fernando*, 1989 *Loma Prieta*, 1994 *Los Angeles Northridge,* 1995 *Kobe* ve 1999 Gölcük (Marmara) depremi gibi birçok depremde gözlenmiştir.

8.5.1. Sıvılaşmayı etkileyen faktörler

Bir zeminin sıvılaşmasına etki eden faktörleri zeminin yapısından ve dış etkenlerden kaynaklanan faktörler olarak iki grupta toplayabiliriz.

8.5.1.1. Zemin yapısı

Yapılan gözlemler ve deneyler neticesinde kohezyonsuz zeminlerdeki sıvılaşmanın; zeminin sıkılık derecesi, tane özellikleri, kil zemin içeriği ve arazideki drenaj şartları gibi faktörlerden etkilendiği tespit edilmiştir.

Sıkılık derecesi: Kohezyonsuz zeminlerde sıkılık derecesinin yüksek olması sıvılaşma riskini azaltan bir etkendir. Sıkılık derecesi % 35'ten küçük olan taneli zeminler gevşek zeminler olarak kabul edilir ve suya doygun olmaları hâlinde, sıvılaşmaya karşı son derece hassas bir yapıya sahiptirler.

Tane özellikleri: Tane (=dâne) özellikleri olarak bilinen, tane boyu, tane şekli ve tane çapı dağılımı sıvılaşma açısından önemlidir. Tane boyutunun küçülmesi, kırıntılı zeminlerde sıvılaşma riskini arttırmaktadır. Tane şekli açısından bakıldığında ise yuvarlak tanelere sahip zeminlerin köşeli tanelere sahip zeminlere göre daha fazla sıvılaşma tehlikesi taşıdığı düşünülmektedir. Tane çapı dağılımının da sıvılaşma durumu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Meselâ, hemen hemen her çap aralığında belirli bir miktar tane bulunduran iyi derecelenmiş bir zeminde, deprem etkisiyle birlikte daha küçük çaplı taneler, büyük çaplı taneler arasındaki boşluklara girmeye çalışacağı için boşluk suyu basıncı artışları daha sınırlı kalacaktır. Buna göre**,** uniform kumlar sıvılaşmaya karşı oldukça hassas bir yapıya sahiptir. Ancak kum taneleri içinde bol fosil kavkıları bulunması sıvılaşmayı azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

Kil içeriği: Kil içeriğinin artması, kohezyonsuz zeminde sıvılaşma tehlikesini azaltan bir etkendir (Tablo 8.1).

Tablo 8.1. Kil içeriği kriterleri (*Andrew* ve *Martin*, 2000).

	Likit Limit< % 32	Likit Limit≥ % 32
Kil içeriği < % 10	Sıvılaşma olur	Daha fazla araştırma gerekli
Kil içeriği ≥ % 10	Daha fazla araştırma gerekli	Sıvılaşma olmaz

Drenaj şartları: Arazide sıvılaşma oluşumu drenaj şartlarıyla yakından ilişkilidir. Sıvılaşmaya neden olan etken, suyun drene olamaması nedeniyle boşluk suyu basıncında oluşan artışlardır.

Sismik geçmiş: Geçmişte sıvılaşmaya mâruz kalmış zeminlerin, yeni depremler ile birlikte tekrar sıvılaşma gösterme ihtimalînin büyük olduğu, hem laboratuar çalışmalarından hem de arazi gözlemlerinden bilinmektedir (Ansal ve Öğünç, 1981). Bu nedenle, herhangi bir mühendislik yapısının inşaasından evvel, arazinin sismik geçmişine bakarak sıvılaşma tehlikesi açısından bir ön bilgi elde edilmelidir. Mikro-bölgeleme yöntemi ile üretilen haritalar bu konuda oldukça yol gösterici bir rehberdir.

8.5.1.2. Sıvılaşmaya neden olan dış etkenler

Arazide sıvılaşmaya neden olan etken çoğunlukla deprem hareketidir. Bu nedenle, sıvılaşma potansiyeli incelenirken, olası depremler ile ilgili özellikler mutlaka göz önünde tutulmalıdır.

Sıvılaşmaya sebep olacak yüklemenin şiddeti: Sıvılaşma, statik veya dinamik yüklerin (deprem, trafik, patlatma vb.) etkisi altında meydana gelebilir. Arazide karşılaşılan durum, sıvılaşmanın genellikle deprem etkisiyle oluştuğu şeklindedir. Bu nedenle, sıvılaşmanın meydana gelmesinde depremin şiddetinin önemli bir rol oynadığı açıktır. Depremin şiddetinin yüksek olması, bir başka deyişle maksimum ivmesinin büyük olması, sıvılaşma tehlikesini arttıran bir etkendir. Bununla birlikte magnitüdü (deprem sırasında açığa çıkan enerjinin büyüklüğü) büyük olmayan bir deprem hareketinin yüzeye doğru ilerlerken, zemin tarafından büyütülebildiği bilinmektedir. Bu nedenle, bu durumun sıvılaşmaya yol açabileceği de ihtimal dâhilindedir.

Yükleme süresi: Depremin süresinin uzaması tekrarlı gerilmelerin zemine uygulanma süresini uzatacağından, sıvılaşma tehlikesini önemli ölçüde arttıran bir etkendir.

8.5.2. Sıvılaşmanın yol açtığı zemin problemleri

Sıvılaşma nedeniyle arazide karşılaşılan başlıca zemin problemleri arasında, yanal akma *(lateral spreading)*, akma göçmesi *(flow failure)*, zemin yüzeyinde çökme-ayrılma, istinat yapılarında stabilite sorunları, şev kaymaları, taşıma gücü kaybı, kum kaynaması *(sand boils)* sayılabilir.

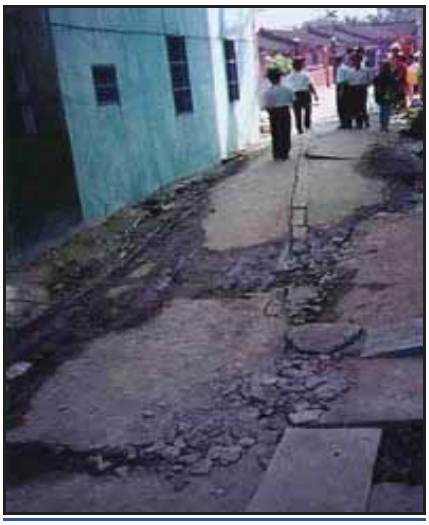
Yanal akma: Yanal akma olayı genellikle bir su kütlesi yakınında bulunan düşük eğimli arazilerde, yüzeye yakın bulunan bir zemin tabakasının, altında yer alan tabakanın sıvılaşması sonucunda, sıvılaşan zemin üzerinde yapacağı hareket olarak tanımlanabilir. Bu hareket birkaç metre ile sınırlı kalabileceği gibi onlarca metre de olabilir (Şekil 8.14).



Şekil 8.14. Bir yanal akma örneği (http://earthquake.usgs.gov/).

Akma göçmesi: Akma göçmesi daha çok bir su kütlesi yakınında bulunan eğik yüzeyli zeminlerdeki sıvılaşmış zemin kütlesinin, daha çok kendi ağırlığının etkisiyle aşağı doğru âdeta bir sıvı gibi hareket etmesi olayıdır.

Zemin yüzünde çökme-ayrılma: Özellikle düz yüzeyli arazilerde, altta yer alan bir tabakanın sıvılaşmaya mâruz kalmasıyla yüzeyde gözlenen çatlaklar, yarıklar, blok şeklinde çökmeler bu kapsamda değerlendirilir (Şekil 8.15).



Şekil 8.15. Sıvılaşma etkisiyle zemin yüzünde meydana gelen bir çökme örneği (www.earthscape.org/r1/uac01/uac01.html).

Taşıma gücü kaybı: Zemin tabakası sıvılaştığı zaman taşıma gücünü tamamen kaybeder ve üzerindeki yapılar zemin içerisine doğru, olduğu gibi batabilir, yan yatabilir veya devrilebilir (Şekil 8.16, 8.17).



Şekil 8.16. Sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybının sonuçlarına bir örnek (*Niigata*-1964, USGS).



Şekil 8.17. 1999 Marmara (Gölcük) Depremi nedeniyle oluşan sıvılaşmanın yol açtığı taşıma gücü kaybının Adapazarı'nda bir binaya etkisi (Selçuk, 1999).

İstinat yapılarında stabilite bozuklukları: İstinat duvarı arka dolgusu olarak kullanılan malzemenin sıvılaşması nedeniyle projelendirmede dikkate alınmayan ilâve yanal yükler, istinat duvarlarına *(retaining wall)* etkiyerek yıkılmasına sebep olabilir (Şekil 8.18).



Şekil 8.18. İstanbul, Harami Dere yokuşu E-5 Karayolu yakınında yıkılmış bir istinat duvarı (03.09.2006).

Kum kaynaması ve yüzeyde kum öbekleri oluşumu: Sıvılaşma sırasında çok sık rastlanılan diğer bir olay, yüzeyde su ve kum birikintisinin oluşmasıdır. Deprem sırasında ve/veya sonrasında oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçları, zemin içerisinde hidrolik eğime neden olur ve su enerjisi yüksek olan noktadan düşük olan noktaya doğru hareket eder. Su, bu hareketi sırasında, sıvılaşmış bölgeden taşıdığı malzemeyle birlikte oluşan çatlaklar arasından yüzeye çıkar. Yüzeyde görülen "çamurlu sular" bu mekanizmanın sonucunda oluşmakta ve yüzeyde kum öbekleri gözlemlenmektedir (Şekil 8.19).



Şekil 8.19. Sıvılaşma nedeniyle oluşan kum öbeğine (konisine) bir örnek (www.tfhrc.gov).

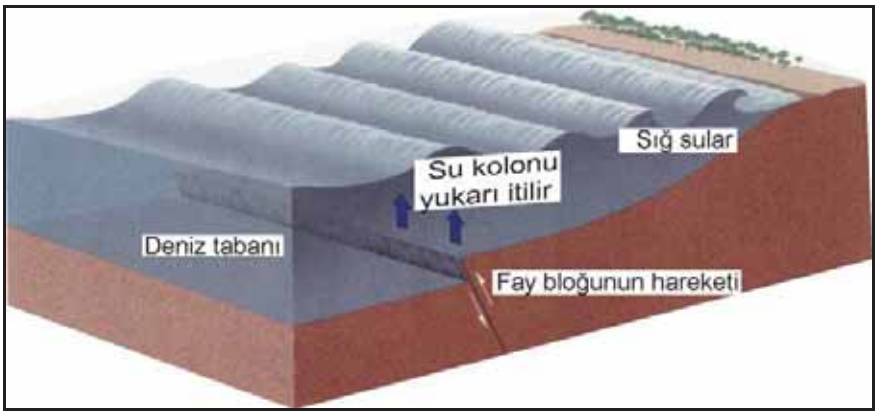
8.6. Liman Dalgaları (Tsunamiler)

Denizlerde oluşan rüzgâr kökenli dalga hareketleri, denizin sadece üst tabakasında ve kısa mesafelerde bir etki yaratır. Ancak deniz tabanındaki aktif tektonik olaylar sonucu bir yer değiştirme, sadece deniz yüzeyini değil, tüm su kolonunu etkileyeceğinden, bu tür bir hareket sonucu suda oluşan dinamik güç, çok daha büyük bir hareketi doğuracaktır. Buna bağlı olarak kıyılara doğru da deniz tabanının sığlaşması ile oluşacak ve giderek yükselecek olan dalgaların etkisi de, çok daha büyük ve yıkıcı olacaktır. Japonca'da "Liman Dalgası" anlamına gelen **tsunami** *(tsunami)* sahil kıyılarında çok büyük

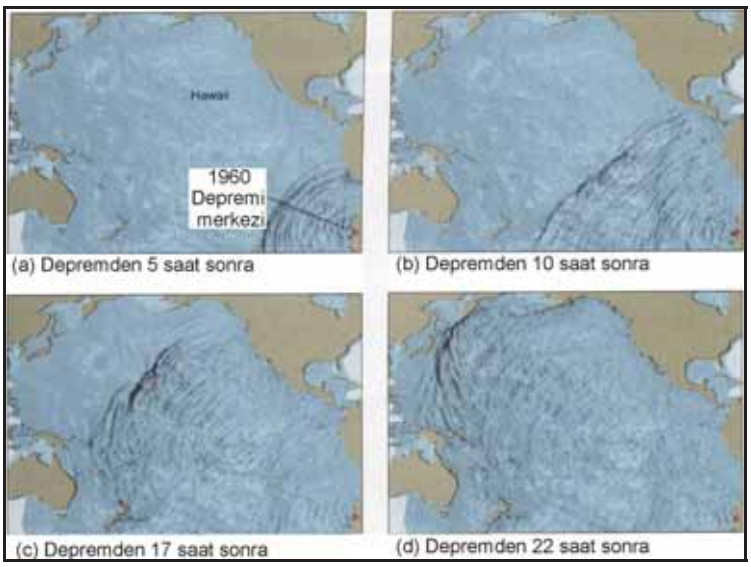
hasarlara neden olan uzun periyotlu dev yıkıcı deniz dalgalarıdır. Tsunami'ler, denizlerin ya da daha çok yaklaşık % 90 oranında okyanusların tabanında, levhaların (plâkaların) bir araya geldiği dalma-batma zonlarında, anî kırılmalar (ters faylar) nedeniyle oluşurlar. Magnitüdü 7'den büyük depremler ile volkan patlaması/çökmesi veya deniz içinde ya da yüksek eğimli sahil şeritlerinde oluşan heyelân ve diğer tür kütle hareketleri de tsunamileri oluşturmaktadır.

Okyanus veya denizlerde oluşan bir depremin tsunami oluşturabilmesi için; a) Magnitüdü 7'den büyük, b) *Hiposantr*'ı yani, ters fayın kırılmanın başladığı odak noktası, deniz dibinde kara tarafına dalan batma zonunda olması, c) büyük bir su sütununun harekete geçebilmesi için de deniz tabanında, düşey atımın (göçme) olması gerekmektedir. Bu göçme ve fayın ters atımı ile birlikte, büyük su kütlesi önce insanların kaçabileceği bir zaman süreci içinde sahillerden çekilmekte ve çekilen su daha sonra jet uçağı süratine yakın bir hızla önce kıyıya ulaşıp sonra sahil şeridini de aşarak kara tarafı iç kısımlarını oluşturan yerleşim alanlarına doğru ilerleyerek tsunamiyi oluşturmaktadır.

Tsunami'ler, uzun periyotlu olduklarından kıyı yerleşimleri üzerinde yıkıcı etkisi çok büyük olan âfetlerin başında gelir. Dalma-batma kökenli bir tsunaminin oluşabilmesi için deniz tabanında bir yer değiştirme yaratabilecek en önemli kaynak, ters fay hareketleridir. Deniz tabanında plâkaların sınırını oluşturan dalma-batma zonunda yüzlerce km uzunluğunda oluşan bir kırılma ile harekete geçen ters bir fayın anî gerilme boşalması nedeniyle oluşan deprem sonucu, çok büyük bir su kolonu da etkilenerek deniz tabanında göçen kesime hareket ederek yer değiştirir. (Şekil 8.20). Ortaya çıkan deprem enerjisi, tüm su kolonu boyunca çepeçevre iletilir. Tsunaminin yarattığı dalgalar, rüzgârlarla oluşan yüzeysel deniz dalgalarından farklı olarak sadece deniz yüzeyi ile kalmayıp, tüm su sütunu (derinliği) boyunca oluşmakta ve bu enerji iletilmektedir. Tsunamide, deprem hareketinin oluşturduğu dalga şoku, 5.000 m gibi bir derinliğe sahip denizin yüzeyinde dalga yüksekliği birkaç desimetreyi geçmeksizin kendini hissettirmeden, saatte 800 km süratle su sütunu boyunca yan sütunlara enerjiyi aktarır. Bu, tıpkı kalın bir halının silkelenmesi esnasında, halı üzerinde oluşup ilerleyen kıvrımlara benzetilebilir. Dalga şoku büyük mesafeler (20.000 km) katederek yol alır (Şekil 8.21).



Şekil 8.20. Deniz tabanında meydana gelen bir depremi oluşturan fayın, deniz tabanında yarattığı yükselim/alçalımın denizde oluşturacağı tsunami (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 8.21. Tsunami gelişimi. 1960 yılında Pasifik Okyanusu'ndaki bir deprem sonrası meydana gelen tsunami ve okyanus boyunca zaman içerisindeki gelişimi (*Hamblin* ve *Cristiansen*, 2004).

Tsunami, 7.000 m derinliğinde olan bir okyanusta oluşmuş ise sürati saatte 943 km, dalga boyu 282 km'dir. Okyanus veya deniz sığlaşarak 200 m derinliğe ulaştığında sürati saatte 159 km, dalga boyu 49 km'ye; 50 m derinlikte 79 km/saat, dalga boyu 23 km; kıyıda, sahilde 10 m gibi sığlıklara ulaştığında sürat 36 km/saat, dalga boyu ise 10,6 km'ye düşmektedir. Diğer bir ifâde ile deniz derinliği kıyılara doğru azaldıkça dalga boyu da azalır, dalga yüksekliği (=amplitüd=genlik) ise hızla artar. Dalga sığ bir ortama ulaştığında tüm dalgalar gibi denizin sığlaşması nedeniyle hızı yavaşlar, ancak arkasında uçak süratine yakın hızdaki su kütlesi, sahilde yavaşlayan su kesimini arkadan hızla

itmesi sonucu, önünde biriken deniz dalgalarının daha da aşırı büyümesine yol açar ve dalgalar, normal rüzgâr kökenli kıyıda yüzeyde oluşan dalgalar ile kıyaslanamayacak miktarda yükselerek kıyıya art arda çarparlar. Dalgalar, arkalarındaki hızı yüksek itici gücün devam etmesi nedeniyle sel baskını benzeri şekilde karaya doğru, özellikle vâdiler ve alçak düzlük alanlar boyunca kilometrelerce ilerler ve büyük bir yıkıma neden olurlar. Tsunami nedeniyle sahillerde oluşan ortalama dalga yükseklikleri genellikle 10 m civarındadır. Ancak depremin büyüklüğüne yani kırılan levha parçasının uzunluğuna, geometrisine, yönüne ve oluş süresine bağlı olarak dalga yüksekliği birkaç metre olabileceği gibi 24 Nisan 1971'de Japonya'da *Ishigaki* adasında görüldüğü üzere deprem sonucu meydana gelen tsunamide dalga yüksekliği 85 m yüksekliğe ulaşabilmiştir. Deprem olmadan ya da depremin tetiklediği heyelânlar nedeniyle de büyük Tsunamiler (Megatsunami) olabilmektedir. Örnek olarak *Alaska*'da bir fiyord olan "T" biçimli ve 3 km genişliğinde 10 km uzunluğunda, 220 m derinliğindeki *Lituya* Körfezi'nde, 9 Temmuz 1958 tarihinde oluşan magnitüdü M_w= 8,3 büyüklüğündeki deprem sonrası oluşan heyelân sonucu körfeze düşen kaya ve buzullar nedeniyle deniz suyu anîden taşmış ve bölgenin dar ve dik morfolojik yapısı nedeniyle de maksimum 530 m dalga yüksekliğine ulaşan ve modern zamanın en büyük megatsunamisini oluşturmuştur.

Genellikle kuzey Amerika ve İskandinavya kıyılarında görülen ve jeolojik bir oluşum olan **Fiyord;** nehir vâdilerinde yataklarında buzul aşındırması sonucunda oluşmuş, iki tarafı dik sarp kayalıklarla çevrili uzun "U" veya "T" biçimli ve denizlere ulaşarak deniz suyu ile dolmuş dar, derin, dik kenarlı koylar ya da eski buzul vâdileridir. Karalar üzerindeki dünyanın en kalın buzul tabakaları Antarktika karası üzerinde 4.776 m ile birinci sırada, % 81'i buzlarla kaplı *Grönland* Adası'nda ise 3.400 m ile ikinci sırada yer almaktadır. Örnek olarak *Grönland* Adası'nın doğu kıyısında bulunan "S*coresby sund"* Fiyordu; büyük buzul aşındırmalarıyla 1.000 m – 2.000 m arası yükseklikliere ulaşan çok dik bazalt kayaları yamaçları koridorlarını oluşturmuştur. *Scoresby sund* fiyordu, batıdan doğuya doğru alçalarak uzanıp *Grönland* Denizine birleşen, tıpkı bir çınar ağacının gövdesi ve dalları benzeri yapıda gelişmiş, toplam 350 km uzunluğunda ve denize birleştiği ana gövde kesiminde su derinliğinin 400 m ilâ 600 m arasında olduğu, dünyanın en büyük fiyordudur. Bu gibi

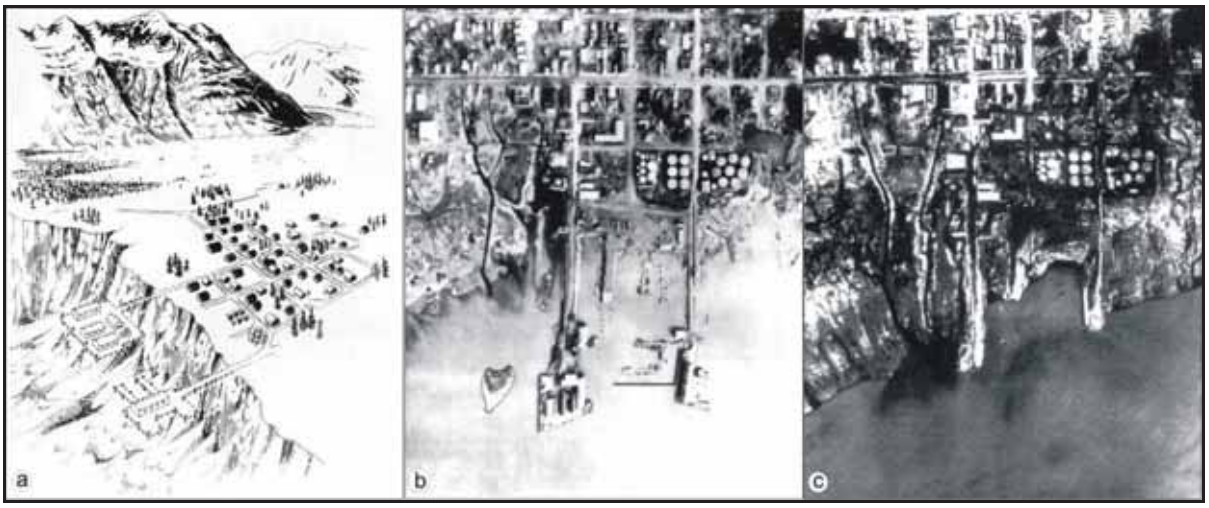
bölgelerde deprem sonrası dik vâdi yamaçlarında oluşabilecek büyük heyelânlar, dar vâdilerde su seviyesinin anîden yüzlerce metre yükselmesi ile çok büyük tsunamilere neden olacaktır.

Tsunami'ye diğer bir örnek olarak Aralık 2004'de Endonezya'ya ait *Sumatra* Adaları batısında, Hint Okyanusu'nda dalma-batma zonunda artan gerilme sonucu bu zonun 1.200 km'yi aşkın uzunlukta bir kesiminin kırılarak saniyeler içinde ve anîden 15 m'lik düşey bir atımla meydana getirdiği ters fayın oluşturduğu M_w= 9,1-9,3 büyüklüğündeki deprem gösterilebilir. Depremin ardından oluşan tsunami; *Sumatra (Banda-Aceh)* kıyılarından Hindistan'a kadar uzanan çok geniş bir bölgede sadece kıyı şeridi boyunca değil, kilometreler mertebesinde bir mesafe katederek, karaların iç kısımlarına doğru ilerlemiş ve bu bölgelerde çok büyük boyutlu yıkımlar yanında, yaklaşık 231.000 insanın ölmesine neden olmuştur (Şekil 8.22). Fayların oluşturdukları depremler yanında, deniz veya okyanus kıyılarında, aktif volkanlar ya da oluşabilecek büyük kütle hareketleri de zaman zaman büyük tsunamilerin oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 8.22. Tsunaminin oluşturduğu yıkımlar. Aralık 2004'de meydana gelen deprem sonrası oluşan tsunaminin *Banda-Aceh* (*Sumatra*) kıyılarında meydana getirdiği yıkıma ait uydu görüntüleri.

Deniz tabanında tsunami oluşturacak denizaltı kütle hareketlerine diğer bir örnek ise yine 1964 yılında *Alaska*'da oluşmuş olan M=9,2 büyüklüğündeki depremdir. Bu depremin kıyıda oluşturduğu heyelân sonucu, bölgede büyük yıkıma neden olan bir tsunami meydana gelmiştir (Şekil 8.23).

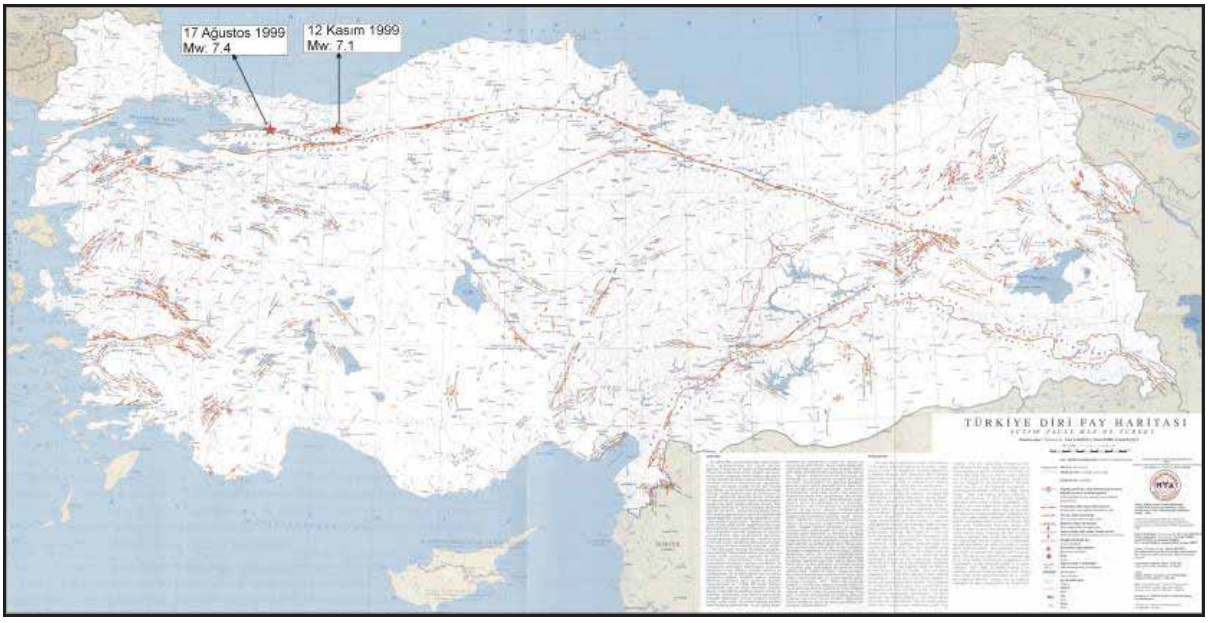


Şekil 8.23. Tsunamiden etkilenen tesisler. *Alaska*'da 1964 yılında meydana gelen 9,2 büyüklüğündeki (Mw=9,2) deprem sonrası kıyıda meydana gelen denizaltı heyelânı tarafından oluşturulan tsunamiden etkilenen petrol dolum tesislerinin (a) tsunami öncesi şematik kesiti ve (b) hava fotoğrafı ile (c) tsunami sonrası yıkılan tesislerin hava fotoğrafı (*Hampton* vd., 2002).

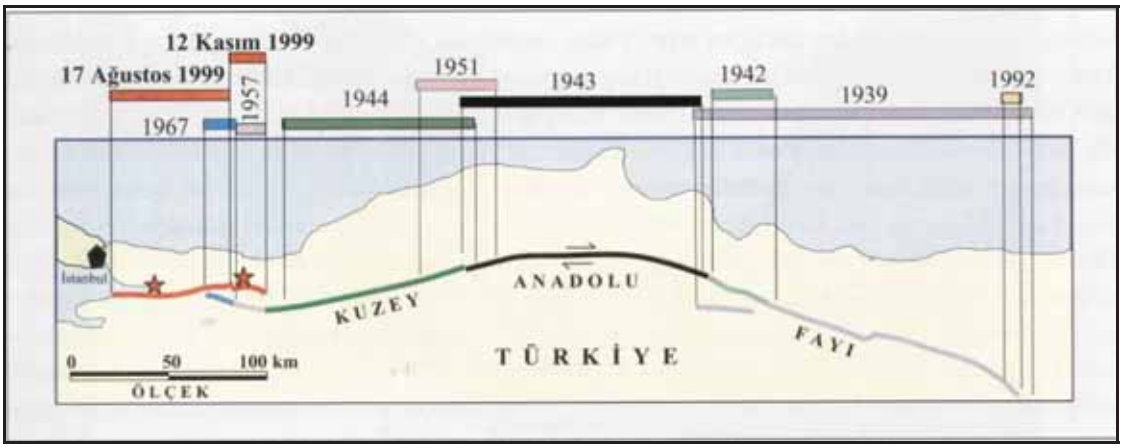
8.7. Kuzey Anadolu Fayı, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ve Marmara Fayları

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Anadolu'nun doğusunda Arap-Afrika ve Avrasya Levhaları arasındaki çarpışma sonucu sıkışarak yılda yaklaşık 20 mm batıya kaçan Anadolu Bloğu'nun, bu hareketi sırasında gelişmiş olan iki önemli faydan biridir. Anadolu'yu, yaklaşık olarak Karadeniz kıyılarına paralel olarak kateden, sağ yanal doğrultu atımlı bu fay (Ketin, 1948; Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Şekil 8.24), dünyadaki en aktif faylardan biri olarak bilinir ve büyük depremler üretir. Barka (1996) ve bazı diğer araştırmacılar, 1939 yılında Erzincan depremi ile başlayan ve 1967 yılına kadar devam eden büyük depremleri dikkate alarak KAFZ üzerindeki depremlerin fay boyunca sistematik olarak doğudan batıya doğru göç etmekte olduğu sonucuna vardıklarını belirtmişlerdir (Şekil 8.25). Bilindiği gibi Marmara Bölgesi'nin doğu bölümünde 17 Ağustos 1999 tarihinde İzmit Körfezi'nde (Gölcük); 12 Kasım 1999 tarihinde Düzce'de önemli hasarlara neden olan iki büyük deprem

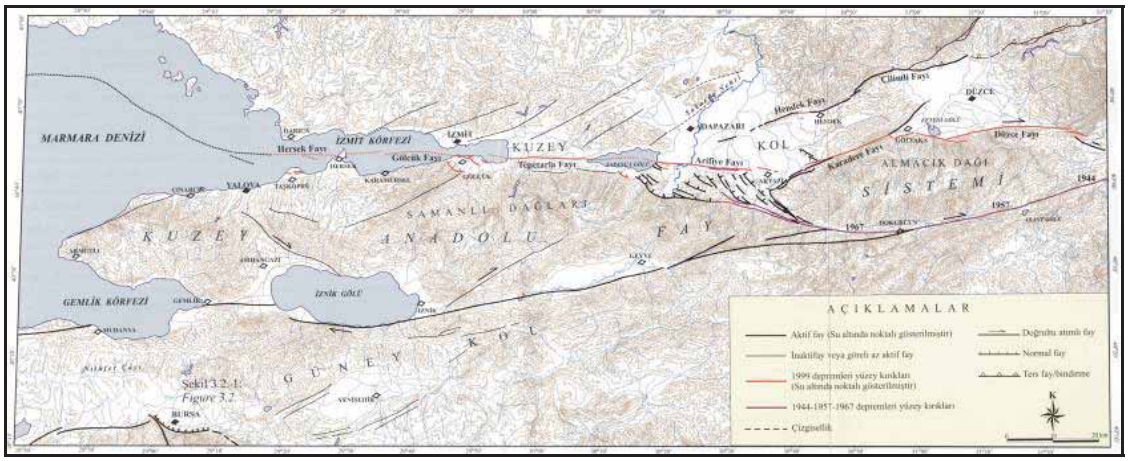
meydana gelmiştir. 17 Ağustos 1999 tarihinde İzmit Körfezi'nde oluşan deprem 20.000'e yakın can kaybına neden olmuştur. Büyüklükleri M_w=7,4-7,5 (İzmit, Gölcük ya da Marmara Depremi) ve M_w=7,1 (Düzce Depremi) olarak belirlenen bu depremler sırasında KAFZ'nda Düzce-İzmit arasında toplam 193 km yüzey kırılması gerçekleşmiştir (Emre ve *Awata*, 2003; Şekil 8.26). Fayın yüzey kırığı ve yapılar üzerinde oluşturduğu hasar, deprem sonrası Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalarda belirlenmiştir (Şekil 8.27, 8.28, Barka vd., 2002; *Awata* vd., 2003).



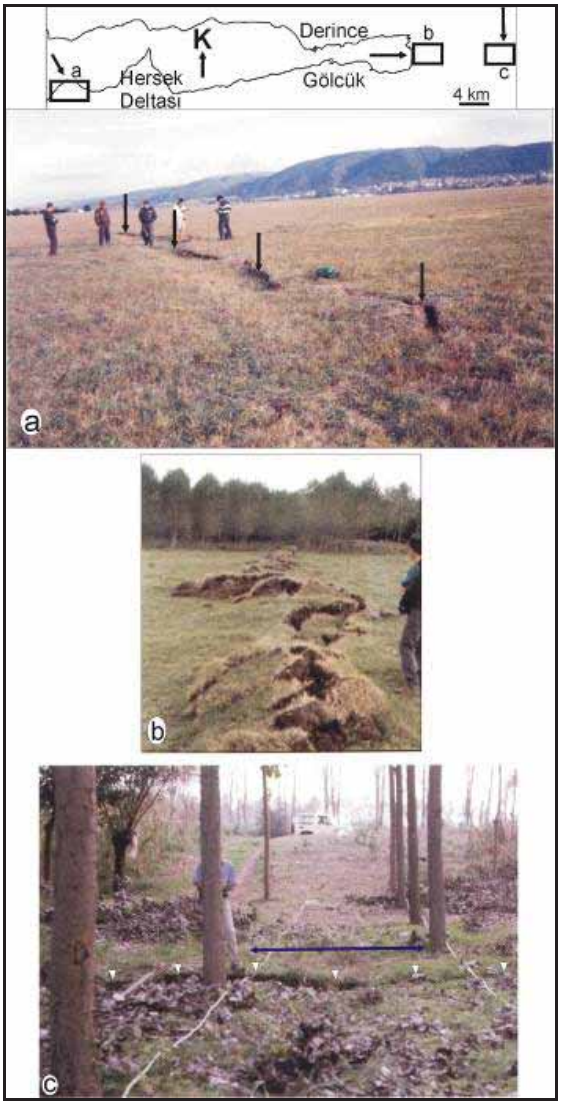
Şekil 8.24. Türkiye Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünün (MTA) Aktif fay haritası. Kırmızı çizgiler diri (aktif) fay yerlerini göstermektedir (Şaroğlu vd., 1992).



Şekil 8.25. Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde son 100 yılda meydana gelmiş olan önemli depremlerin oluşumu sırasında kırılan fay bölümleri (Barka, 1996; Barka vd., 2002).
(Birinci yazarın notu: Kuzey Anadolu Fayı üzerinde oluşan tüm deprem tarihleri ve yerleri dikkate alındığında önemli depremler, doğudan-batıya doğru sistematik bir şekilde kesiksiz ve düzenli olarak devam eder kuralına her zaman uymamaktadır).



Şekil 8.26. 17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 depremleri sırasında kırılan faylar (Emre ve *Awata*, 2003).

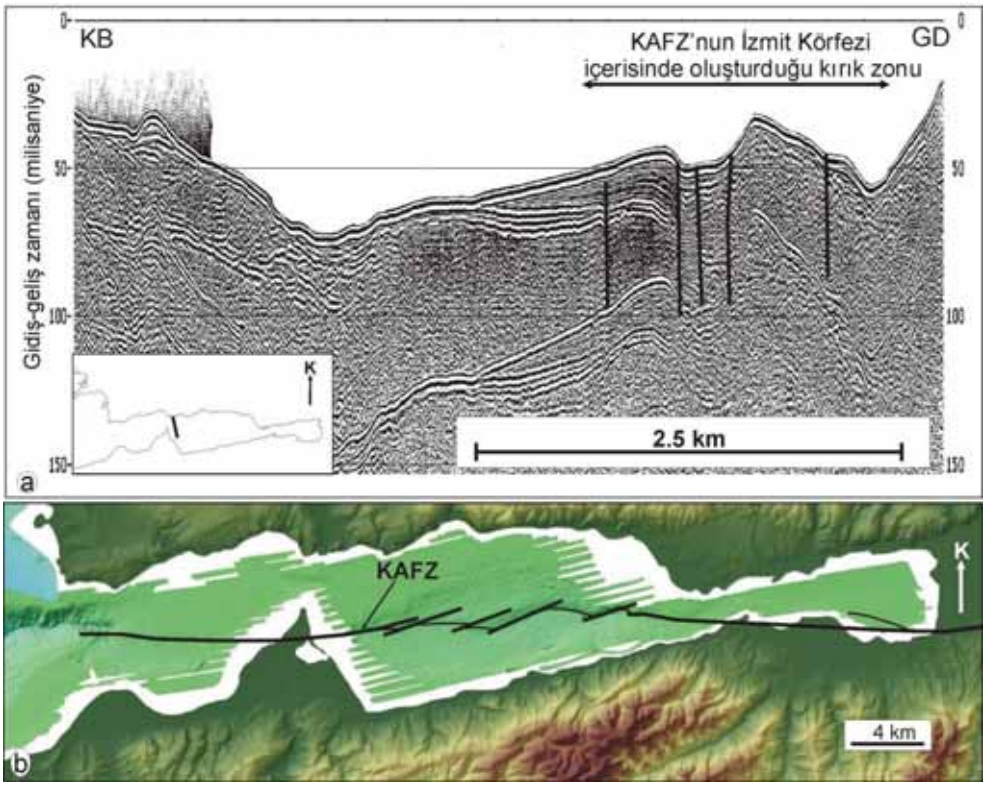


Şekil 8.27. Yanal atım. 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi sırasında oluşan yüzey kırıkları (a ve b); bu kırık tarafından yanal yönde 2,8 m ötelenmiş (c) ağaçlar (*Awata* vd., 2003). Yer mevkiî (=bulduru) haritasında yer alan oklar, bakış yönünü yaklaşık olarak göstermektedir.



Şekil 8.28. Depremin neden olduğu hasarlar. 17 Ağustos 1999 Marmara (=Gölcük veya İzmit Depremi) Depremi sırasında yıkılan binalar *(Awata* vd., 2003).

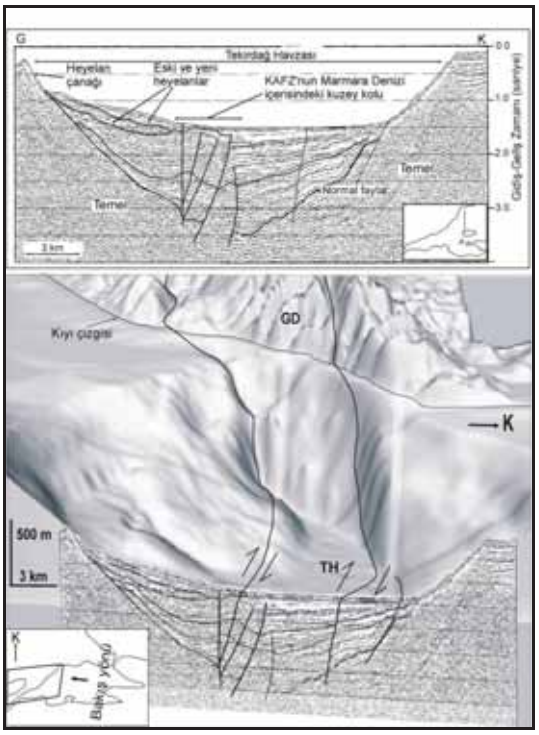
Fayın, körfezin içerisinde yaratmış olduğu kırık, Dz.K.K. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'na (Dz.K.K., SHODB) bağlı TCG Çubuklu, MTA'ya bağlı Sismik-1 ve İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü'ne (İ.Ü., DEBİEN) R/V Arar araştırma gemilerince deprem sonrası toplanmış olan sismik ve çok ışınlı batimetrik veriler yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 8.29). 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ardından, depremlerin KAFZ boyunca batıya doğru göç ediyor olduğu fikri daha da ağırlık kazanmış ve bu nedenle, gelecekte KAFZ üzerinde gerçekleşecek olan büyük depremin Marmara Denizi içerisinde olacağı ve özellikle İstanbul Şehri'nin bundan önemli düzeyde etkilenebileceği sonucuna varılmıştır (Barka, 1999). Bunun ardından MTA, Dz. K.K. SHODB ve Üniversiteler, Marmara Denizi tabanını incelemeye başlamıştır. Bu incelemelerde, MTA'ya bağlı Sismik-1, SHODB'na bağlı TCG Çubuklu ve TCG Çeşme ve İstanbul Üniversitesi DEBİEN'e bağlı R/V Arar araştırma gemileri tarafından toplanan sismik ve çok ışınlı batimetrik verilerin değerlendirilmesi sonucunda, Marmara Denizi'nde öngörülenden daha uzun ve genç bir fayın varlığı, 1942 yılında yapılmış fay haritasına (Pınar, 1942) oldukça yakın bir geometri ile belirlenmiştir (İmren vd., 2001; Gazioğlu vd., 2002; Gökaşan vd., 2003). Daha sonra aynı bölgelerde çalışma yapan Türk-Fransız-İtalyan araştırma grubu da benzer sonuçlara ulaşmışlardır (*Le Pichon* vd., *2001; Armijo* vd., 2002).



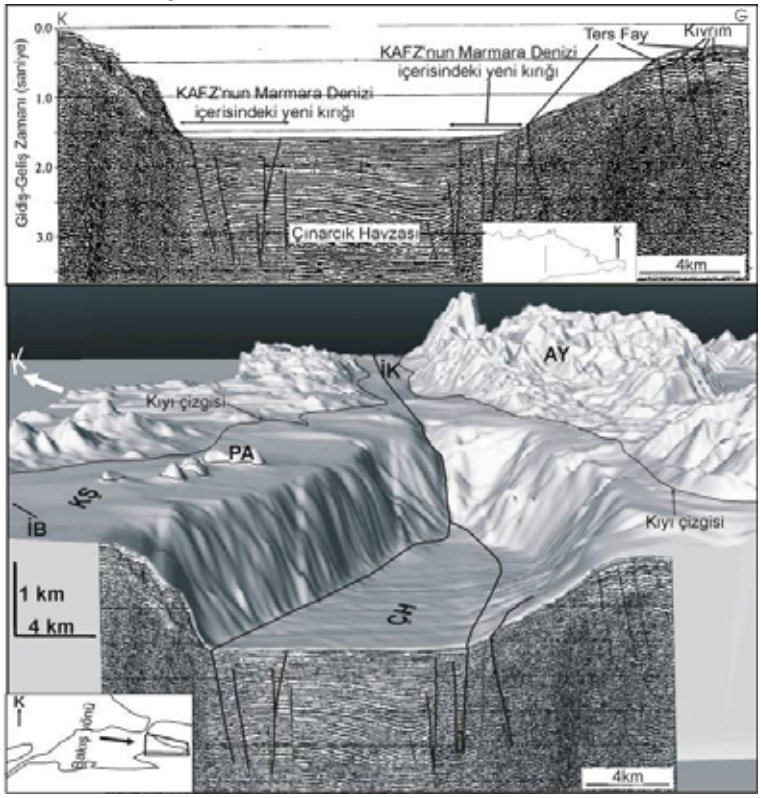
Şekil 8.29. KAF Zonunun İzmit Körfezi içerisinde oluşturduğu kırık zonun sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görünümü (Gökaşan vd., 2001; Dolu vd., 2007).

Günümüz itibarıyla Saros Körfezi içerisinden geçen ve Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) batı parçasını oluşturan Ganos Fayı'nın Gaziköy ile Küçükçekmece Gölü açıkları arasında Marmara Denizi'ni katediyor olduğu, bilim adamları arasında genel hatlarıyla önemli sayılabilecek bir ittifakla kabul edilmektedir (Şekil 8.30.A, 8.31). KAFZ'nin İzmit Körfezi'ne kadar olan bölümünde de yapılan çalışmalar benzer karakterde bir fayın varlığını (İzmit Fayı) işaret etmektedir (Şekil 8.30.B, 8.31). Günümüzde yapılan araştırmalar ağırlıklı olarak İzmit ve Ganos faylarının arsındaki ilişkinin belirlenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu bölümün, "Örnek, Uygulama ve Yorumlar" kısmında, kitabın birinci yazarı tarafından Mart 2011 tarihinde örnek teşkil etmesi açısından çizilmiş bir "Türkiye yeni Aktif (Diri) Fay Haritası" Şekil 8.33'de; T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından 1996 yılında hazırlanmış ve günümüzde geçerli "Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası", Şekil 8.34'de verilmektedir. Şekil 34' yer alan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası üzerine ise tavsiye edilen "1. Derece Deprem Bölgeleri" olması gereken muhtemel ilâve alanlar, Şekil 8.35'de kırmızı çizgilerle taranarak taslak olarak gösterilmiştir (Yıldırım, 2011, YTÜ-yarbis).



Şekil 8.30.A) Marmara Denizi batısı, Tekirdağ Havzası içerisinde KAF Zonunun kuzey kolunun (Ganos Fayı) sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görüntüsü (Gökaşan vd., 2003). GD=Ganos Dağı, TH=Tekirdağ Havzası.



Şekil 8.30.B) Marmara Denizi doğusu, Çınarcık Havzası içerisinde KAF Zonunun kuzey kolunun (İzmit Fayı) sismik ve batimetrik veriler üzerindeki görüntüsü (Gökaşan vd., 2003). İB=İstanbul Boğazı, PA=Prens Adaları, ÇH=Çınarcık Havzası, KŞ=Kuzey şelfi, İK=İzmit Körfezi, AY=Armutlu Yarımadası.



Şekil 8.31. Kuzey Anadolu Fay Zonunun Marmara ve Ege Denizleri içerisinde kalan deniz altı bölümündeki aktif faylar.

8.8. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:

8.8.1) YORUM: Türkiye Yeni Aktif (Diri) Fay Haritası, Deprem Bölgeleri ve Aktif Fay - Dalma/Batma Zonu İlişkisi

1992 yılından beri günümüzde de geçerli ve kabul gören ve en son 2012 yılında yenilenerek geliştirilmiş Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'ne ait (MTA) Türkiye Aktif (diri) Fay Haritasının daha da revize edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Şekil 8.32 A'da 1992 yılında, B'de ise 2012 yılında MTA tarafından hazırlanmış, ilâve fayların da yer aldığı yeni geliştirilmiş daha doğru Türkiye Aktif (diri) Fay Haritası görülmektedir. Kitabın birinci yazarı tarafından Mart 2011 tarihinde revize edilmiş, aktif fay uzantı ve eksikliklerin muhtemelen büyük bir bölümünün giderilerek çizildiğine ve gelecekte örnek teşkil edeceğine inandığı, tavsiye edilen yeni bir aktif fay haritası ile muhtemel ilâve 1. Derece Deprem Bölgeleri Haritası hazırlanmış, Şekil 8.33 ve Şekil 8.35'de sunulmuştur (Yıldırım, 2011, YTÜ yarbis).

Fayların aktifliğin belirlenmesinde, en önemli unsurların başında, yersel ve bölgesel arazi çalışmaları yanında, hava fotoğrafları (ortofoto) incelemeleri, zamana bağlı aşınmaya fırsat bulamamış ve çizgisellikleri kaybolmamış güncel morfolojik yapılar, tabiî akarsu ağı ve drenajının anî kesikliklere uğramaları, ana vâdilere birleşen olgun evreye ulaşmamış çengel biçimli dere yatakları, şahit tepeler ve diğer aktif tektonizma ürünü veriler, aktif fayların varlığının tespitinde dikkat edilecek hususların başlıcalarıdır. Aktif fayların varlığı, arazi çalışmaları ile diğer jeolojik, yapısal verilerle de denetlendiğinde ve dikkate alındığında Şekil 8.33'deki gibi ortaya yeni bir aktif fay haritası çıkacağı düşünülmektedir. Ayrıca mevcut en son 1996 yılında yapılmış "Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası"nda, Deprem Bölgeleri sınırlarının da yeni aktif fay ve uzantılarının dikkate alınarak revize edilmesi gerektiği, büyük önem taşıyan 1. derece deprem bölgelerinin yeniden belirlenerek daha geniş alanları kaplaması gerektiğine inanılmaktadır. Zira inşaat mühendisliği açısından can ve mal emniyetinin sağlanması, deprem bölgeleri esas alınarak yapılan inşaatlarda yapılan

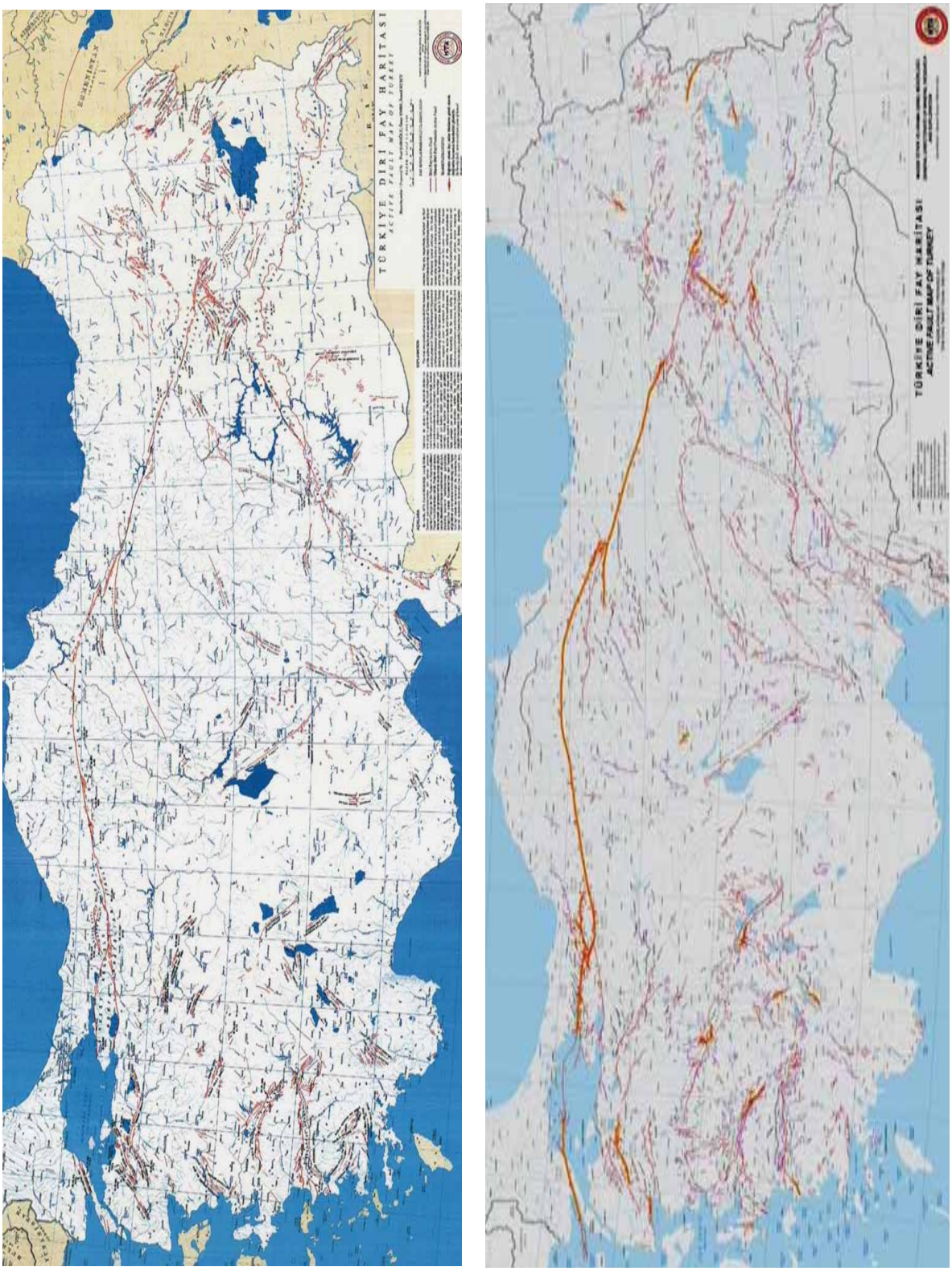
hesapların doğruluğu, büyük ölçüde doğru derecelendirilmiş deprem bölgeleri haritalarına bağlı olmaktadır. Şekil 8.33'de verilen 1. derece deprem bölgelerinin, yeni aktif fay haritası üzerinde gösterilen aktif faylara yakınlıkları da göz önüne alınıp yeniden hazırlanması durumunda; Şekil 8.34'de yer alan ve günümüzde kabul gören Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasının değişebileceği, Şekil 35'de yer alan haritada birinci derece deprem bölgelerinin muhtemelen daha geniş alanları kaplayabileceği görülecektir. Kitabın birinci yazarı tarafından 1. derece deprem bölgelerinin daha geniş yer kaplayacağı ilâve alanlar (yerleşim alanları ve şehirler ile birlikte) ve Akdeniz sahil şeridinin tümünü de kapsayacak şekilde, taramalarla yaklaşık olarak Şekil 35'de gösterilmiştir. Aktif fay haritası ve deprem bölgeleri haritası üst üste çakıştırılıp her iki harita birlikte değerlendirildiğinde ise ortaya Türkiye'nin yeni "sismotektonik haritası" çıkacağı görülecektir. Bu nedenle, detaylı sonuçların elde edilebilmesi için yapılması gerekli detaylı arazi çalışmaları yanında sismik veriler, sismometre ağının ve erken uyarı sistemlerinin yaygınlaştırılması gerektiği açıktır. MTA'nın günümüzde aktif fay haritalarına yönelik yeni ilâve yapacağı çalışmalarda, Şekil 8.33'de yer alan yeni aktif fay haritasının yardımcı kaynak olabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde resmî kabul gören Şekil 8.34'deki Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası incelendiğinde, Türkiye'nin güney Akdeniz yakın sahil şeridi boyunca 1. deprem bölgesi haricinde 2, 3, 4 hattâ 5. Derece Deprem Bölgeleri'nin yer aldığı görülmektedir. 1. Derece Deprem Bölgesi içinde yer alması gerekli, ancak 4. veya 5. Derece Deprem Bölgesi içinde gösterilen alanlarda mevcut kabul edilen deprem bölgeleri ve bu bölgelere uygun şartnameler esas alınarak inşa edilmiş, mevcut yapıların, deprem şartnamelerine uygun yapılmış olsalar dahi, deprem bölgesi derecesinin farklılık göstermesi durumunda, mühendislik hizmetlerinin yeniden gözden geçirilmesini gerekli kılacaktır. Diğer bir ifâde ile Türkiye'nin güney Akdeniz yakın sahil şeridi boyunca 1. Derece Deprem Bölgesi haricinde 2, 3, 4 hattâ 5. Derece Deprem Bölgeleri olarak belirtilen alanların, hesaplamalarda doğru olarak kabul edilmesi, muhtemelen çizilmemiş veya farkına varılmamış, ancak var olduğu düşünülen aktif fayların eksikliği (*Beurlen*, 1975) veya yerleşim yerlerinin aktif faylara olan uzaklıklarının henüz belirlenmemiş olması durumunda, mühendislik hesaplarında da doğru değerlendirmelerin yapılabilmesi mümkün olamayacaktır. Ayrıca Türkiye'nin Akdeniz güney yakın sahil şeridi 1. Derece Deprem Bölgesi içinde yer almak zorunda olduğu ve yapıların tasarımında da 1. derece deprem bölgesi olarak kabul edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Türkiye güneyi Akdeniz sahil şeridinde de tek bir aktif fay olmadığı varsayılsa bile bu sahil şeridinin tamamı, dalma-batma zonuna bakan aktif kıta kenarında (çarpışan kıta) yer alması nedeniyle yine 1. Derece Deprem Bölgesi içinde yer alma ihtimalî çok yüksek olmalıdır (Şekil 35, Yıldırım, 2011). Zira buna neden olan mekanizmanın, faylardan daha etkili olan ve yılda yaklaşık 4 santim kuzeye doğru ilerleyen Afrika Kıtası Levha'sının Akdeniz'in derin deniz tabanını oluşturan dalma batma zonunun, Akdeniz sahil şeridine yakın ve deniz dibinde bu sahil şeridine paralel olarak uzanmasından kaynaklanacağı düşünülmektedir (Şekil 36). Dalma batma zonu aynı zamanda, Türkiye güney sahil kıyı şeridinden itibaren güneye Akdeniz'e doğru, deniz dibi topoğrafyasının çoğu yerde sahilden birkaç km ilâ birkaç on kilometre arası gibi açıkta anîden derinleşerek, deniz dibi dik yamaçlarının oluşmalarına

neden olmuştur ve olmaktadır. Dalma batma zonunun oluşturduğu deniz dibi çukurluklarından en derini ise Akdeniz'de Rodos Adası güneyinde 4.900 metreye kadar ulaşabilmektedir. Akdeniz sahil şeridi güney yakınında ve sahil şeridine yaklaşık paralel uzanan yüzlerce km uzunluğunda yer alan mevcut aktif dalma batma zonu, dünyada diğer örneklerinde de görüldüğü gibi yanal atımlı faylardan çok daha yüksek büyüklükte deprem üreten aktif büyük kırık zonları olup Şekil 8.36'da bu aktifliği oluşturan sınırlar görülmektedir ve seyrek de olsa, 500 yıl gibi bir sürede dalma batma zonunun 450 km'yi aşan bir kesimi kırıldığında, oluşacak büyük depremler, tsunami oluşturacağından, büyük hasarlara neden olacaklardır (Yıldırım, 2011). Türkiye Akdeniz sahil şeridine çok yakın yer alan bu dalma batma zonu, deprem bölgeleri haritalarında, depremleri derecelendirmede öncelikle dikkate alınması ve göz ardı edilmemesi gerektiği düşünülmektedir.

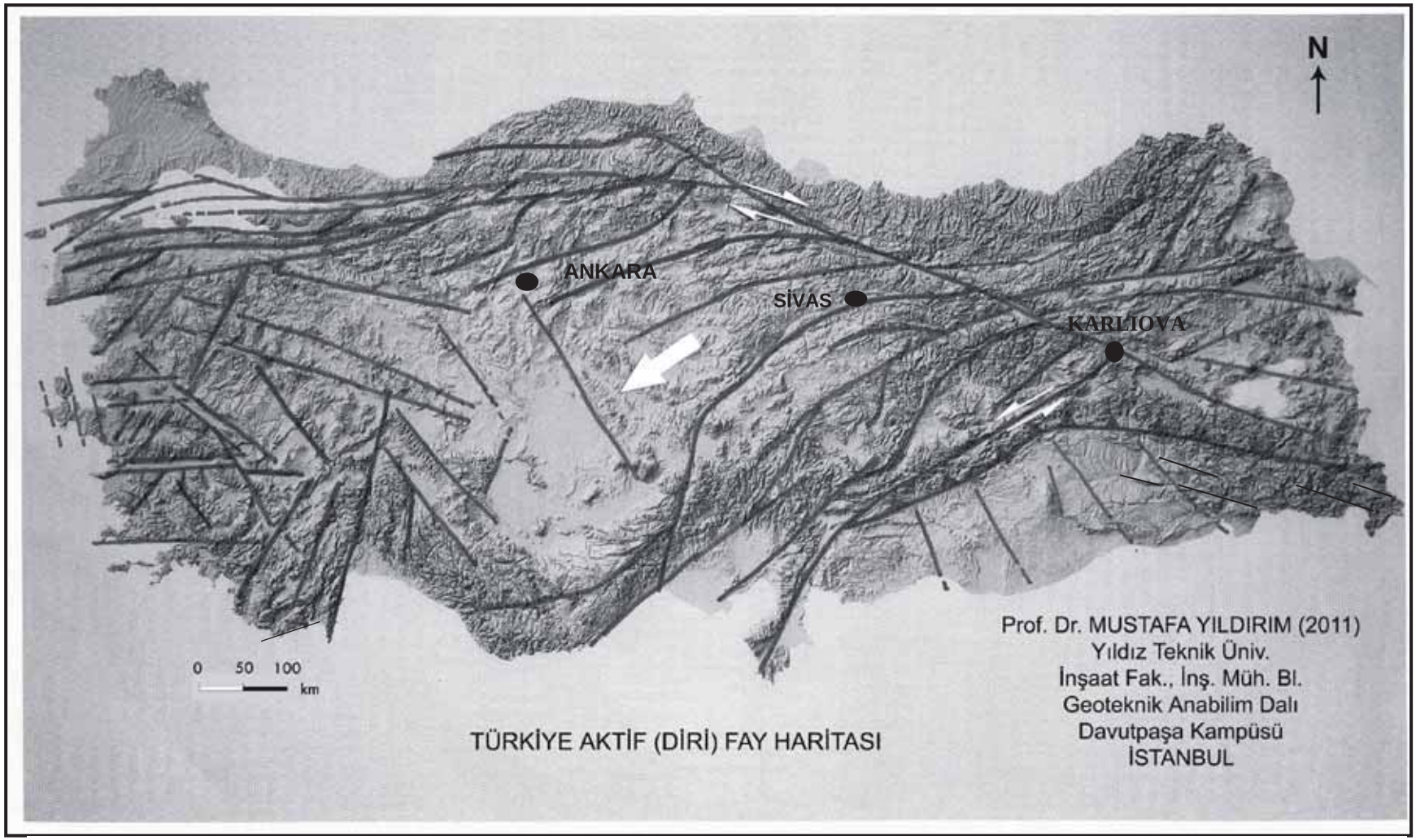
Dünyada diğer dalma batma zonlarına bakan sahil şeritlerine örnek olarak Endonezya'nın *Sumatra* Adaları güneybatısı (Şekil 8.37), Japonya doğusu (Şekil 8.38) ve Güney Amerika batı sahil şeritleri gösterilebilir (Şekil 8.39). Tıpkı tüm Akdeniz kuzey sahillerinde (Türkiye güney sahilleri) görüldüğü gibi dalma batma zonu tarafında yer alan bu sahil şeritlerinin yerleşim alanlarının tamamında, deprem şartnamelerine uygun yapılmamış yapılarda, dalma batma zonunun kırılma uzunluğuna bağlı olarak büyük hasarlar meydana gelebildiği görülmektedir. Örnek olarak tüm zamanların *Richter* Skalası'yla ölçülmüş en büyük depremi 22 Mayıs 1960 tarihinde M_W= 9,5 büyüklüğünde meydana gelen Büyük Şili Depremi'dir (Şekil 8.39). Yakın tarihte oluşan yıkıcı depremlerde vardır. Bunlardan biri; 26 Aralık 2004'de, Endonezya *Sumatra* Adası güney batısında Hint Okyanusu'nda dalma-batma zonunda meydana gelen depremdir. 9,1-9,3 (M_W) büyüklüğündeki bu depremde, deprem sonrası 30 m yüksekliğe ulaşan tsunami dalgaları, sahile yakın bölgelerde bulunan 230.000 insanın boğularak ölmesine neden olmuştur. Güncel diğer bir örnek ise 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın Pasifik Okyanusu'na bakan dalma-batma zonunun da yer aldığı doğu sahilinde, dalma-batma zonunda oluşan 750 km uzunluğundaki bir kırık, 9,0 (M_w) büyüklüğünde bir depremi oluşturmuştur. Dalma-batma zonunda okyanus dibinde oluşan kırığın neden olduğu deprem, Japonya'nın doğu sahil şeridinde yer alan *Sendai*, *Fukuşima* bölgesinde oluşturduğu 17 m yüksekliğe ulaşan tsunami, yaklaşık 20.000 insanın boğularak hayatlarını kaybetmelerine neden olmuştur. Görüldüğü üzere, magnitüdü büyük depremler, dalma batma zonuna bakan sahil şeritlerinde seyrek ama çok etkili ve büyük hasarlar yanında tsunamiden dolayı da büyük can kayıplarına neden olmaktadır.

Sonuç olarak dalma batma zonları yakınında yer alan ve bu zonlara bakan sahil şeritlerinin tamamında ve Türkiye'de dalma batma zonuna bakan Akdeniz sahil şeridinde de, deprem haritasında gösterilen 2, 3, 4 hattâ 5. derece gibi deprem bölgelerinin doğru derecelendirilmiş olduğu pek mümkün görülmemektedir. Bu sebeplerden dolayı, seyrek de olsa, dalma batma zonunun oluşturacağı mega (=devasa) bir deprem, bilhassa deprem olmayacağı varsayılan yerlerde dâhil olmak üzere, tüm Türkiye Akdeniz sahil şeridi boyunca daima kayıplara ve hasarlara neden olabileceği varsayılarak, gerekli mühendislik önlemlerinin de alınması tavsiye edilmektedir (Yıldırım, 2011).

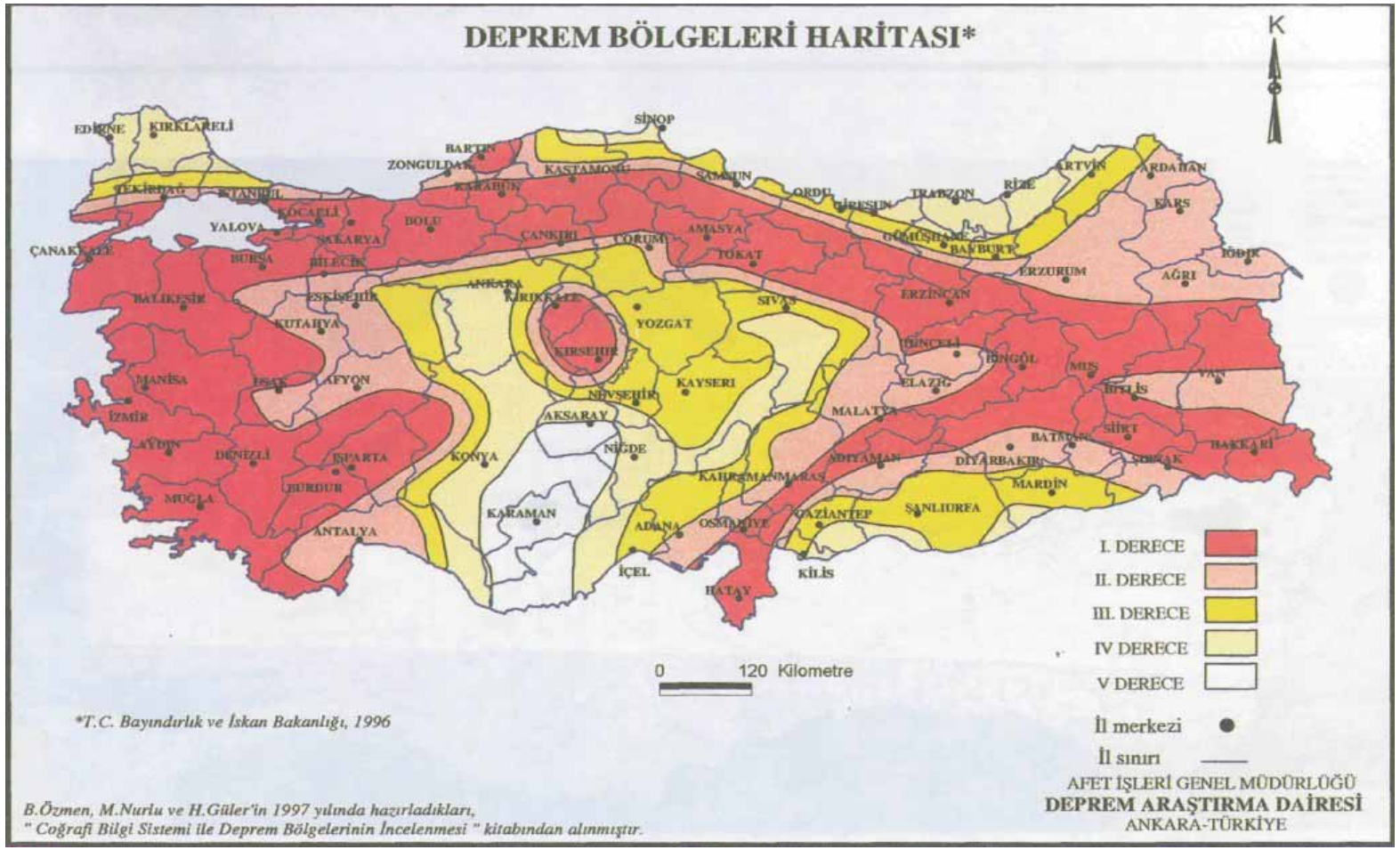


A **B**

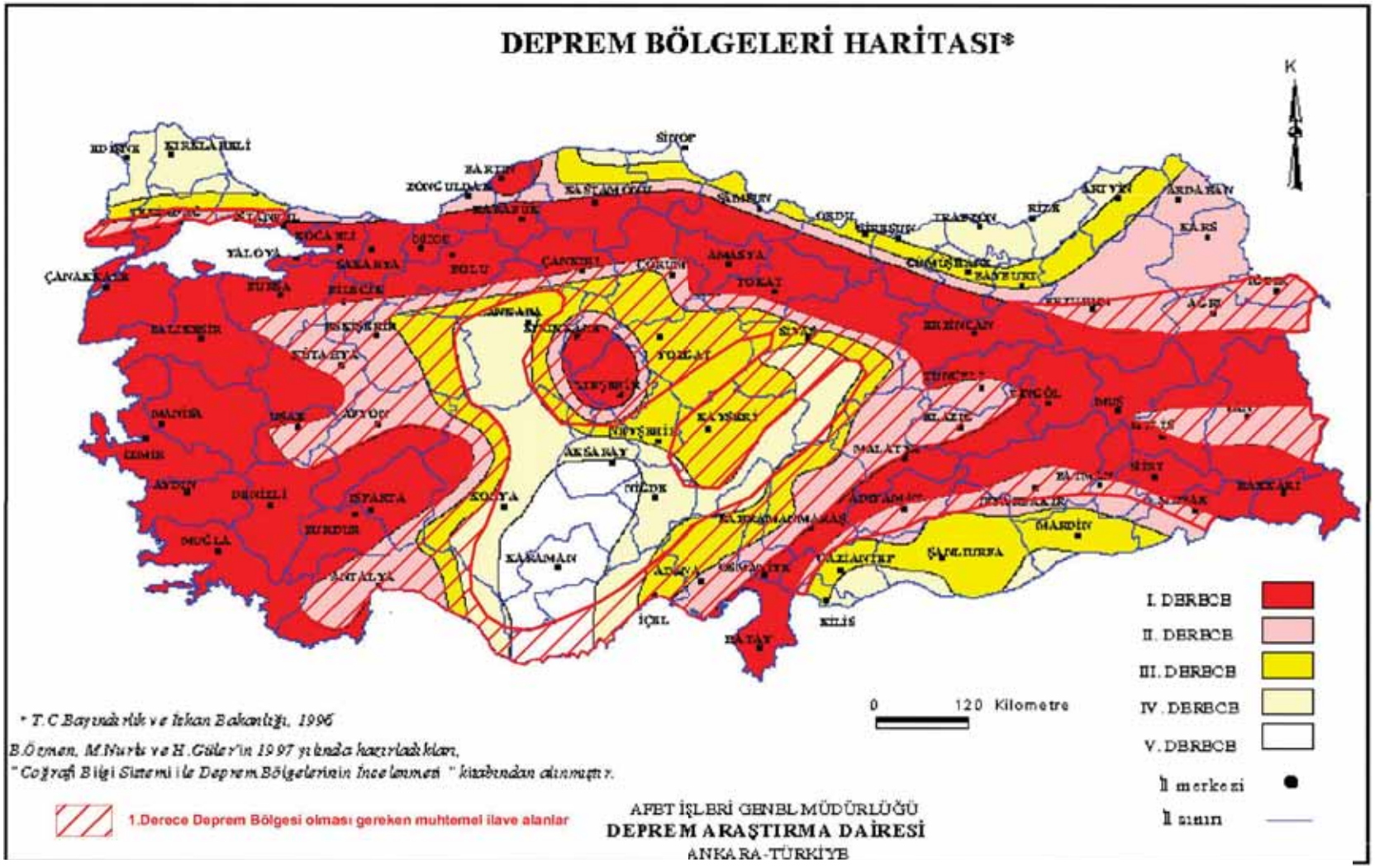
Şekil 8.32. Maden Tetkik Arama Enstitüsüne (MTA) ait **A)** 1992 yılı ve **B)** 2012 yılı Türkiye Aktif (diri) Fay Haritası. Harita üzerindeki kırmızı çizgiler Aktif (diri) Fayları göstermektedir.



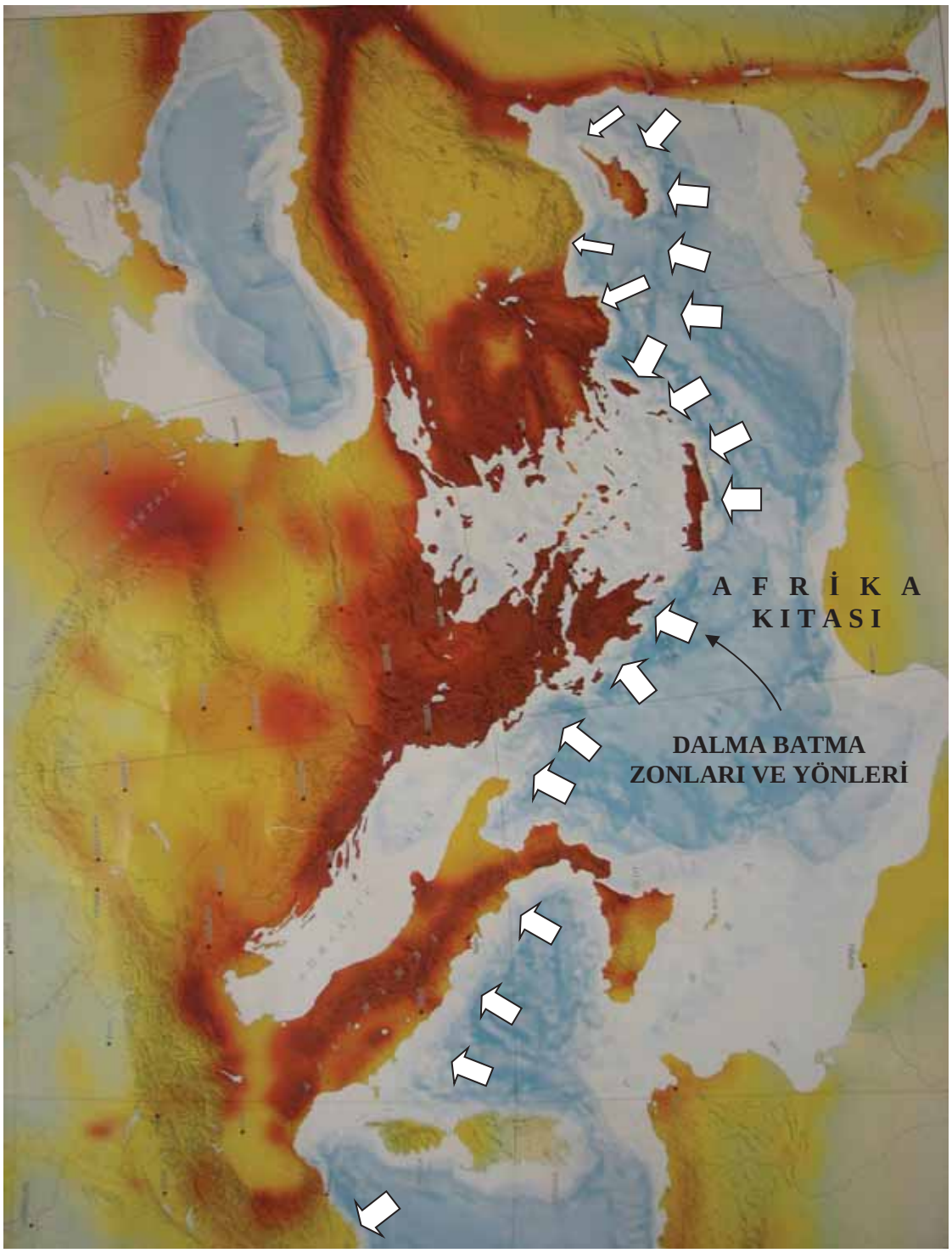
Şekil 8.33. Türkiye'nin tavsiye edilen yeni Aktif (diri) Fay Haritası. Bu yeni haritada siyah kalın çizgilerle gösterilen aktif fayların, Şekil 8.32'de günümüzde kabul gören ve kırmızı çizgilerle gösterilen faylardan ve uzantılarından çok daha fazla olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca sadece bu haritada ilâve edilmiş aktif (diri) ve yüzlerce kilometre uzanan yeni aktif fayların da tespit edilip çizildiği, bunların yerinde denetlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere Türkiye Güney sahillerine kadar uzanan Doğu Anadolu Fayı'nın da birden fazla ve dört ana koldan oluşması gerektiği yapılacak detaylı çalışmalarla denetlenmelidir (15 Mart 2011).



Şekil 8.34. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (1996). Günümüzde de geçerli görülen bu haritada kırmızı renkli şeritler hâlinde gösterilen zonlar 1. Derece Deprem Bölgeleri'ni oluşturduğu ve bu zonların Şekil 8.32'de kırmızı çizgiler ile gösterilmiş diri faylar boyunca yer aldığı görülmektedir.



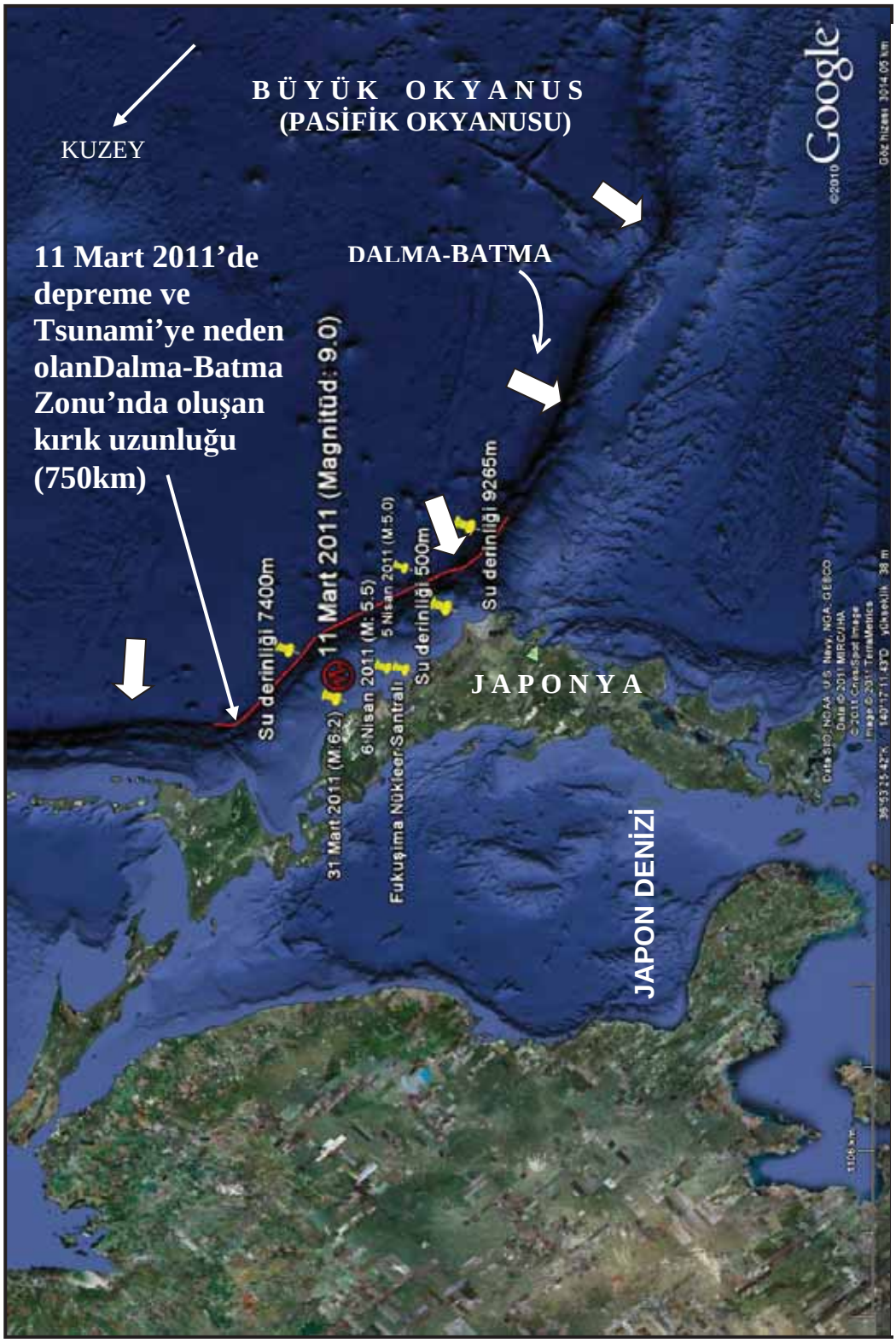
Şekil 8.35. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası üzerinde 1. Derece Deprem Bölgeleri içinde yer alması gereken muhtemel ilâve alanlar. Bu alanlar birinci yazar tarafından kırmızı renkli çizgiler ile ilâveten taranmış olarak gösterilmektedir. Şekil 8.33'de yer alan aktif fay haritası, bu şekil içinde mevcut olan Deprem Bölgeleri Haritası ile çakıştırıldığında, ortaya aktif (diri) fayları ve deprem bölgelerini gösterir yeni bir "Sismotektonik Harita" çıkmaktadır. (Yıldırım, 2011).



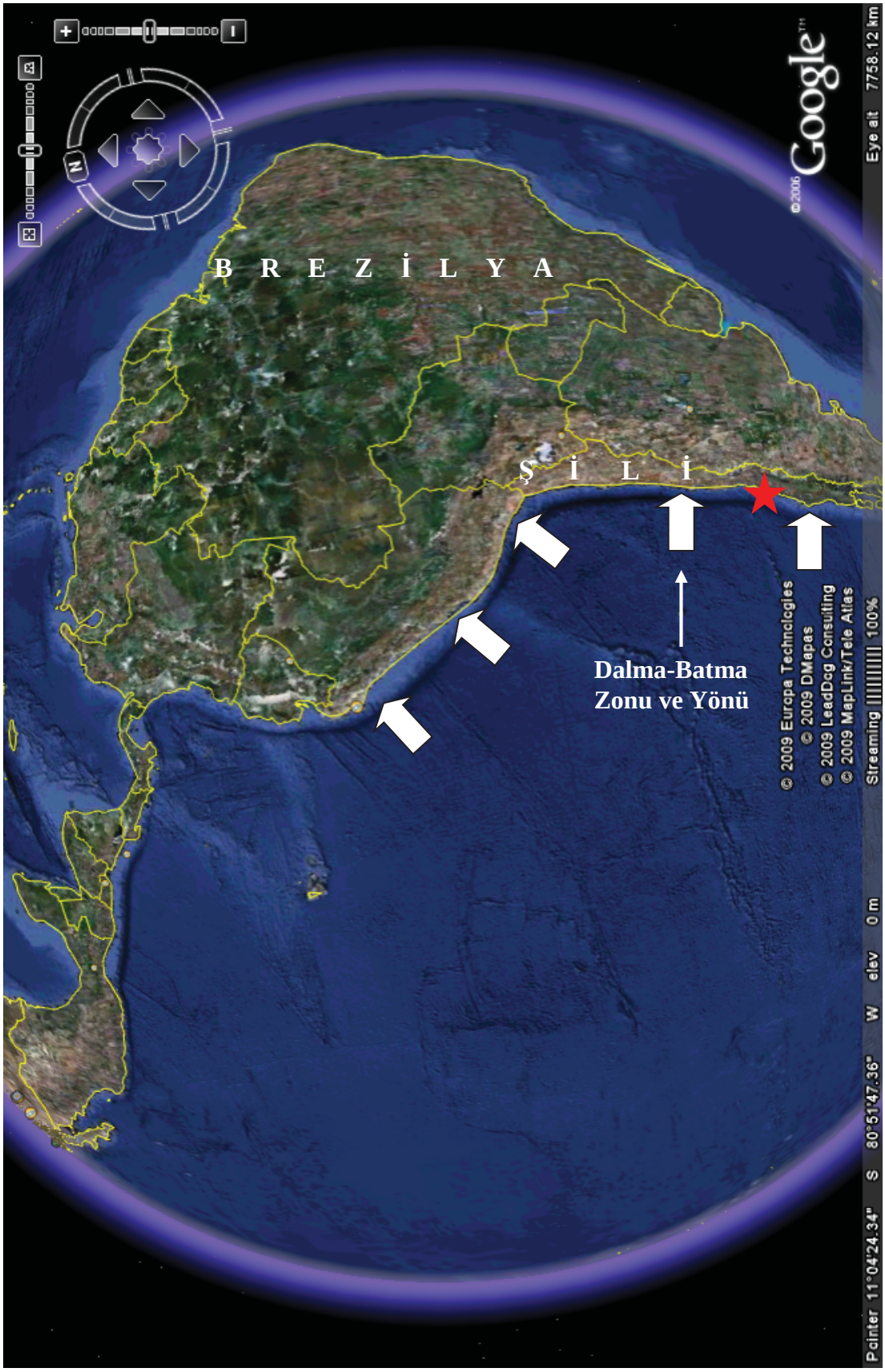
Şekil 8.36. Dünya'nın en büyük iç denizi olan Akdeniz'in, tabanında yer alan Dalma-Batma Zonları ve yönleri. Türkiye, Yunanistan, İtalya ve İspanya vd. Akdeniz'e bakan ülkelerin sahil şeritleri Aktif Dalma-Batma Zonu tarafında yer almakta olup, bu sahil şeritleri 1. Derece Deprem Bölgesi içinde gösterilmesi gerekmektedir.



Şekil 8.37. 26 Aralık 2004 Sumatra Depremine neden olan Dalma-Batma Zonu ve yönü M_W=9,1 – 9,3 .



Şekil 8.38. Fukuşima Depremi. Japonya doğusunda 11 Mart 2011'de Pasifik Levha'sının Avrasya Kıtası altına dalan, Dalma-Batma zonunda, yeri ve uzunluğu kırmızı bir çizgiyle gösterilen kesim, kırılarak M_W= 9.0 büyüklüğünde bir depremi oluşturmuştur. Deprem sonrası oluşan ve yüksekliği 7 m'yi geçmeyeceği tahmin edilerek projelendirilen setler yetersiz kalmış ve 17 m, yer yer de lokal olarak bazı körfezlerde 38 m'ye ulaşan dev dalgalar (tsunami) büyük mal ve can kayıpların oluşmasına neden olmuştur. Şekilde, Pasifik Levhası'nın Avrasya Kıtası altına senede yaklaşık 8 cm dalarak ilerleyen dalma-batma zonu boyunca ve dalımı nedeniyle oluşturduğu deniz dibi hendeği görülmektedir.



Şekil 8.39. 22 Mayıs 1960 Şili Depremi (M_W: 9,5) ve Dalma-Batma zonu.

8. Bölümün Özeti

Litosfer ile manto arasındaki dinamikten kaynaklanan levha tektoniği sistemi, yerkürenin kırılgan litosfer katındaki değişim ve gelişimini (tekâmül, evrim) kontrol eden en önemli faktörlerden birisidir. Günümüzde de etkin olan ve aktif tektonik olarak adlandırılan bu dinamik, yeryüzündeki büyük ve yıkıcı depremlerin de en önemli kaynağını oluşturmaktadır. Yer sarsıntısı olarak adlandırılan depremler, bir bölgede kırılgan litosfer katmanı üzerinde etkili olan gerilmenin, zaman içerisinde kayacın mukavemetini yenerek onu anîden kırması (fay) ile meydana gelirler.

Depremin büyüklüğü ve şiddeti farklı kavramlardır. Deprem büyüklüğü (magnitüd), yer kabuğunda deprem sırasında açığa çıkan tüm enerjinin düzeyini belirten bir ölçüdür ve aletsel bir büyüklüktür. Bu yöntem ilk olarak *Charles Richter* tarafından bulunduğu için, ölçeğe de *Richter* ölçeği denmiş olup bu ölçek logaritmiktir. Şiddet ise deprem büyüklüğünün doğurduğu bir sonuçtur. Diğer bir ifâdeyle deprem şiddeti, yer hareketinin yeryüzünün belirli bir noktasında yapılar ve insanlar üzerinde bıraktığı etkinin derecesidir ve *Mercalli* Şiddet Skalası'na göre belirlenir. Depremlerin oluşması sırasında iki farklı özelliğe sahip dalga açığa çıkar. Bu dalgalardan titreşim hareketi yayılma doğrultusunda olan ve kayıt merkezine ilk gelen P (primer) dalgaları, içerisinden geçtikleri cisimlerin partiküllerini birbirine yaklaştırır veya uzaklaştırırlar. Hızları P dalgalarına kıyasla daha az olan ve bu nedenle kayıt merkezlerine ikincil olarak gelen S (sekonder) dalgaları ise içerisinden geçtikleri cisimlerin partiküllerini kendi yayılma doğrultusuna dik yönlerde hareket ettirirler. Yer kabuğunun nispeten üst kesimlerinde etkili olan, kayıt merkezine en son gelen, P ve S dalgalarına kıyasla da hızları daha az, periyotları daha büyük olan ve P ve S dalgalarının bileşiminden oluşan yüzey dalgaları ise kayaçların taneleri üzerinde su dalgasına benzer bir etki yaratır. S ve yüzey dalgalarının yıkım etkisi yüksektir.

Depremlerde gözlenen yapısal hasara sebep olan önemli bir etki de zeminde hiçbir göçme olmadığı hâlde, zemin koşullarının yapılara etkiyen sarsıntı şiddetine ve dolayısı ile üzerindeki yapıların göreceği hasara yaptığı etkidir. Yerel zemin koşulları, deprem sırasında yapılara etkiyen yer ivmesinin

genliğini, frekans özelliklerini ve buna bağlı olarak da atalet kuvvetlerini büyük ölçüde etkilemektedir.

Depremlerin zeminde yarattığı en önemli tehlikelerden biri sıvılaşmadır. Sıvılaşma, depremin yarattığı etki ile boşluk suyu basıncındaki anî artışa paralel olarak kohezyonsuz zeminlerde mukavemetin kaybolması ve zeminin bir sıvı gibi davranmasıdır. Sıvılaşma, sıkılık derecesi, tane özellikleri, kil içeriği ve drenaj şartları gibi zeminin yapısı ile ilgili özelliklere ve ayrıca oluşan yüklemenin (deprem) şiddeti ve süresi gibi dış etkenlerin özelliklerine bağlı olarak meydana gelir. Sıvılaşma, yapıların deprem sırasında zemine gömülmelerine, devrilmelerine, düşeyden saparak yana eğilmelerine yol açan taşıma gücü kaybı gibi neticeler ortaya çıkarabilir. Bu nedenle yerel zemin koşullarının yapı davranışına ve deprem hasarına etkisi iyi belirlenmelidir. Yapıların inşaasından önce yapılan temel zemini etütlerinde; arazideki temel zeminini oluşturan tabakaların muhtemel bir deprem sırasında göstereceği davranış incelenmelidir. Depremler sırasında gözlenen yapısal hasar, zemin yüzünde büyük deplâsmanlara yol açan toptan zemin göçmelerinin sonucu oluşmuşsa, meydana gelen yapısal hasar ile yerel zemin koşulları arasındaki ilişki açık olarak görülebilir. Yani gevşek yerleşimli taneli zeminler, yer sarsıntıları sonucu sıkışarak zemin yüzünde toplam ve farklı oturmalara ve böylece taşıdıkları yapılarda büyük yapısal hasarların oluşmasına yol açabilmektedirler. Gevşek yerleşimli dâneli zemin tabakalarının suya doygun olması hâlinde ise titreşimlerin yol açtığı sıkışma sonucu boşluk suyundaki hidrostatik basınç artışı, zeminin sıvılaşmasına ve üzerindeki yapıların oturması, yatması veya zeminin içine batması gibi son derece olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Ayrıca depremler sırasında oluşan dinamik gerilmeler ve boşluk suyu basıncı artışları, yumuşak kil ve kum tabakalarında büyük toprak kaymalarına ve şev göçmelerine yol açabilmektedirler.

Depremler sonucu gelişen bir başka yıkıcı olay ise kıyılarda ve kıyı gerilerindeki düşük kotlardaki alanlarda etkili olan tsunamilerdir. Liman dalgası anlamına gelen tsunami, sahil kıyılarında çok büyük hasarlara neden olan uzun periyotlu deniz dalgalarıdır. Deniz tabanında fay veya denizaltı heyelânları tarafından tetiklenen tsunamiler, rüzgâr etkisiyle kısa mesafede yüzeyde oluşan dalgaların aksine, tüm su kolonu boyunca etkilidir. Bu durum

tsunaminin, rüzgâr dalgalarına göre kıyılarda çok daha yıkıcı bir etkisinin olmasına neden olmaktadır.

Ülkemizdeki en yıkıcı depremleri oluşturan fay, Anadolu'yu kuzey kıyılarına paralel olarak baştan başa kateden sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu'dur (KAFZ). Bu fayın son yüzyılda meydana getirmiş olduğu büyük depremler, aktivitesinin ekseriyetle doğudan-batıya doğru gelişiyor olduğu yönünde bir genel kanaat taşımaktadır. Fayın 1999 yılında yaratmış olduğu son iki büyük depremin ardından yapılan çalışmalar, gelecekte olacak depremin de muhtemelen Marmara Denizi içerisinde gerçekleşeceği yönündedir. Marmara Denizi içerisinde yapılan çalışmalar KAF'ın bu alanda, batıda Saros Körfezi ile Küçükçekmece açıklarına kadar uzanan Ganos Fayı ile doğuda İzmit Körfezi ile İstanbul Boğazı açıklarına kadar uzanan İzmit Fayı'ndan oluştuğunu işaret etmektedir. Bu fayların Marmara Denizi içerisindeki ilişkilerinin belirlenmesi çalışmaları devam etmektedir.

Türkiye'deki aktif faylar ve bu fayların oluşturduğu depremlerde oluşabilecek her türlü maddî ve manevî zararlardan korkulmaması için inşaat mühendisleri denetiminde, jeolojik, jeofizik ve geoteknik incelemeleri yapılmış, depreme dayanıklı *(earthquake-resistant)*, mühendislik önlemleri alınmış, diğer bir ifâdeyle mevcut "Deprem Şartnameleri"ne uygun ve işlerlikli bir denetim mekanizmasının da geçerli olduğu bir ortamda yapılar inşa edilmelidir.

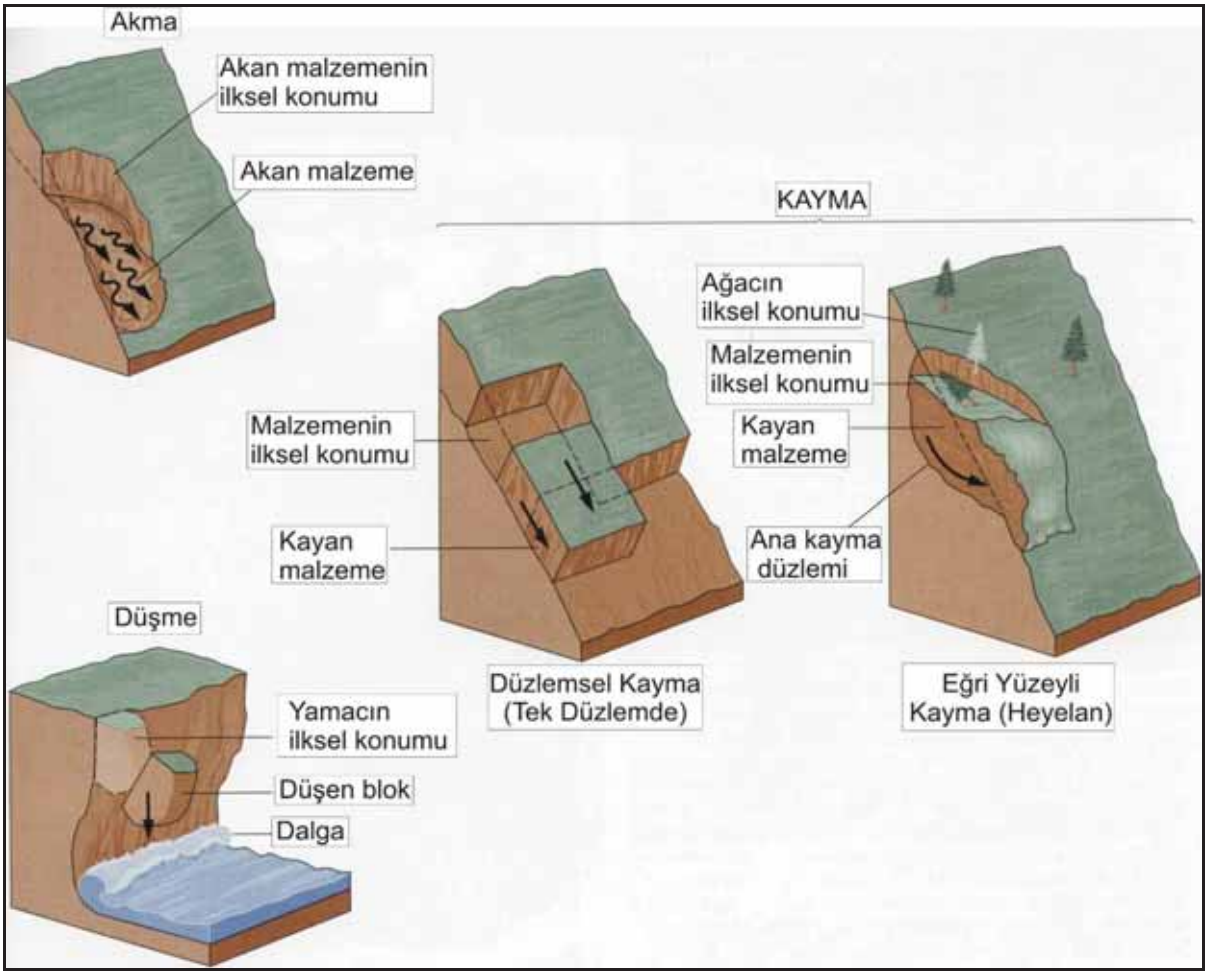
9. BÖLÜM: KÜTLE HAREKETLERİ

9.1. Giriş

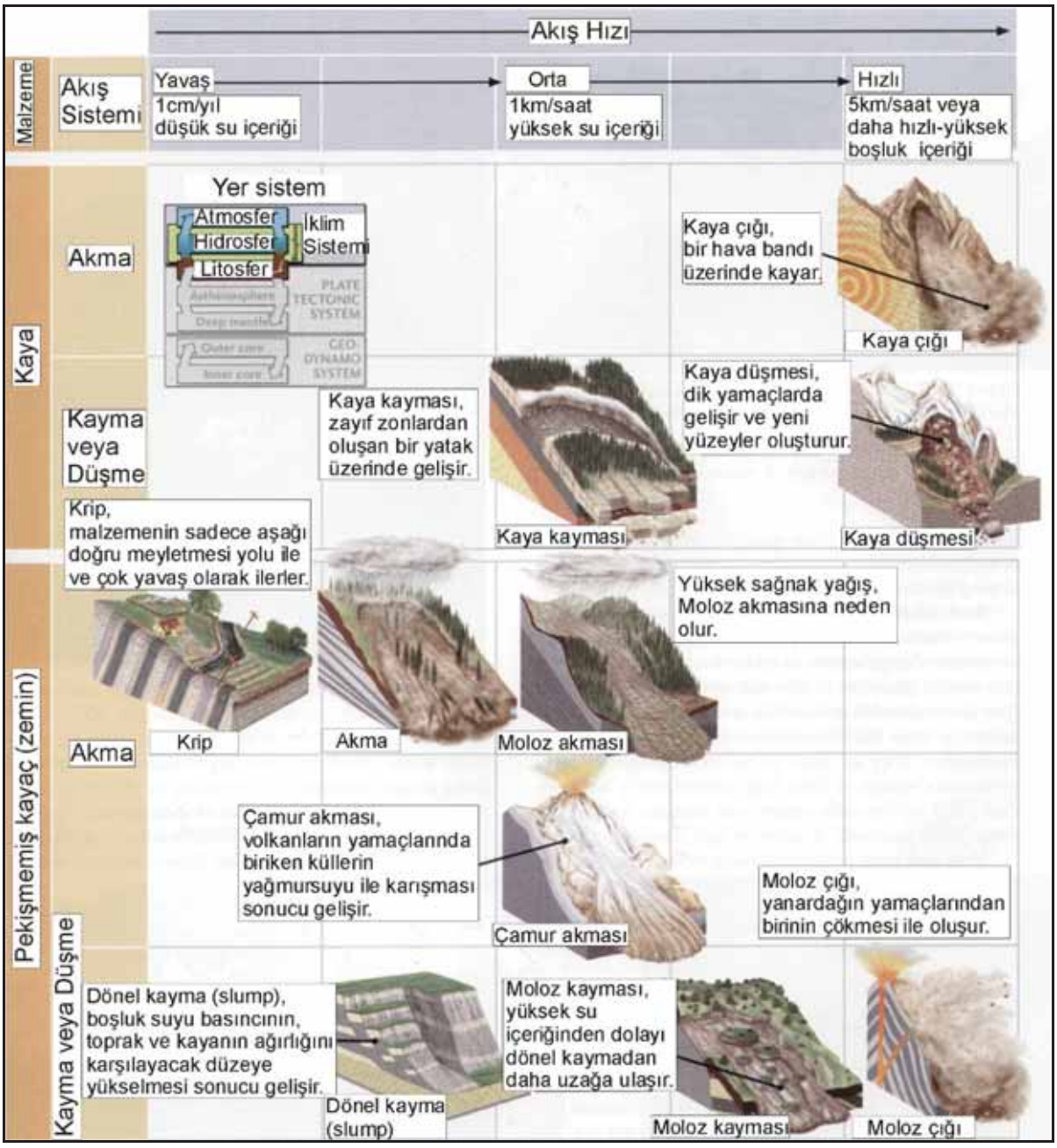
Kütle hareketleri *(mass movement)*, bir arazi üzerinde, yamaçlarda görülen her türlü yer değiştirme hareketine verilen genel isimdir. Kütle hareketleri, yeryüzünün az veya çok eğimli yüzeylerini oluşturan yamaçlarda ya da insanlar tarafından açılan kazı şevlerinde görülür. Ayrıca yeraltı boşluklarında görülen çökmeler de zemin yüzeyinde bu tür hareketlere neden olabilir. Kütle hareketleri, yamaç eğimi, jeolojik ve tektonik yapı ile kayaçların zemin özellikleri, kimyasal bileşim, ayrışma derecesi başta olmak üzere su, iklim koşulları, bitki örtüsü, titreşimler, yamaçların aşırı yüklenmesi ve yer çekimi kuvvetine bağlı olarak oluşabilmekte, inşa edilen yapıların konumunu şeklini değiştirip, insanlara zarar verebilmektedir.

Yukarıda da değinildiği üzere kütle hareketleri; yamaç eğiminin değişmesi, yağış, suya doygunluk, litolojik özellikler, bitki örtüsünün olmaması, donma ve çözülme, deprem ve erozyon gibi '**doğal nedenler'**den oluşabileceği gibi '**yapay nedenler'**den yani insan müdâhalesi (beşerî) ile yol yamaçlarında oluşturulan şevlerde, tünel, baraj ve kanal yapımı nedeniyle yapılan kazılarda, ortama uygun şev geometrisi veya istenilen geometriyi oluşturmada yeterli mühendislik önlemlerinin alınmadığı durumlarda da oluşmaktadır. Bu nedenle, yamaç veya şevlerin duraylılığının (denge, stabilite) sağlanması mühendislik çalışmaları sırasında büyük önem kazanmakta, jeoloji, inşaat, çevre ve harita mühendislerini de yakından ilgilendirmektedir. Bu tür olaylar, olayın meydana geldiği yere, hareket eden malzemenin türüne, hızına ve şekline, kayma yüzeyinin olup olmamasına ya da hareket yüzeyinin şekline göre özel isimler alır. Bu parametrelere göre kütle hareketleri genel olarak **1) Düşme 2) Devrilme 3) Akma 4) Kayma** [düzlemsel ve eğri yüzeyli (heyelân) kayma] **5) Çökme ve oturma 6) Karmaşık kütle hareketleri** vb. isimlerle anılırlar (Şekil 9.1).

Kütle hareketlerinin kayaçların jeolojik yapı ve özelliklerine, suya karşı olan davranışlarına, süreksizliklerine ve yamacın eğimine bağlı olarak gelişimleri Şekil 9.2'de görülmektedir. Zemin veya kayalardan oluşan yamaç ve şevlerin özelliklerinin birbirlerinden çok farklı olması nedeniyle bunların mühendislik jeolojisi açısından dikkatlice incelenmesi gerekir. Ayrıca kütle hareketleri incelemelerinde, yüzey ve yeraltı jeolojisini içeren jeolojik araştırmalar yanında mühendislik jeolojisi çalışmaları içinde yer alan araştırma çukuru *(trial pit)*, yarma *(cut)*, sondaj *(drill)* ve laboratuar çalışmaları yapılmalı, jeofizik çalışmalar ile de desteklenerek geoteknik çalışmalar gerçekleştirilmelidir.



Şekil 9.1. Kütle hareketlerinin türlerine ait bazı örnekler (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 9.2. Doğada meydana gelebilecek bazı kütle hareketi türleri ve bu hareketlerin oluşumunu kontrol eden faktörler (*Press* vd., 2004).

9.2. Kütle Hareketlerinin Türleri ve Sınıflandırılmaları

Doğal yollarla meydana gelen kütle hareketleri, kayan malzemenin türüne, kaymanın hızına, kayma yüzeyine ve kayma yüzeyinin olup olmaması gibi farklı özelliklere bağlı olarak tanımlanırlar. Bu tanımlar genel olarak hareketin türü, miktarı ve hızı, hareket eden malzemenin cinsi, dizilişi, şekli, su

miktarı ile malzemenin kayma mukavemeti parametrelerine bağlı olarak değişir (Tablo 9.1).

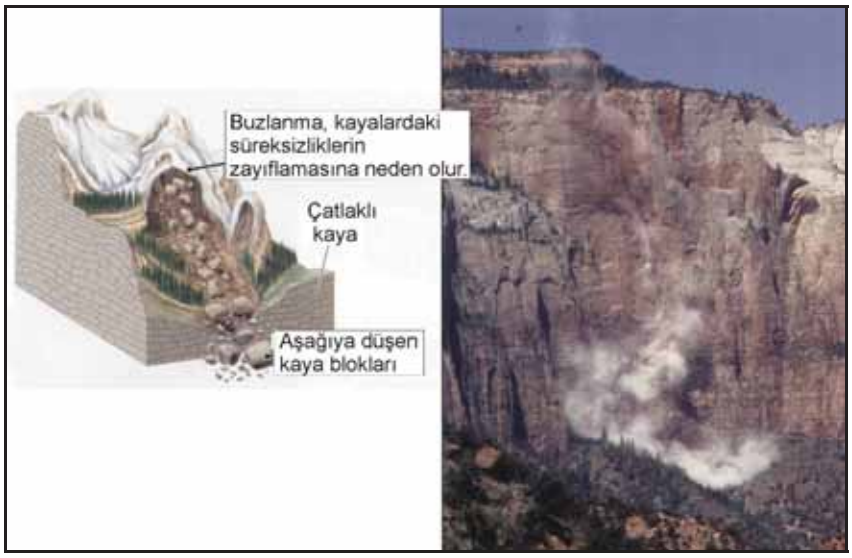
Tablo 9.1. Kütle hareketlerinin genel sınıflandırılması.

HAREKET TÜRÜ		**HAREKETİN OLDUĞU KİTLE TÜRÜ**		
		KAYALAR	**ZEMİNLER**	
			İri Dâneli	**İnce Dâneli**
DÜŞME		Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi	Toprak Dökülmesi
DEVRİLME		Kaya Devrilmesi	Gevşek Çimentolu Zeminlerde Devrilme	
AKMA	**Yavaş**	Kaya Kripi	Moloz Kripi	Toprak Kripi
	Hızlı	Çok Parçalı Kaya Akması	Moloz akması *(Debris flow)*	Toprak Akması
KAYMA	**Düzlemsel**	Blok Kayması, Kama Kayması	Yanal Genişleyerek Yayılma	
	Eğri Yüzeyli (Dönel, Dairesel)	Çok Sık Çatlaklı Kayada Heyelân	Değişik Türde Zemin Heyelânları	
ÇÖKME ve OTURMA		Kaya Çökmesi	Zemin Oturma ve Çökmeleri	
KARMAŞIK		Hareket ve Malzeme Türü Karışık		

9.2.1. Düşme

Düşme (*fall*); değişik büyüklükteki zemin ya da kaya parçalarının, dik yamaçlardan (yar, uçurum) ya da dağ doruklarından aşağıya düşmesi olarak tanımlanır. Düşme, dik yamaçlarda birbirleriyle tekrarlanan ve düşeye yakın çatlak takımlarını içeren kayalarda veya zemin-kaya ardalanmalı (tekrarlanmalı) ortamlarda daha sık görülür.

Düşmenin esas nedeni, dik yamacı oluşturan kayaçta, çatlak ve kırıklarda birbirini izleyen donma ve erime olayları, yamaç topuğu oyulmaları, yapışma direncinin azalması, boşluk suyu basıncının artması ve yer çekimidir. Düşen malzemenin türüne göre, olaya **kaya düşmesi**, **blok düşmesi** ya da **toprak düşmesi** gibi adlar verilir. Örnek olarak Antalya sahil şeridinde yer alan traverten kompleksinin oluşturdukları dik falezlerde görülen devrilmeler ve kaya çökmeleri yanında meydana gelebilen kaya düşmeleri; kaya ve blok düşmelerine iyi bir örnek teşkil etmektedir (Şekil 9.3.A, B).



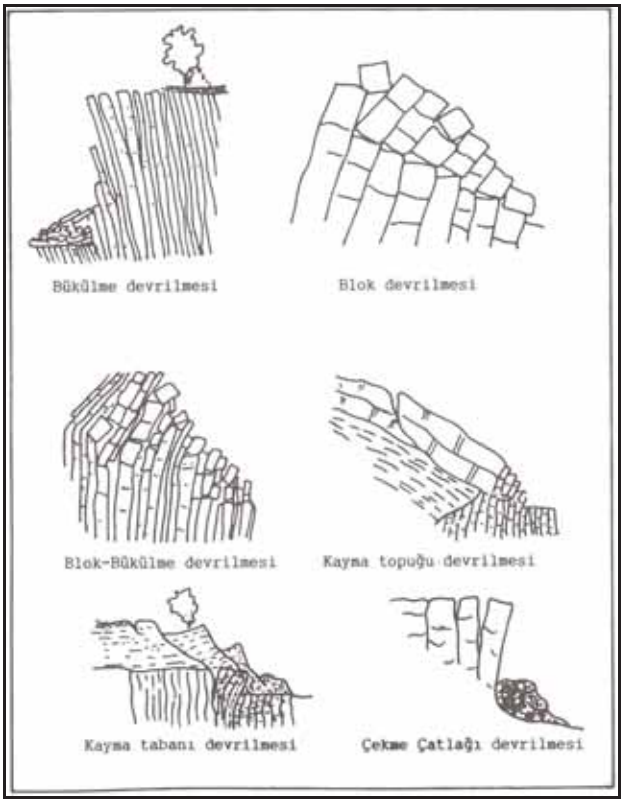
Şekil 9.3.A) Kaya düşmesine örnek. *Zion* Ulusal Parkı-*Utah* (*Press* vd., 2004).



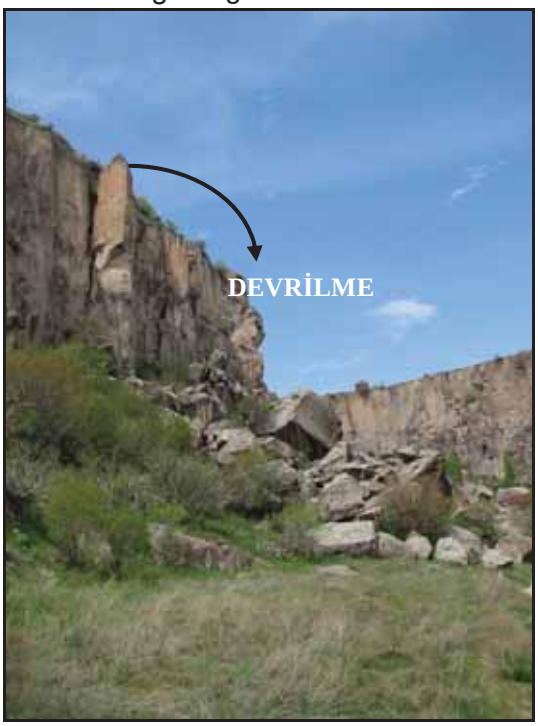
Şekil 9.3.B) Kaya düşmesine Türkiye'den bir örnek. Antalya falezleri (19.11.2010).

9.2.2. Devrilme

Süreksizlik içeren kayaların orijinal konumlarının bozularak aşağı doğru dönerek yıkılmalarına **devrilme** *(topple)* denir. Devrilme çeşitleri; blok devrilmesi, bükülme devrilmesi ya da her ikisinin karışımı olan blok-bükülme devrilmesi şeklinde oluşabilir (Şekil 9.4 ve 9.5).



Şekil 9.4. Doğada gözlenen devrilme türleri.



Şekil 9.5.A) Devrilme ve Düşmeler. Kapadokya Bölgesi, Aksaray İli sınırları içinde yer alan Ihlara Vâdisi'nde düzenli çatlak takımları ile oluşmuş sütunsal yapılı volkanik kayalarda görülen devrilme ve düşmeler. Lâvlar, oluşum aşamalarında soğumaları sırasında farklı yönlerde soğuma çatlakları geliştirirler. Zamanla fiziksel ayrışma etkisi ile sütunsal yapılı kayaların çatlak açıklıkları artar ve düşey çatlak açıklıkları boyunca devrilme türü kütle hareketleri meydana gelir (11.05.2007).

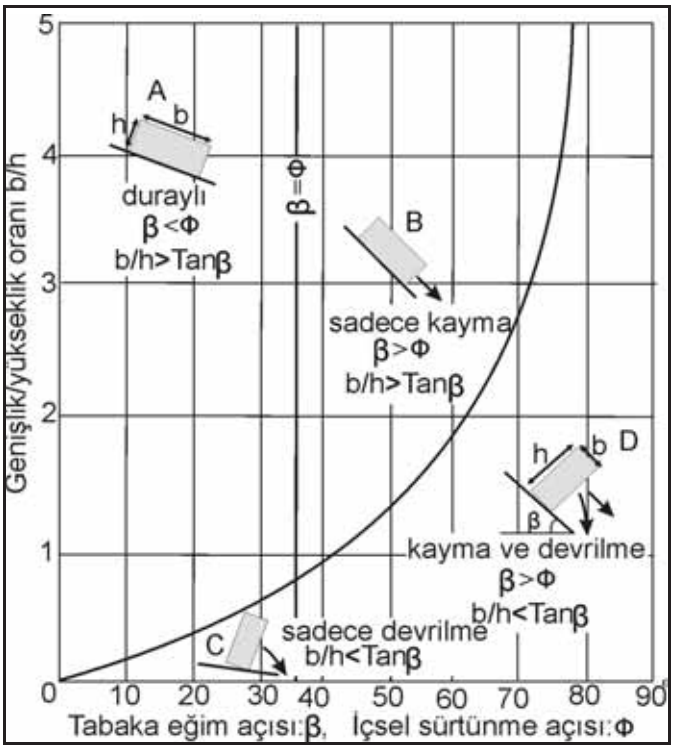


Şekil 9.5.B) Mardin eski yerleşim alanından kuzeye, Mardin Kalesi'nin üzerinde yer aldığı dik yamaçları oluşturan kireçtaşlarına bakış. Midyat Kireçtaşı olarak adlandırılan killi kireçtaşlarının oluşturduğu tabiî dik uçurumda görülen devrilmeler ve düşmeler (31.05.2011).



Şekil 9.5.C) Mardin Kalesi'nden güneye, kaya düşme ve devrilmelerinden zarar gören eski (tarihî) Mardin'e bakış. Nisan 2007 tarihinde büyük bir bloğun devrilip düşmesi sonucu yıkılan binalarda oluşan hasarlar (31.05.2011).

Devrilme türü kütle hareketinde, eğik yüzey boyunca kayma söz konusu değildir. Burada önemli olan blok ağırlık vektörünün, bloğun eğik yüzey üzerindeki dayanma alanı ile olan ilişkisidir. Ağırlık vektörü, dayanma alanı içinde kalıyorsa blok duraylı (stabil, *stable*), dışına çakıyorsa blok duraysızdır (instabil, *unstable*). Dayanma sınırından geçiyor ise blok limit dengededir. Buradaki hareket bir dönme hareketidir. Dönme; bloğun eğim aşağısındaki kenarı boyunca olmaktadır. Kaya bloğunun dengesi, bloğun eni, yüksekliği, üzerinde durduğu eğik yüzeyin yatayla yaptığı açıya ve blokla eğik yüzey arasındaki sürtünme açısına (ϕ) bağlıdır (Şekil 9.6). Devrilme mekanizması, yamacı oluşturan tek bir kaya için değil, tüm kaya blokları için birlikte düşünülmelidir. Devrilme mekanizması çözümü için eğik yüzeyin düz, pürüzlü ya da basamaklı olması, analizi yapılan bloğun, eğim aşağı ve eğim yukarısında yer alan blokların etkileri gibi verilerin değerlendirmede dikkate alınması gerekir.



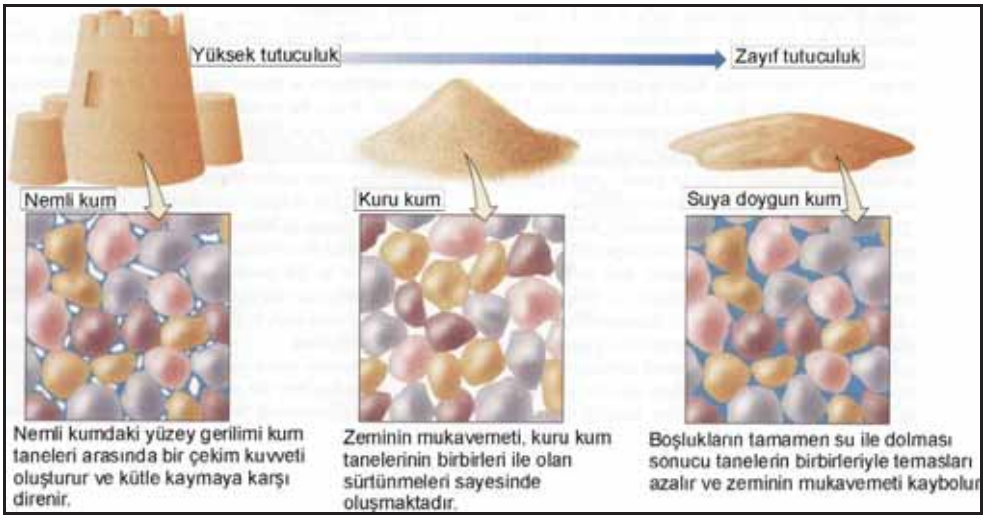
Şekil 9.6. Çatlaklı kayalarda tek bir blok için devrilme ve kayma koşulları (Önalp ve Arel 2004).

9.2.3. Akma

Yamaçlarda kayaçların ayrışması sonucu oluşmuş kumlu *(arenaceous)*, killi *(argillaceous)* zeminlerde, toprak ya da taş-toprak karışımından oluşan

tutturulmamış ya da gevşek tutturulmuş yüzeysel örtünün, su miktarının artması sonucunda bazen çok hızlı bazen de yavaş, yamaç aşağı hareketine **akma** *(flow)* denir. Akan malzeme, su içeriği artışıyla bazen bir sıvı gibi akar (Şekil 9.7) bazen de çok yavaş fakat sürekli olarak yer değiştirir.

Soliflüksiyon *(solifluction)*, yavaş gelişen bir tür yavaş akma/krip *(creep)* çeşididir. Geniş bir alanda çok soğuk iklimlere sahip (**periglasiyal=** buzula ait, süreçlerle gelişen, *periglacial*) ülkelerde zemin alt kesiminde zeminde uzun süre devam eden donmanın, üst kesimlerinin iklimsel nedenlerle erime ve kabarması sonucu, zemin yüzüne yakın askıda erime zonunda yer alan buzul döneminde oluşmuş suya doygun ince kum, silt ve kil gibi daha çok ince taneli gereçten oluşan tutturulmamış gevşek kayaç parçacıklarının (eski yamaç molozu) daimî donmuş (< -20°C) olarak kalan bir alt geçirimsiz zemin üzerinde, yamaç aşağı donma/erime tekrarlanması ile senede 0,15 cm ilâ 15 cm arasında hareket ederek oluşturdukları yavaş gelişen bir (krip) toprak akmasıdır. İçlerinde yer alan taş parçacıkları ise yamaca paralel ve birbirleri üzerine preslenmiş bir görünümdedirler. Soğuk iklime sahip ülkelerde ve donma-erime süreçlerine bağlı suya doygun eğimli arazilerde gelişen soliflüksiyon; 2° gibi çok düşük eğimli yamaçlarda da oluşabilir. Bu tür akma, çok geniş bir alanda ve dil benzeri bir morfolojik yapı oluşturur.



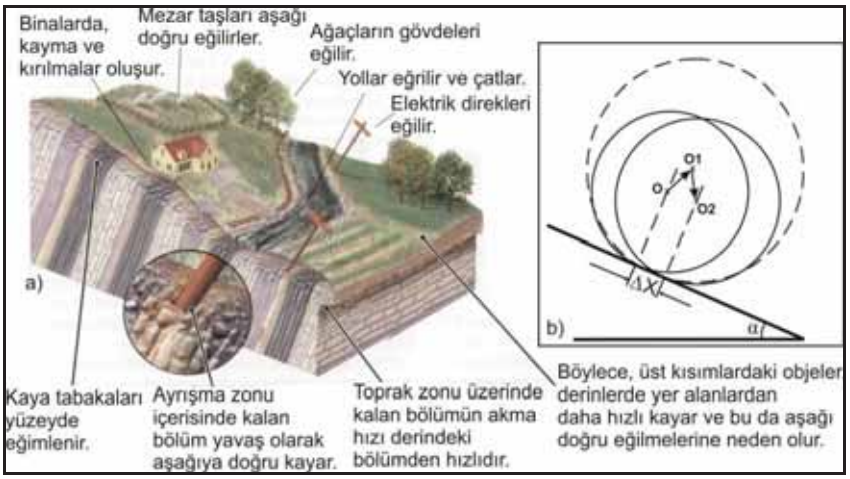
Şekil 9.7. Suyun kütle hareketleri üzerindeki etkisi (*Press* vd., 2004).

Akma hareketi hızlı olduğu zaman, akan malzemenin türüne göre moloz (döküntü) akması, kum akması, toprak akması çamur akması *(mudflow)* vb. isimler alır. Akmanın hiçbir türünde, malzeme ister viskoz veya isterse plâstik olsun, belirli bir akma düzlemi bulunmaz.

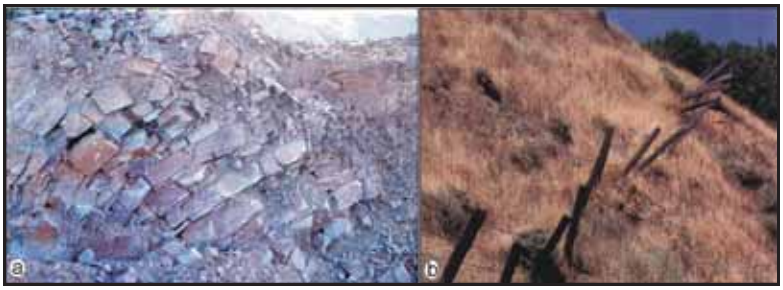
Yavaş akma (krip): Zemin, ayrışmış/çatlaklı kaya veya yüzey molozu gibi yamacın yüzeysel kısmının, yamaçtan aşağıya doğru sürekli, fakat çok yavaş ve gözle fark edilemeyecek bir hızda (senede yaklaşık 1 cm - 3 cm) yer değiştirme hareketine **yavaş akma** veya krip *(creep)* adı verilir. Az eğimli yamaçlarda da (3-5 derece) meydana gelebilen kripin doğadaki belirtileri; bitki örtüsünün ve köklerinin eğilmesi, ağaçların düşeyden sapması, kara-demiryolu, direk, çit, duvar gibi yapıların yer değiştirmesi, tabaka uçlarının kıvrılması ve yamaç aşağı sıralanması, topoğrafya yüzeyinin küçük basamaklı ya da dalgalı bir yapı kazanması gibi görüntülerdir. Krip; başta yer çekimi olmak üzere, yüzeysel kısımdaki malzemenin birbiri ardı sıra ıslanma-kuruması, ıslak olması hâlinde içerdiği suyun donup erimesi, yeraltı ve yerüstü sularının etkisi, bitki (**flora**, *flora*: Bitki örtüsü) köklerinin büyümesi ve oyucu hayvanların (**fauna,** *fauna***:** Doğal bir yaşam alanında bulunan hayvan türlerinin tümü) etkisi gibi nedenlerden meydana gelir. Krip; akan malzemenin türüne göre, toprak kripi, kaya kripi, yamaç molozu (örn. talus=taluviyum) kripi gibi adlar alır.

'Toprak kripi'nde *(soil creep)*; zeminin birbiri ardı sıra ıslanma-kuruma işlemi ile taneler, aralarındaki çatlak ve boşluklara su alıp şişerek çap araları büyür ve küçülür. Tane çap aralarının büyümeleri sırasında, merkezlerinin yer değiştirmesi ve küçülmelerinin ardından, yeni merkez kadar (ΔX) bir ilerleme gerçekleştirmelerine neden olur. Bu ilerlemede tanelerin zamanla yamaç aşağı yer değiştirmesinde en büyük etkenin, yer çekimi yanında, ıslanma-kuruma ile tanelerin birbirlerini iterek uzaklaşıp-yakınlaşması şeklinde olduğudur. Kripin her çeşidi, bilhassa sık rastlanan toprak kripi mühendislik açısından önemlidir ve bu tür alanlarda hareket eden yüzeysel örtü, mühendislik önlemleri alınmadığı takdirde yüzeysel bina temelleri inşaası için duraysızdır (Şekil 9.8.A/b ve 9.8.B/b). Yamaçlarda yer alan farklı yönlerde gelişmiş bol ve sık düzenli çatlak takımları içeren ana kayanın, yüzeyde veya yüzeye yakın kesimlerinde, yamaç dışına doğru eğimli küçük çatlak düzlemleri üzerinde, eğim aşağıya doğru kıvrımlanarak çok yavaş hareketine **Kaya kripi** *(rock creep)* denir. (Şekil 9.8.A/a ve 9.8.B/a). Kaya kripinde hareketin nedenleri, iklim koşullarına bağlı olarak çok sık süreksizlik takımlarını içermeleri, ayrışma, süreksizliklerdeki suyun donma-erimesi, genleşme-büzülme, bitki köklerinin büyümesi ve yamaç eğimidir. Ayrıca tabakalı kayaçlarda ince killi ara tabakaların ya da çatlaklar arası kil dolgularının bulunması durumunda, suyun

da etkisiyle, killi düzeyler, kayada krip hareketinin oluşmasında önemli rol oynarlar.



Şekil 9.8.A) a) Kaya kripi gelişimi ve etkileri, b) Toprak kripi oluşum mekanizması: Eğimli arazide, Islanma-kuruma işlemleri sırasında tanelerin boşluk ve çatlakları boyunca birbirlerini itip çekmelerine bağlı olarak tanelerin merkezlerinden eğim aşağı doğru "ΔX" kadar hareket etmeleri.

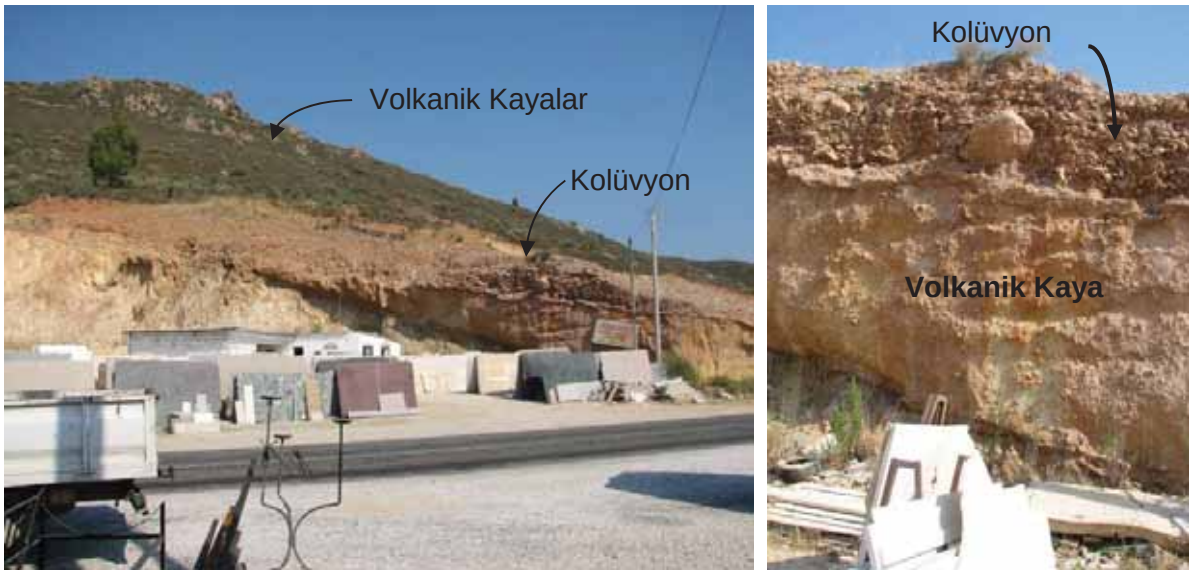


Şekil 9.8.B) Kaya (a) ve Toprak (b) kripi.
a) İstanbul, Eyüp Taş Ocakları Haliç Çamuru Depolama Sahasında dik yamaçları oluşturan ayrışmamış, üç yönde sistematik ve sık çatlak takımlarını içeren mavi grovak kayalarında görülen kaya kripi (Aralık 1996),
b) Yüzeyi tamamen ayrışarak kahverengi kile dönüşmüş grovak kökenli zeminde görülen toprak kripi.

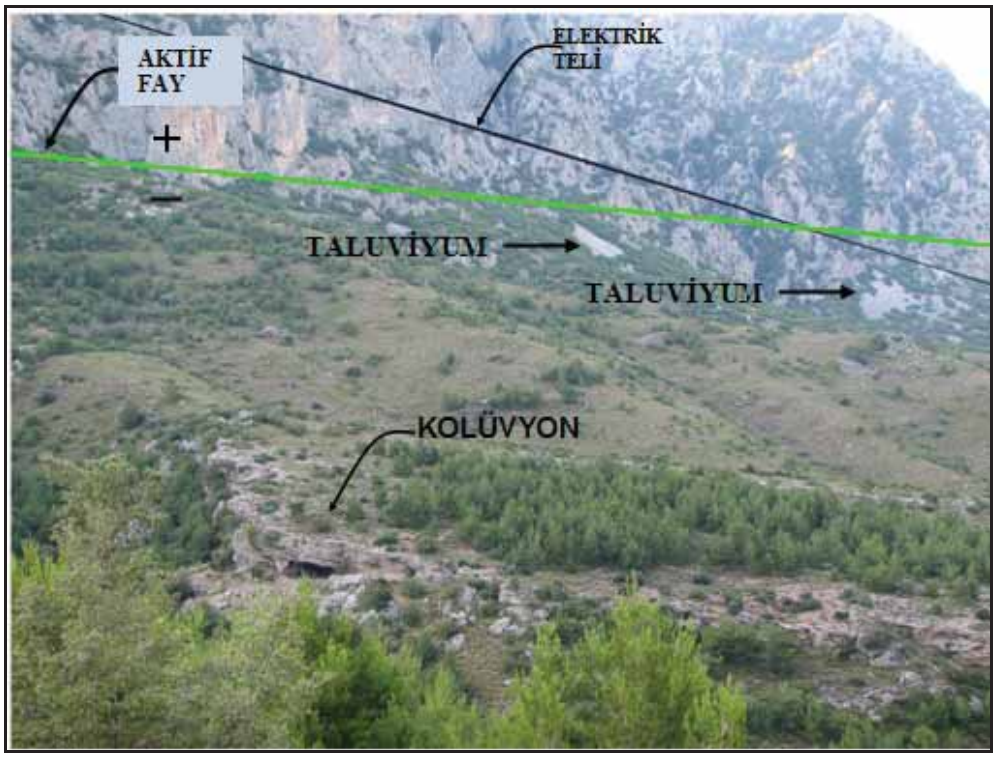
Yamaç molozu kripi (taluviyum ve kolüvyonlar): Tektonik, kısmen de erozyon nedeniyle ana kayadan kopup taşınarak, genellikle faylar tarafından kesilen dik kayalıkların eteğinde, 26°-42° arası yüksek eğimli yamaçlarda biriken, gevşek, tutturulmamış ve organik toprak (humus) içermeyen, dâne boyutları *(particle size)* genelde kum boyutundan, 8-10 m gibi çaplara ulaşabilen farklı irilikte kaya blokları *(boulder)* içeren ve büyük hacimli boşlukları da içerebilen ve katman kalınlıkları 10'larca metreye ulaşabilen, yelpaze biçimli ufak, iri ve çok iri kaya parçaları yığınından oluşan yamaç molozuna **taluviyum** (=**talus,** *talus-scree*), oluşturduğu yüksek eğimli

topoğrafyaya **moloz rampası**, oluşturdukları şekle de **moloz konisi** ya da **birikinti konisi** denir (örn. Isparta, Eğirdir Dağ Komando Eğitim Merkezi, dağ yamaçları).

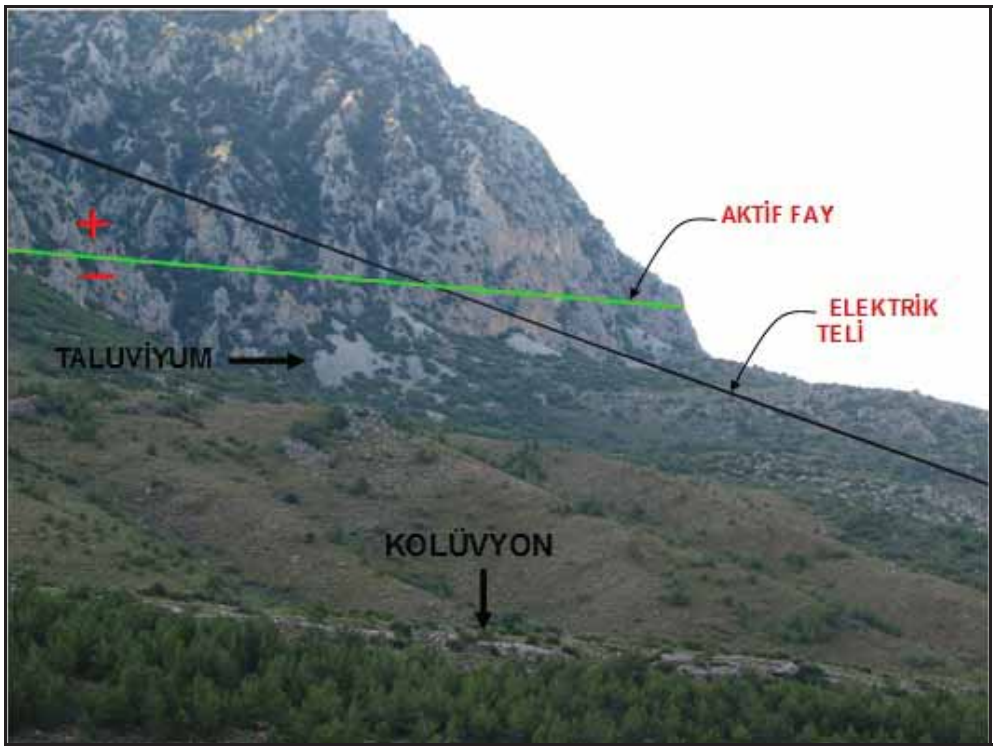
Kolüvyon (koluviyum, *colluvium*); genellikle erozyon sonucu oluşan killi, ya da karbonatlı bir hamurla çok gevşek tutturulmuş, içinde çok az da olsa organik tabakaları içerebilen yamaç molozudur ve genellikle düşük, bazen de dik eğimli yamaçlarda da gelişebilen tabakalı istif görünümlü güncel bir kayaç oluşumudur. Ilıman iklimlerde koluviyumun, yamaç eteklerinde çoğunlukla alüvyonla *(alluvium)* girişimli (girik) olduğu görülmektedir. (Şekil 9.9.A-B-C). Ancak mühendislik açısından gerek yamaç molozu, gerekse kolüvyon, her ikisi de bilhassa aşırı yağmurlu dönemlerde yamaç ve şevlerde stabilite sorunları yaratırlar. Bunlardan; yamaç molozlarında, aşırı yağışlarda moloz akması *(debris flow)*; daha düşük eğimli yamaçlarda yer alan kolüvyonda ise genellikle heyelânların geliştiği gözlenmektedir. Kısaca: Yamaç molozlarından; taluviyumda (talus) akma (yamaç molozu akması, *debris flow*); kolüvyonda ise genel olarak kayma (heyelân) türü kütle hareketleri oluşmaktadır. Yamaç molozlarında *(scree)* krip hareketine de rastlanılmaktadır. Yamaç molozu kripinde etkili olan faktör, ana kayadan koparak yamaçta birikmiş molozu oluşturan iri çakıl ve blok boyutundaki kaya parçaları arasındaki suyun donup-erimesidir. Bu nedenle yamaç molozu kripi (moloz kripi) soğuk bölgelerde daha çok meydana gelir. Sıcak bölgelerde oluşan hareketin nedeni ise gece gündüz arasındaki ısı farkından dolayı molozu oluşturan elemanların genleşip-büzülmeleridir.



Şekil 9.9.A) Kolüvyon ve yakından görünüşü (Muğla, Turgut Reis, Ağustos 2006).



Şekil 9.9.B) Yamaç molozları (=taluviyum ve kolüvyonlar). Datça yöresinde grabeni oluşturan ve kireçtaşlarını kesen düşeye yakın aktif normal bir fayın görüntüsü ve fayın önünde düşen blok üzerinde gelişen Taluviyum ve Kolüvyon (01.06.2008).



Şekil 9.9.C) Yamaç Molozları: Taluviyum'un yakından görünüşü (01.06.2008).

Hızlı akma: Yukarıda açıklanan krip olayının oluştuğu toprak ve kayalarda su miktarı azdır. Su miktarının artması ve darbe-titreşim (deprem gibi) etkisi sonucu boşluk suyu basıncının artması, zeminin duraylılığı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olur. Bu durumda, birikmiş olan malzeme gözle görülebilecek şekilde büyük bir hızla ve âdeta bir sıvı niteliğinde yamaç aşağı akışa geçer (Şekil 9.10). Hızlı akma, akan malzemenin niteliğine göre; moloz akması (iri çakıl ve bloklar, *debris flow*); kum akması, toprak akması ve çamur akması gibi adlar alır. Akan malzemenin % 50'sinden fazlası kum boyutundan büyükse **moloz akması** *(debris flow*), kum boyutunda ise **kum akması**; şayet % 50'sinden fazlası kum, silt, kil boyutlarında ise **toprak akması** *(earth flow*) adını alır. Akan malzeme siltli killi, ancak kil oranı daha fazla ise (hassas killer) ve su miktarının da çok fazla artması hâlinde **çamur akması** meydana gelir.

Su etkisiyle oluşan akmalar (sulu akmalar) dışında, kuru veya kuruya yakın akma örnekleri de vardır. İri çakıl ve blokların oluşturduğu yamaç molozundan oluşan stabilitesi kritik durumdaki bir yamaçta volkanik faaliyet ya da yer sarsıntıları nedeniyle **kaya-blok akması** gibi suyun etken olmadığı **kuru akmalar** da oluşabilmektedir.



Şekil 9.10. Hızlı akma türlerine örnekler (*Press* vd., 2004).

9.2.4. Kayma

Kayaçların yamaç aşağı, bir yüzey boyunca hissedilebilir bir şekilde hareket etmesine **kayma** adı verilir. Kaymalar, kayma yüzeylerinin şekline göre kaya kaymaları (ötelenmeli kaymalar) olarak da adlandırılan **düzlemsel kaymalar** ile genellikle zeminlerde görülen **eğri yüzeyli kaymalar** (heyelânlar, *circular failure*) olmak üzere iki ana grupta toplanırlar.

9.2.4.1. Düzlemsel kaymalar

Yerli kayaların zayıflık zon veya düzlemlerinden oluşan tabaka, çatlak, şistozite gibi süreksizlikler üzerinde ya da fay yüzeyleri boyunca sınırlı bir şekilde aşağı doğru hareket etmelerine "düzlemsel kaymalar" denir. Kayma tek bir süreksizlik düzlemi ya da bir fay düzlemi üzerinde **(düzlemsel kayma,** *plane failure*) olabileceği gibi kesişen iki süreksizlik düzleminin meydana getirdiği bir kama kütlesinin (baklava dilimi biçimli), bu iki düzlem üzerinde ve kesişme hattı boyunca aşağı hareket etmesiyle **kama tipi kayma** *(wedge failure)* oluşur. Bu tür kaymalar kayalarda görüldüğünden, kaymayı; kayadaki süreksizlik (çatlak) takımları ve oluşturdukları kaya elemanı boyutları ile süreksizliklerin türü, konumu, çatlak aralığı, çatlak sıklığı, pürüzlülüğü, süreksizlikler arasında yer alan dolgu malzemesi, dolgu kalınlığı gibi özellikler kontrol eder. Kayma işlemi; yamaç aşağı eğimli tabakaların veya süreksizliklerin üzerinde asılı vaziyette olan kütlenin, yamaç topuklarında akarsuyun oluşturduğu aşındırmalar ile veya yüzey ve yeraltı suları, ayrışma, hidratasyon olayı, farklı litolojileri içeren kayaç ardalanmaları ve yer çekimi gibi doğal nedenler ile oluşur. Ayrıca yamaç topuklarında yapılan kazılar *(excavations)*, yamaçlara fazla ek yük konması gibi yapay nedenler sonucunda, ağırlığın da etkisiyle zayıflık zonlarını oluşturan süreksizlikler kayma düzlemlerini oluşturmakta ve bu zayıflık yüzeyi üzerinde yer alan kütlenin hızla yamaç aşağı bir kızak gibi hareket etmesiyle kayma gerçekleşmektedir (Şekil 9.11, 9.12, 9.13).

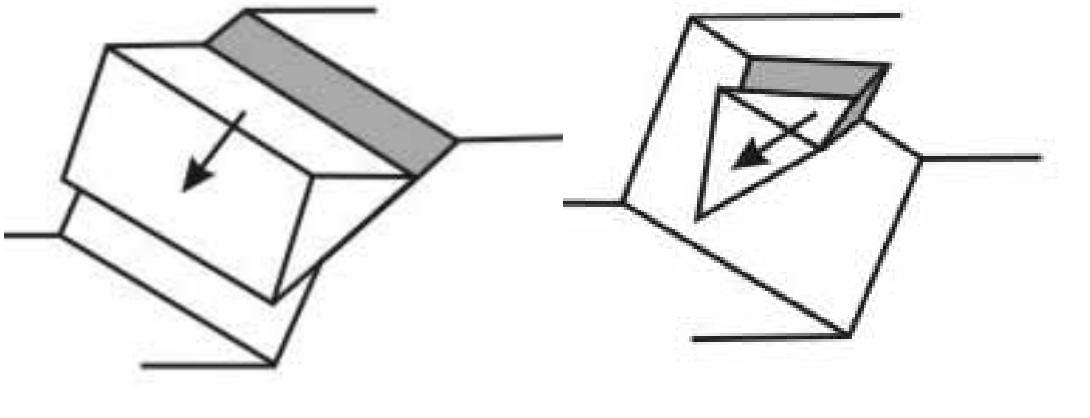
Diğer bir ifâdeyle kayma; zayıflık düzlemindeki kohezyon, içsel sürtünme ve gerilme özelliklerinin değişmesiyle kaydırıcı kuvvetlerin, kaymaya karşı koyan tutucu kuvvetlerden fazla olması durumunda meydana gelmektedir.



Şekil 9.11. Kaya kaymasına bir örnek (*Press* vd., 2004).



Şekil 9.12. Kaya kayması: Düzlemsel kayma (Aydın İli, Söke-Sazlıköy; 30.08.2006).



a **b**

Şekil 9.13.a) Düzlemsel kaymanın blok diyagramda görünümü (tek düzlemde).

b) Kama tipi kaymanın blok diyagramda görünümü (kesişen iki düzlemde).



Şekil 9.13.a.1) Düzlemsel kaymaya örnek. İstanbul, Eyüp-Haliç, Yeşilpınar Mahallesi, Taş Ocakları yamaçlarında kahverengi grovaklarda görülen süreksizlikler boyunca art arda birbirine paralel gelişmekte olan düzlemsel kaymalar (29.08.1997).

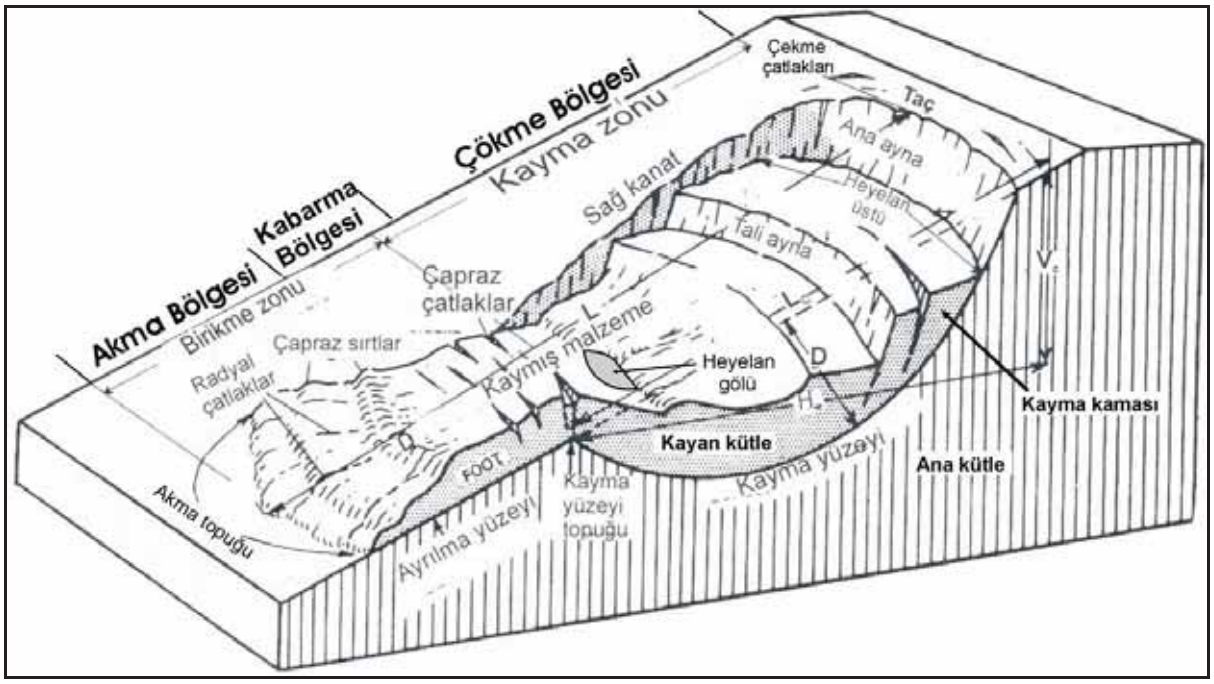


Şekil 9.13.b.1) Kama tipi kaymaya örnek. İstanbul, Eyüp-Haliç, Yeşilpınar Mah. Taş Ocakları yamaçlarında kahverengi grovak kayalarında, farklı yönlerde gelişmiş kesişen iki süreksizlik takımının denetlediği, art arda, eşzamanda ve birlikte gelişmekte olan “kama tipi” kaymaların başlangıç safhası (14.05.1997).

9.2.4.2. Heyelânlar (eğri yüzeyli kaymalar)

Toprak, kil, silt, kum, kaya karışımından oluşan ayrışmış ya da az tutturulmuş zeminler ile aşırı sık çatlaklı, bloklu, parçalı zeminleşmiş kayaların, eğri bir yüzey üzerinde, aşağıya ve dışarıya doğru hissedilebilir bir şekilde hareket etmesine **heyelân** *(landslide)* adı verilir (Şekil 9.14, 9.15, 9.16). Hareketin hızı, yamaç eğimi ve su miktarı ile doğru orantılıdır. Heyelânlar; hareketin hızına, oluş şekline ve malzemenin türüne göre sınıflara ayrılır ve özel isimler alırlar. Heyelânlarda hareketin oluştuğu ana kayma yüzeyi *(slip surface)* genellikle “kaşık” benzeri içbükey bir geometri arz eder ve bir veya daha fazla yenilme yüzeyleri vardır. Ana kayma yüzeyi, dayanımın en az olduğu noktalar boyunca eğrisel gelişir. Zira zeminde, kaya ortamındaki gibi kaymayı kolaylaştırıcı zayıflık zonlarını oluşturan belirgin süreksizlikler çoğu kez gelişmemiştir. Bu yüzden heyelânlarda kayma, dayanımın en az olduğu noktalar boyunca oluşur ve kayan malzeme içbükey oluşan (dairesel, dairesel-düzlemsel hiperbol ya da silindir) bir kayma yüzeyi üzerinde dönerek yer değiştirir.

(Şekil 9.14, 9.15.A-(B) ve 9.15.B). Kayan malzemenin, yerindeki hacme göre kayma ile oluşan gevşeme sonucu hacmi % 30 oranında artar. Kohezyonlu *(cohesive)* zeminlerde kayma şekli yüzeyde hilâl ya da yarım şekilli bir görünümdedir. Genelde bu tür kayma hareketlerinde, çoğu birbirine paralel birden fazla kayma yüzeyi görülebilir. Bu tür heyelânların dışında, ana kayma yüzeyinin dairesel başladığı bir heyelânda, eğri kayma yüzeyinin derinlerde düzlemsel, eğim aşağı konumlu ayrışmamış sert bir kaya yüzeyi üzerine rastlaması durumunda kayma; hareketini bu yüzey üzerinde ve bu yüzeye paralel devam ettirebilir. Bu tip heyelânlar, **dairesel-düzlemsel heyelânlar** olarak adlandırılırlar. Tipik bir heyelânda yer alan karakteristik kısımlar Şekil 9.14'de tanımlanmıştır.



Şekil 9.14. Bir heyelâna ait bölümlerin blok diyagramda görünüşü.

Heyelân esnasında, üst kısımlar aşağı doğru hareket ederken alt kısımlarda çökme, kabarma ve yamaç eğiminin devam etmesi durumunda da ilâveten akma bölgeleri meydana gelir. Heyelânlar, tek bir hareket şeklinde meydana gelebildikleri gibi, küçük ölçekli birden fazla heyelân, aynı anda hareket ederek büyük ölçekli bir heyelân hareketini de meydana getirebilmektedir (Özmen, 2008).

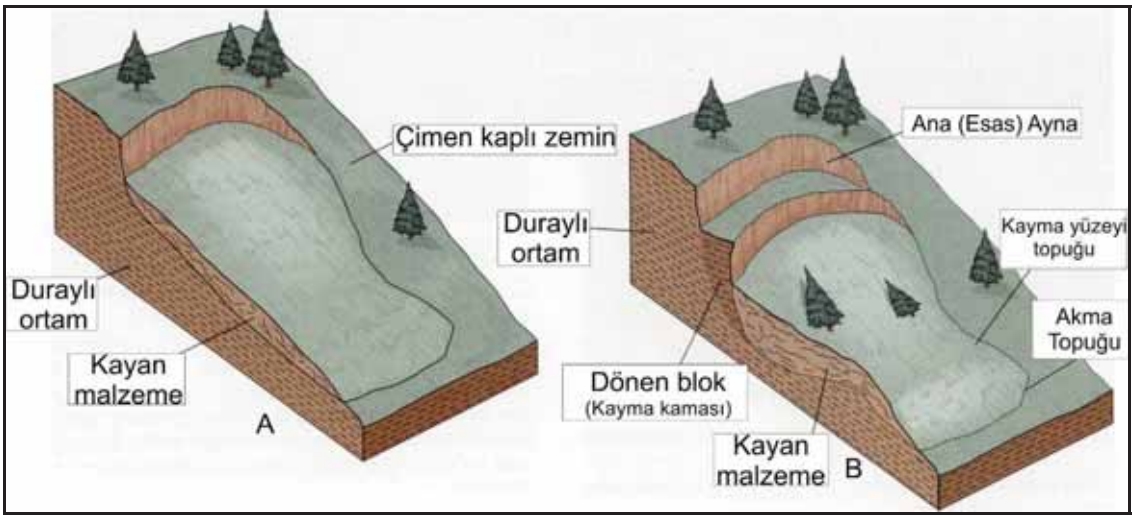
Heyelânın başlangıcı olarak adlandırılan **taç** (alın, *crown*); heyelânın ana aynanın üzerinde hareketsiz kalmış en üst kısmıdır ve bu kesimde

karakteristik olarak çekme (tansiyon) çatlakları gözlenir. **Tepe** (heyelân üstü); hareket eden kütle ile ana aynanın kesiştiği yerin en üst noktasıdır. **Ana** (esas) **ayna**; tepe ile taç arasında hareket eden malzemenin yol açtığı dik kısımdır. Ana ayna üstünde kayan bölge içinde hareket eden malzemenin aşağıya doğru ilerlemesi ile desteksiz kalan taç kısmında oluşan çekme çatlakları *(tension cracks)* zamanla geriye doğru gelişen yeni heyelânları meydana getirebilir. Tüm kütleyi harekete geçiren heyelânın gerçekleştiği kayma yüzeyi ise **ana kayma yüzeyi** *(surface of sliding)*, bu yüzeyin üzerinde yer alan kütleye **kayan kütle** adı verilir. Esas aynanın önünde kayan bölgede birçok **kayma kaması** ve **tâli aynalar** (ikincil aynalar) meydana gelir. Heyelânların orta kısımlarında **çökme bölgesi** ve alt kısımlarında ise **kabarma bölgesi** (heyelân topuğu) oluşur. Heyelân topuğunun zemin yüzeyini oluşturan üst kısmında kabarma bölgesinde görülen enine ve çapraz çatlaklar, heyelânın akma bölgesini oluşturan alt kısımlarında da sıkça gözlenir. Kayan malzemede çoğu zaman dönme hareketi görüldüğünden çökme bölgesinde yağış ve kaynak suları birikerek heyelân gölleri oluşabilir. Kayan kütleye ait üst topuk bölgesi (kabarma bölgesi, heel), kayan malzemenin enerjisini kaybederek biriktiği ve bu açıdan da gerisindeki kayan kütlenin önünde yer alan ve kaymayı kısmen önleyici bölümdür. Heyelânın üst topuk bölgesinde, yamaç eğimi devam ediyor ise sızan suların da etkisiyle ayrık ve heyelân malzemesinin bir kısmı daha aşağı kesimlere doğru akar ve 'akma bölgesi'ni oluşturan bu bölüm, heyelânı sınırlayan akma topuğu *(toe)* ile son bulur.

Heyelânlar, oluşturdukları heyelân geometrilerinin, yani hareket ettikleri taç ve topuk arası düzlemlerinin dışında; büyüyerek ya da art arda gelişip yeni heyelânları da oluşturabilirler. Şayet kayma; hareket doğrultusunda topuk bölgesinden aşağıya doğru gelişmeye devam ediyor ise “ilerleyen”, hareket doğrultusuna zıt yönde, taç kısmının yukarısına doğru gelişmeye devam ediyor ise “gerileyen”, gelişim hem ilerliyor hem de geriliyor ise bu tip heyelânlar “büyüyen heyelânlar” olarak tanımlanmaktadır.

Bir heyelânda, gerekli mühendislik önlemleri alınmadan, heyelân topuğunun yerinden kaldırılması, kayma işleminin tetiklenip yeniden başlamasına neden olabilir. Heyelânlar, özellikle kontrolsuz yapay dolgular *(artificial fill)* ve dik yamaçları oluşturan fiziksel-kimyasal olarak çok ayrışmış zemin niteliği taşıyan kayalar ile zemin ve yamaç molozlarında bilhassa aşırı

yağışlardan sonra çok sık meydana gelmektedir. Bu tür güzergâhlarda kazı ve inşaat yapılmadan önce gerekli jeolojik ve geoteknik çalışmaların eksiksiz yapılması gerekmektedir.



Şekil 9.15.A) Akma ve heyelân.
(A) Kayma yüzeyi tam geliştirememiş bulamaç malzemenin (debris) akması, toprak akması, (B) Kayma yüzeyi geliştirmiş (Dönel=rotasyonal=eğri yüzeyli) heyelân (*McGeary* vd., 2004) .



Şekil 9.15.B) Eğri yüzeyli (=dönel=rotasyonal) heyelân örneği (*McGeary* vd., 2004).

9.2.5. Çökme ve oturma

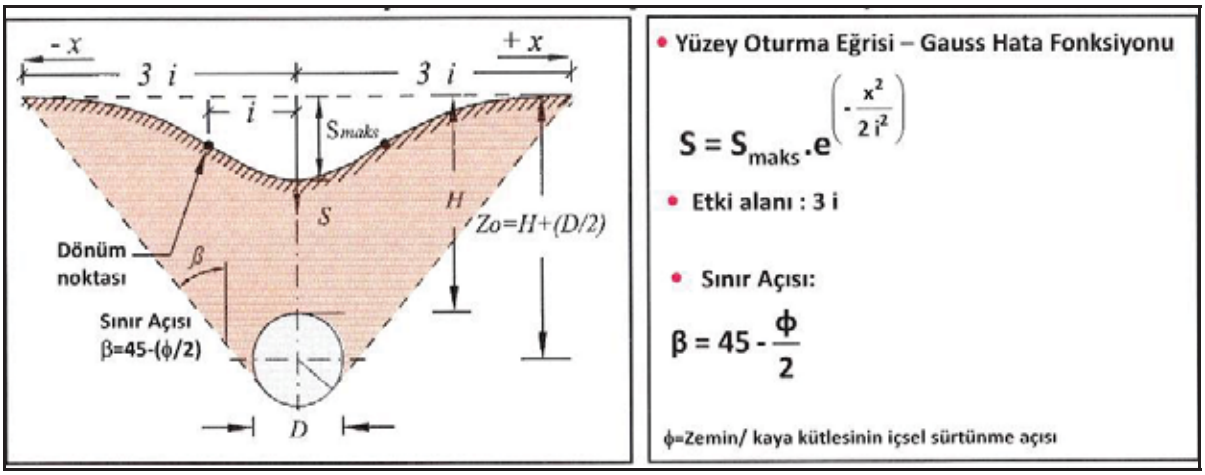
Jeolojik anlamda; kayaçların yataya yakın bir arazide herhangi bir düzleme bağlı olmadan, düşey ya da düşeye yakın bir şekilde hareket etmesine **çökme** (subsidans, *subsidence*), yük ve çeşitli kuvvetler etkisi ile kayaçların dolayısı ile üzerindeki yapının aşağıya doğru hareket etmesine de **oturma** adı verilir. Oturmada hareket genellikle yavaştır. Çökme tarifi, bazı araştırmacılar tarafından, oturma ile aynı anlamda da kullanılmaktadır. Çökme ve oturmalar sonucunda zemin yüzeyinde binalar, yollar ve borular çatlar, akarsu yatakları ve yeraltı su akiferlerinin durumu değişir, sonuçta mal ve can kaybı gibi zararlar meydana gelir. Bu nedenle bu tür hareketlerin olması muhtemel ya da hareketlerin görüldüğü sahalarda devamlı ve hassas ölçümlerin yapılması gerekir. Ölçümlerle hareketin yönü, miktarı, zamana bağlı olarak saptanır ve grafiklerle gösterilir.

Çökmenin doğal ve yapay olmak üzere iki tür nedeni vardır. Yer altında bulunan ve suya hassas jips, tuz, kireçtaşı gibi kayaçların sular tarafından eritilip mevcut alandan uzaklaştırılması ile oluşan çökmeler (örn. dolin, obruk vb.) ve oturmalar '**doğal nedenler**'i; yer altından su alınması, bataklık sahaların kurutulması, sularının drene edilmesi, maden çıkarılması, tünel yapımı için yer altında yapılan kazılar ya da zeminin yüklenmesi gibi insanlar tarafından gerçekleştirilen çeşitli faaliyetler '**yapay nedenler**'i oluştururlar (Örnek, Uygulama ve Yorumlar: 9.6.4). Yeraltı ocaklarında ya da tünel açma çalışmalarında oluşabilen göçüklerin (çöküntü, yıkıntı) yeryüzüne yansıması, oturmalar şeklinde aksetmektedir. Diğer bir ifâde ile altları boşaltılan yeryüzü katmanlarının göçmesi sonucu, alçalma hareketinin yeryüzünde gözlenmesine, diğer bir deyişle yeryüzeyinde meydana gelen çöküntüye yüzey çökmesi, **tasman** ya da **subsidans** (arazi çökmesi, *subsidence*; Senkung) denmektedir.

Şekil 9.16'da görüldüğü gibi yerin altında açılan bir tünelde zemin yüzeyinde beklenen çökme büyüklükleri ile zemin yüzeyine akseden (yansıyan) sağ ve soldan etkileşim zonu sınırları görülmektedir. Bunun için basit bir şekilde tünelin kenar yüzünden ve tünelin tam orta seviyesinden itibaren düşeyle 45- (Φ/2) açı yapacak şekilde zemin yüzeyine kadar çıkıldığında etkileşim zonu sınırları bulunmaktadır. Örnek olarak 29 Ekim 2013 yılında hizmete girmesi plânlanan Marmaray Projesi raylı sistem kapsamında,

Yedikule-Yenikapı arasındaki inşa edilmekte olan metro güzergâhında, tünelin güzergâh derinliğine (~20 m - 30 m) bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşan çökme etki zonunun genişliği 50 m ilâ 75 m arasında değişmektedir.

Mevcut şartnameler; zeminlerdeki toplam oturma miktarlarını, tarihi yapıların bulunduğu sahalar için 10 mm, betonarme yapıların bulunduğu sahalar için tekil temel olması durumunda 25 mm'ye, radye temeller olması durumu için ise 100 mm'ye kadar izin verilebilir olarak kabul etmektedir.



Şekil 9.16. Tünellerde kazı faaliyetleri sonucu oluşan tasman büyüklükleri (Arıoğlu, 2009).

9.2.5.1. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN OTURMA KAVRAMI

Zeminler boşluklu bir malzeme oldukları için hacimsel sıkışabilme özelliğine sahiptirler. Yeni yapılan dolgular gibi zemin kütleleri kendi ağırlıkları altında sıkışabildiği gibi, bütün zeminlerde uygulanan dış yükler altında sıkışma meydana gelebilmektedir. Bir proje sahasında yüzeyden itibaren yer alan zemin tabakalarının toplam sıkışması sonucu zemin yüzünde veya temel altında meydana gelen düşey yer değiştirme **toplam oturma**, değişik noktalar arasında oluşan oturma miktarları arasındaki farklar ise **farklı oturma** olarak bilinmektedir. Bu nedenle zemine oturan bina, köprü ayağı, baraj vb. bütün mühendislik yapılarının tasarımında temel zeminine aktaracakları gerilmeler etkisi altında meydana gelecek oturmaların da dikkate alınması gerekmektedir. Yapılar altında oluşan oturmalar ve özellikle farklı oturmalar yapısal davranış üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Meydana gelecek oturmaların

miktarı zemin özellikleri ve sıkışabilir tabaka kalınlığı yanında, yüklenen alanın boyutlarına ve yapıdan zemine aktarılacak gerilmelerin şiddetine bağlı olmaktadır.

Zeminlerde meydana gelen oturmaların bir kısmı yükün uygulanması ile birlikte ortaya çıkarken **(anî oturmalar)**, önemli bir kısmı ise zamana bağlı olarak gelişmekte **(konsolidasyon oturmaları)** ve oturmaların meydana gelme hızı zeminin geçirgenliğine bağlı olmaktadır. Kumlu zeminlerde oturmalar inşaat süresi içinde büyük oranda tamamlanırken, kalın kil tabakalarında oturmaların gittikçe yavaşlayan bir hızda uzun yıllar boyunca devam edebildiği gözlenmektedir.

Yapılar için izin verilebilir *(allowable)* toplam ve farklı oturma miktarlarının yapının türü, işlevi, taşıyıcı sistem özellikleri ve temel sistemine bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Genel olarak tekil temeller altında meydana gelecek oturma miktarının **25 mm** değerini aşmaması tavsiye edilirken, killi zemin tabakalarına oturan radye temeller altında **100 mm** değerine kadar toplam oturmalara izin verilebilmektedir. Yapısal davranış yönünden daha önemli olan farklı oturmalar açısından ise herhangi iki nokta arasında oturma miktarı farkının (δ) aralarındaki uzaklığa oranı (L) ***yapısal dönme*** olarak dikkate alınmakta ve **(δ/L)** oranı için izin verilebilir değerler olarak yapının türü ve işlevine göre, **1/150** ilâ **1/750** arasında değerler tavsiye edilmektedir.

Özet olarak oturmaların miktar ve hızlarının gerçeğe yakın olarak tahmini bütün mühendislik yapıları için çok önemlidir. Yapıların tasarımında temel sisteminin güvenli taşıma gücüne sahip olacak şekilde boyutlandırılması yanında, meydana gelecek toplam ve farklı oturmaların izin verilebilir sınırları aşmamasının güvence altına alınması gerekmektedir. Bunun sağlanamaması durumunda değişik oranlarda yapısal hasarlar yanında (sıvaların ve camların çatlaması türü hafif hasarlardan, yapı güvenliğini tehlikeye düşürecek düzeylerde taşıyıcı sistem hasarlarına kadar) yapı işlevini yerine getirmesine zarar verebilecek hasarlar (toprak barajlar ve katı atık depolama sahaları geçirimsiz taban şiltesi sızıntıları, yol kaplaması çatlamaları, endüstriyel makinalarda imâlat hataları vb.) ortaya çıkabilmektedir.

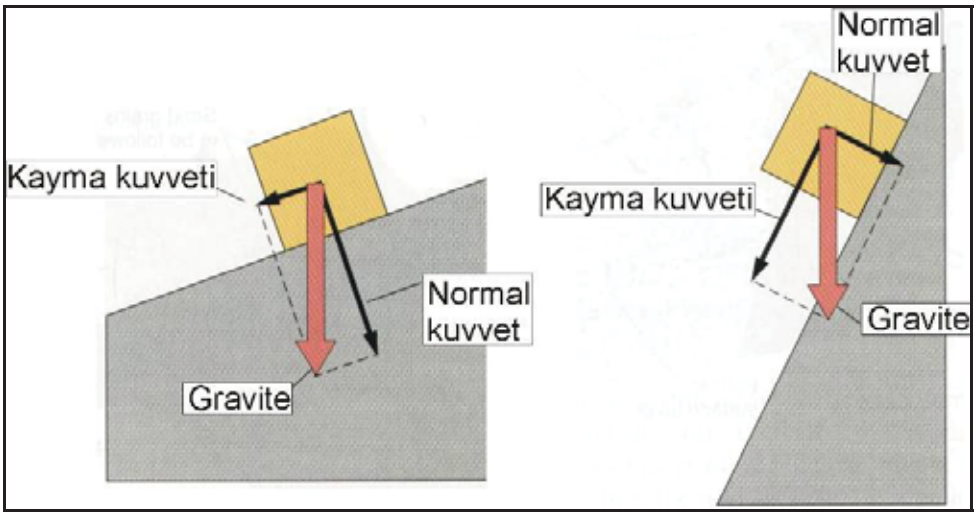
9.2.6. Karmaşık kütle hareketleri

Doğada meydana gelen kütle hareketlerinin bazılarında, kütle hareketi türlerinin birkaçı bir arada oluşabilir. Birden fazla türde meydana gelip, birbiri ardı sıra bir arada görülen kütle hareketlerine **karmaşık kütle hareketi** *(complex and compound mass movement)* adı verilir. Meselâ devrilme türü bir hareket kaya düşmesine, daha sonra da kaya akmasına, kaya kayması ise kaya düşmesine dönüşebilir. Siltli killerde meydana gelen bir heyelân, topuktan itibaren daha aşağısında çamur akmasına dönüşebilir (Örnek, Uygulama ve Yorumlar: 9.6.1).

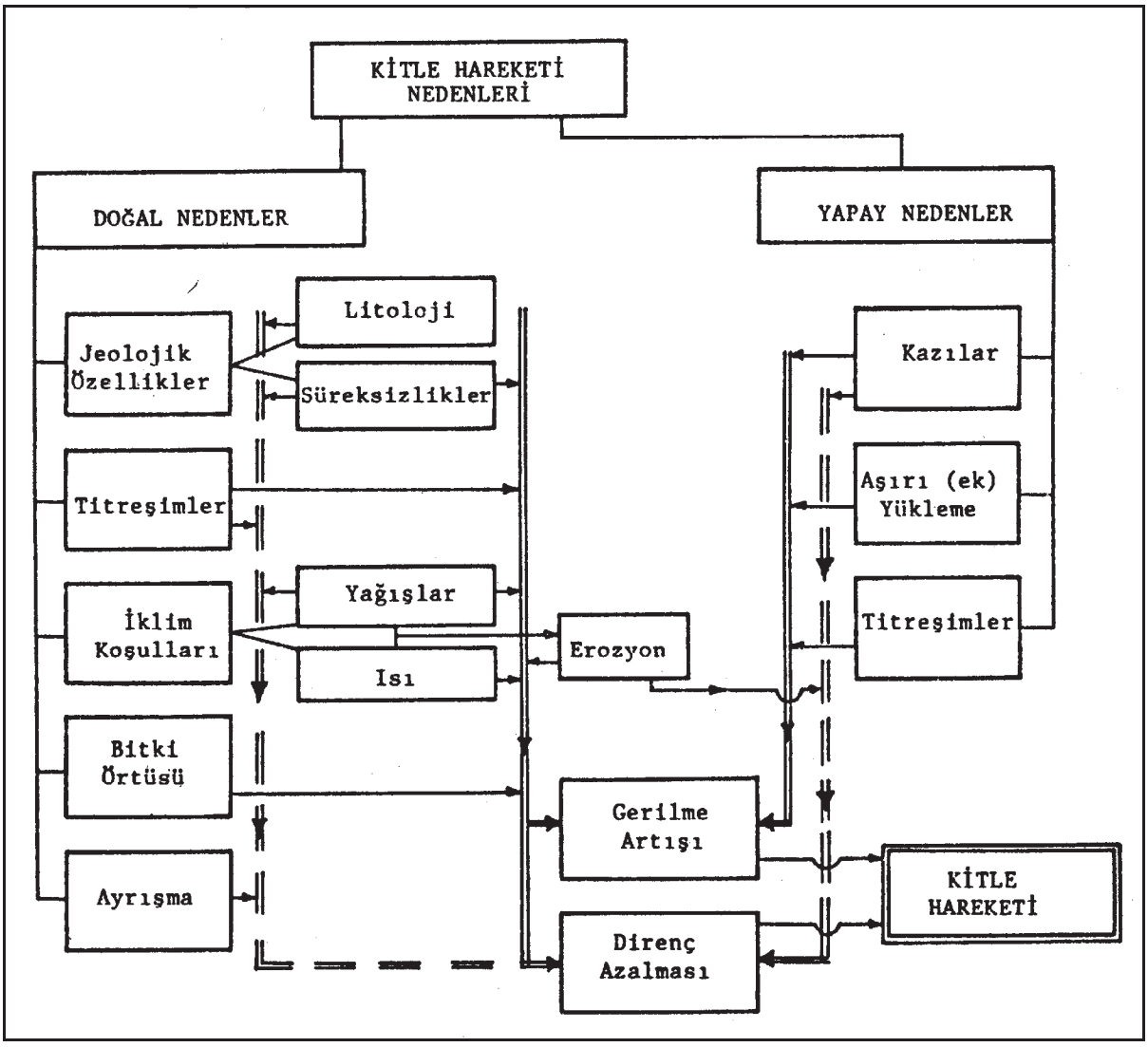
Kütle hareketleri incelenirken, litoloji, süreksizlikler, ayrışma derecesi, jeolojik yapı, hareketin şekli, hareket eden malzemenin türü, kütle büyüklüğü ve su içerikleri gibi belirlenmesi gerekli özellikler dikkate alınarak mühendislik önlemleri alınmalıdır.

9.3. Kütle Hareketlerinin Nedenleri

Kütle hareketlerinin oluşumundaki temel faktör yer çekimi etkisinin kayma yönündeki bileşenidir (Şekil 9.17). Buna ilâveten, kayacın litolojisi, kimyasal özelliği, bünyesinde yer alan süreksizlikler, yeraltı suyu, dış yükler ve gerilme dağılımları kütle hareketinin oluşumunu kontrol eden temel faktörler içerisinde yer alır (Şekil 9.18). Bu etki, malzemenin ağırlığının kayma düzlemi üzerine izdüşümü ile oluşan kayma kuvvetini doğurur. Bu kuvvete karşılık taneler arası çekim kuvveti, pürüzlülük vb. faktörlerin bir bileşkesi olarak ortaya çıkan kaymaya karşı direnç kuvveti ise malzemenin kaymasını engelleyici yönde etki yapar. Kütle hareketlerinin oluşması için bu temel denge durumunun bozularak, kaymaya veya devrilmeye neden olan kuvvetler bileşeninin, tutucu yönde etki eden kuvvetlerin bileşkesinden daha büyük miktarda bir etkiye sahip olması gerekir. Bu açıdan ortamdaki denge durumunu bozacak nitelikteki doğal ve yapay nedenler, kütle hareketlerinin oluşumunu tetikler veya boyutlarının büyümesine neden olur.



Şekil 9.17. Yamaç eğiminin kaydırıcı kuvvetler üzerindeki etkisi (*McGeary* vd., 2004).



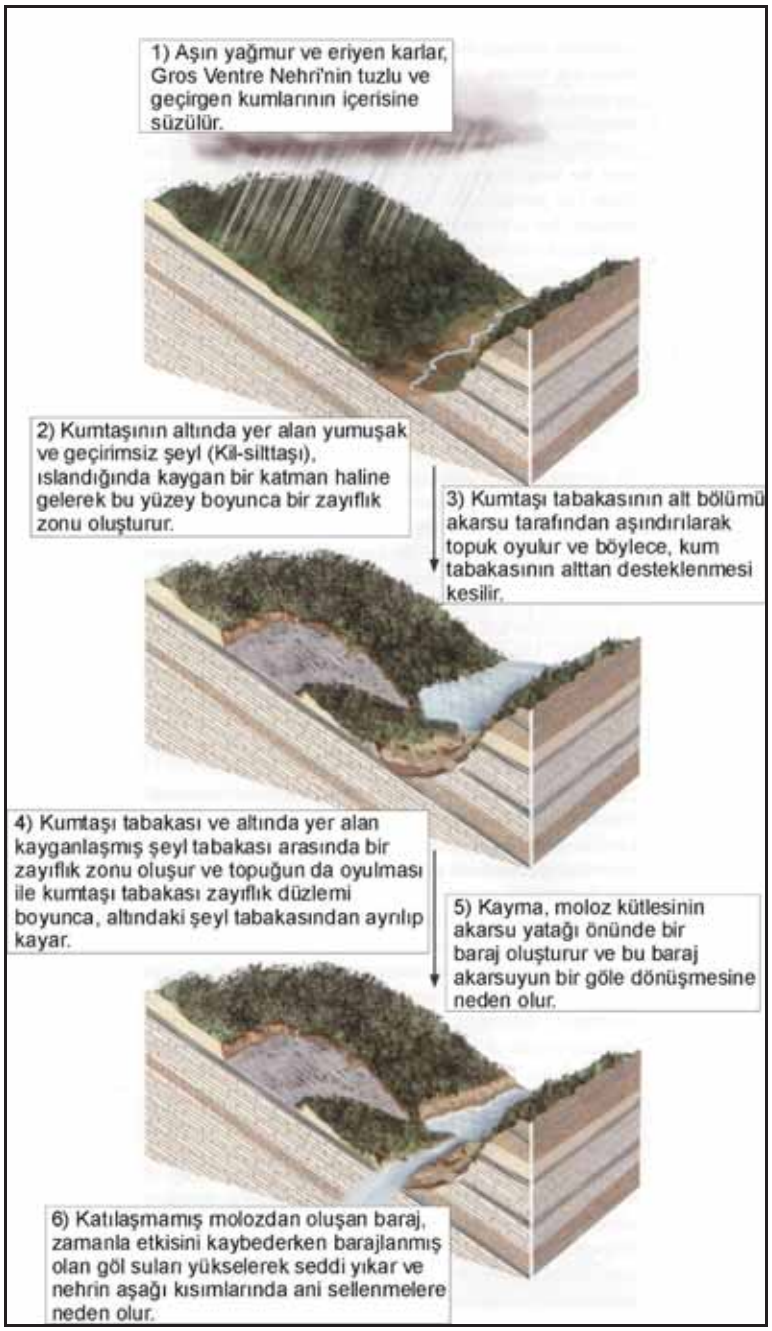
Şekil 9.18. Kütle hareketlerine neden olan faktörler (Tarhan, 2002).

9.3.1. Doğal nedenler

Kütle hareketlerini oluşturan doğal nedenler; dış ve iç nedenler olmak üzere iki kısımda incelenir. Doğal dış nedenler genellikle kütle hareketinin meydana geldiği yamaçtaki kayacın jeolojik özelliklerinden kaynaklanırlar. Özellikle kayaçlarda yer alan süreksizliklerin açıları ile yamaç eğimi arasında, kütle hareketlerinin oluşması açısından önemli bir ilişki vardır. Bunların dışında depremlerin oluşturduğu titreşimler, heyelânları tetikleyen önemli doğal nedenlerin bir diğerini oluşturmaktadır. Yamaç ya da şev yüzeyine yakın kesimlerde ezik zon veya fay var ise özellikle yağmur sularının bu ezik zon ve fay hatlarına ulaşması, şev topuğunun sular tarafından oyulması, mevcut şevde bir kütle hareketinin başlamasına çok önemli bir etken olabilir (Yıldırım, 2000, 2007).

Kütle hareketleri, aktif fay zonları boyunca daha sık görülmekte ve tekrarlanmaktadır. Küresel ölçekte bakıldığında, aktif fay alanlarında ters fay ve bindirme zonları veya normal, yanal atımlı fay hattı bulunması durumlarına göre, heyelân riski açısından çok daha büyük ve olumsuz etkiye sahiptir. İklim koşulları da, potansiyel kayabilecek kütleler üzerinde ayrışma ve buna bağlı olarak çözülmeleri kontrol eder. Akarsular, oluşturdukları erozyonal etkiler açısından, alt bölümlerini oydukları yamaçların eğimlerini arttırmak suretiyle bu alanlarda duraysızlık yaratan en önemli faktörlerden biridir (Şekil 9.19). Sular ayrıca çatlak ve fissürlere dolarak kütle hareketlerinin oluşması yönünde etkide bulunurlar. Bunların dışında, yamacın morfolojik yapısı yanında, kayaçların ayrışması, kayacın ayrışan ve ayrışmayan bölümleri arasında kaymayı kolaylaştırıcı bir zayıflık yüzeyini oluşturması ya da meydana getirmesi, kütle hareketlerini oluşturan diğer nedenler arasında yer alır.

Kütle hareketlerini meydana getiren iç nedenler, boşluk suyu basıncının artması ve şev malzemesi kohezyonunun azalmasıdır. Kar ve yağmurun aşırı yağışı, yeraltı su seviyesini değiştirerek şev malzemesini kısmen veya tamamen suya doygun hâle getirir. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasına ve içsel sürtünme açısının *(angle of internal friction)* azalmasına neden olur. Bu nedenle, doğal sebeplerden oluşmuş büyük heyelânlar, genelde şiddetli yağışlardan sonra meydana gelmektedir.

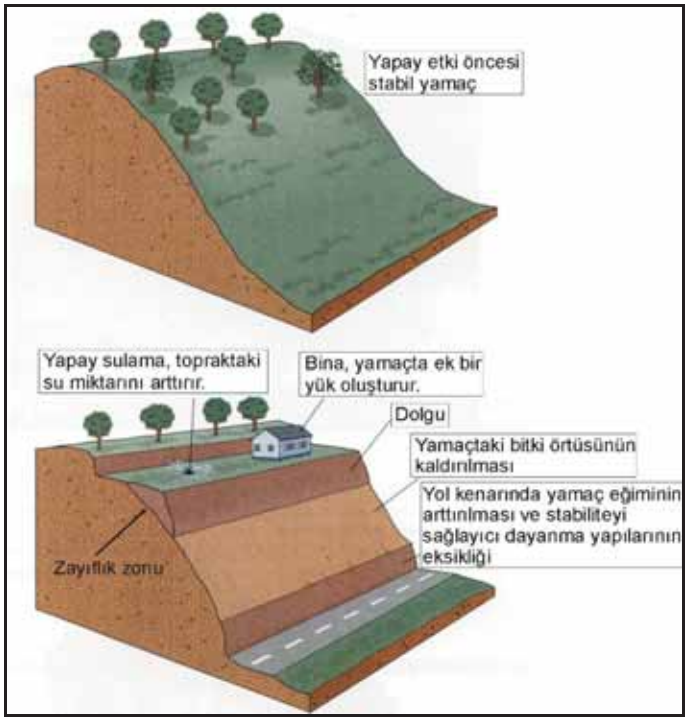


Şekil 9.19. Kütle hareketlerinin oluşmasında su etkisi (*Press* vd., 2004).

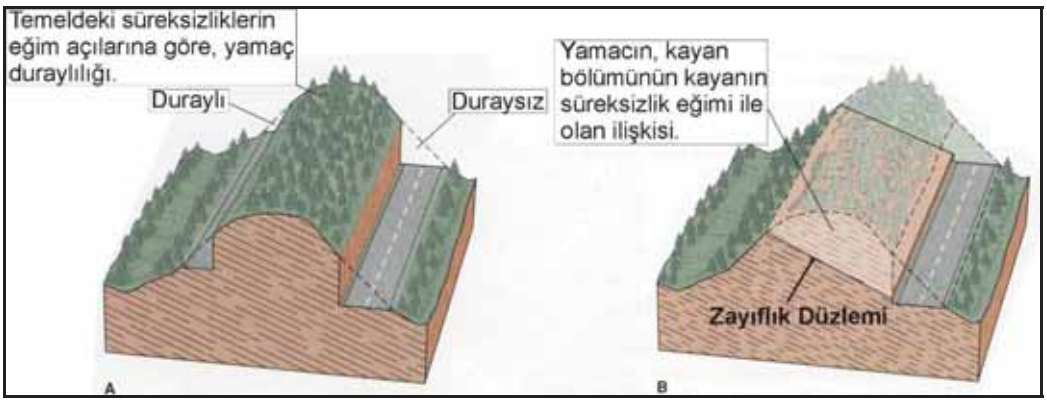
9.3.2. Yapay nedenler

Kütle hareketlerinin tetiklenmesindeki en önemli katkılardan bir diğeri de denge hâlinde olan doğaya insan eliyle yapılan müdâhalelerdir. Bu etkiler genel olarak başta bitki örtüsünün yok edilmesi, topuktan yük kaldırma, şev üzerine veya yüzeyine yük koyma ve şev açısının *(angle of slope)* arttırılması olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 9.20). Pek çok projede inşaat alanı açmak

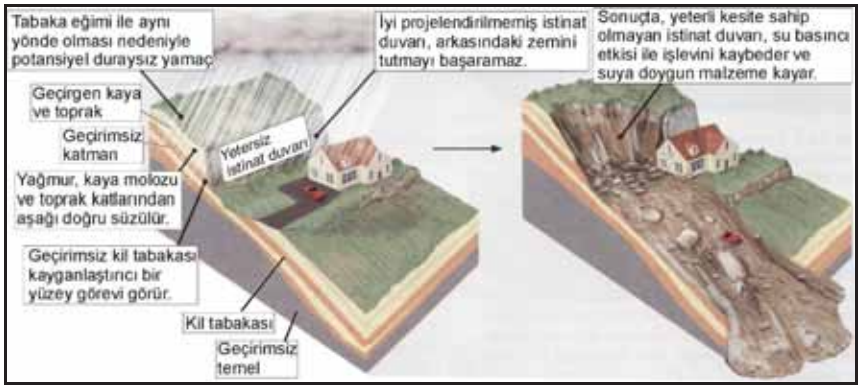
amacıyla; bitki örtüsünün kaldırılması, yamaç açısının dikleştirilmesi, yamacın alt bölümlerindeki malzemenin kaldırılması veya yamacın üst bölümlerine önlem alınmaksızın yük konulması, ilksel durumda dengede olan yamacın doğal dengesinin yapay etkiler sonucu bozulmasına ve kütle hareketlerinin oluşmasına neden olur (Şekil 9.21). Ayrıca yamaçtaki malzemenin içerisindeki süreksizliklerin açısını ve diğer özelliklerini dikkate almadan oluşturulan yanlış şev açıları, iyi projelendirilmemiş yetersiz dayanma yapıları ve yapay patlatmalar da yamaçların duraylılığını bozan yapay etkenler arasında yer alırlar (Şekil 9.22).



Şekil 9.20. Bir şevin duraylılığını bozabilecek yapay etkenler (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 9.21. Kayalarda, süreksizlik yönü ve açısı dikkate alınmadan önlemsiz geçilen bir yol yarmasının kütle hareketini tetikleyici yöndeki etkisi (*McGeary* vd., 2004).



Şekil 9.22. Drenaj önlemleri, süreksizlik yönü/açısı dikkate alınmamış, iyi projelendirilmemiş dayanma yapılarıyla desteklenmiş şevde oluşan heyelân ve akma (*Press* vd., 2004).

9.4. Kütle Hareketlerinin Önlenmesi

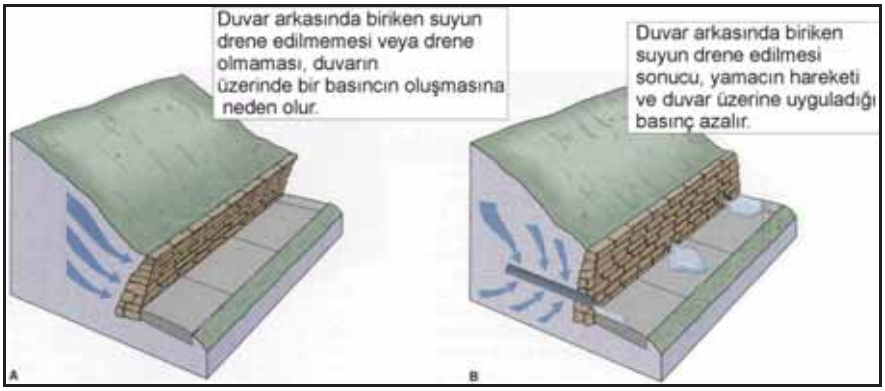
Kütle hareketlerine karşı alınacak önlemlerin en başında, bu olayları meydana getirecek sebepleri ortadan kaldırmak gelmektedir. Bunun için temelde yapılması gereken, kaydırıcı kuvvetleri *(driving forces)* azaltmak ve kaymaya karşı koyan kuvvetleri *(resisting forces)* arttırmaktır. Bu konuda dikkat edilecek ilk husus, kütle hareketinin oluşmasını önleyici nitelikte kapsamlı geoteknik etütlerin yapılması ve yapıların plânlamasının buna göre gerçekleştirilmesidir. Yamaç ve şevlerde stabiliteyi sağlayıcı çözümlerin başında, yamaç eğiminin, şev yüksekliğinin ve yükün azaltılması, kademelendirme yapılması (*****palye), topuğa yük konulması veya dayanma yapılarının (istinat duvarları, palplanşlar) inşaası, drenaj ve eğik yüzeylerin püskürtme beton ile sıvanması gibi önlemler sayılabilir.

Örnek olarak bir otoyol yapımında tabiî yamaçlarda yapılacak yol yarmalarına verilmesi gerekli eğimler kayacın jeolojik ve mühendislik özellikleri öncelikle dikkate alınmak kaydıyla heyelânlı bölgelerde 5 yatay-1 düşeye kadar düşürülebilir. Yaklaşık olarak dolgularda, alüvyal zeminlerde, organik içerikli killerde (örn. Pliyosen-Miyosen killeri) 3 yatay-1 düşey (~18°); gevşek tutturulmuş kil-kum ardalanması, killi kum, kumlu, çakıllı kil (Pliyosen-Miyosen çökelleri) 2 yatay-1 düşey (~27°); ayrışmış (W4) kayalar ile kil-kum-marn ara katmanlı veya ardalanmalı killi kireçtaşlarında, flişlerde, şistlerde, serpantinleşmiş, çok çatlaklı kayalarda 3 yatay-2 düşey (~34°); orta ayrışmış ve orta çatlaklı kayalarda (W3, örn. kahverengi grovak, aglomera, bazalt, mermer-şist ardalanması vb.) 1 yatay-1 düşey (45°); sağlam, sistematik çatlak takımları içermeyen az çatlaklı kayalarda (W2, örn. mavi grovak aglomera, arkozik kumtaşı,

kireçtaşı) 2 yatay-3 düşey (~56°); sağlam kayalarda, (W1=1B), örn. ayrışmamış mavi grovak, az ve düzensiz çatlaklı kireçtaşı- dolomit-mermer, arkoz, kuvarsit, granit, siyenit bazalt vb.) 1 yatay-2 düşey (~63°); sistematik çatlak takımlarını içermeyen ve 1 m'deki çatlak adedi sayısı <1 olan masif kayalarda (W1=1A; som: granit, mermer, kuvarsit, bazalt, arkoz, dolomit vb.) 1 yatay-3 düşey (~72°) ilâ 90° arası olarak şev eğimi düzenlenebilir. Ancak yamaçlardaki yüzey ve yeraltı suyu da iyi drene edilmelidir (Şekil 9.23).

***[Palye,** (*bench)* **:** Yarma ve dolgularda şev stabilitesi için düzenlenen kademe; Palye yüksekliği en başta kayacın tüm özellikleri (litoloji, yeraltı suyu, ayrışma, süreksizlik yönü vb.) dikkate alınmak şartıyla, zeminlerde genellikle 6 m-7 m; kayalarda ise yaklaşık 10 m'dir.

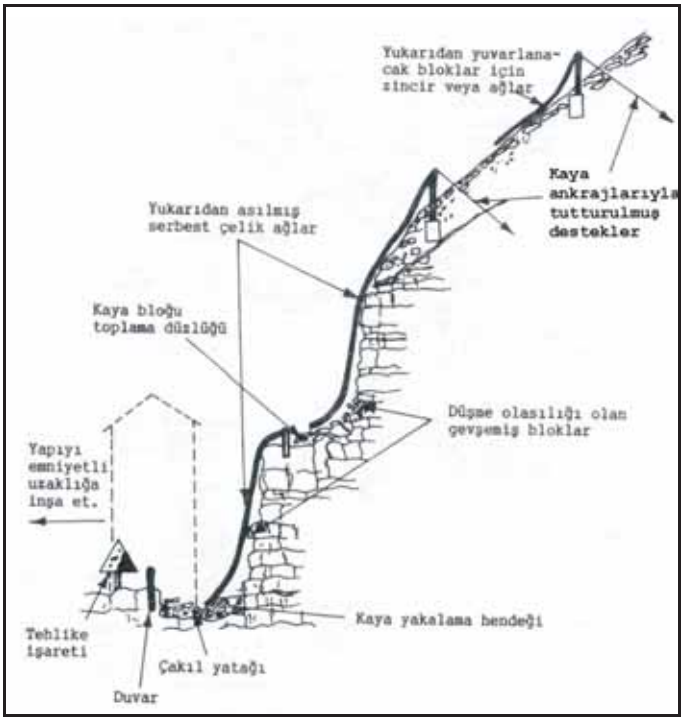
Püskürtme beton, *(shotcrete)* **:** Çimento, agrega ve suyun karıştırılarak dayanıklı lastik borularla basınçlı hava ile istenilen yüzeye püskürtülebilen beton**]**.



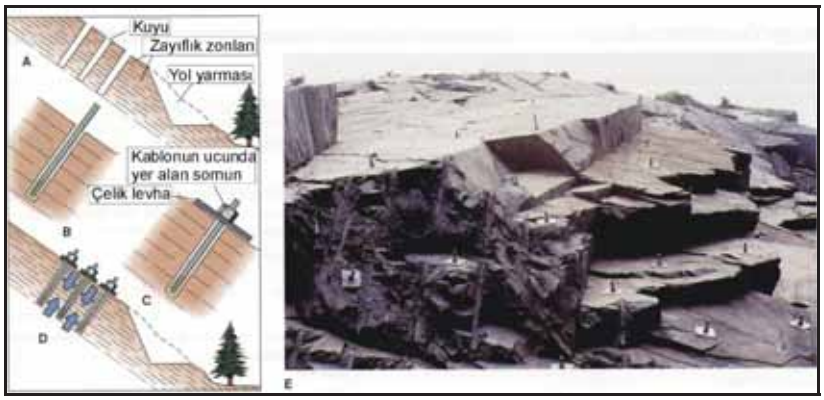
Şekil 9.23. Su basıncının etkisi. A) Yamaç stabilitesinin sağlanması amacıyla yapılan istinat duvarı arkasında yer alan toprağa gelen suyun oluşturduğu basınç
B) Su basıncının azaltılması için gerçekleştirilen drenaj uygulamaları. Şekil B'de, istinat duvarları arkasında toplanan suyun isalesi (=akıtma) amacıyla yapılan ve **barbakan** (*weep-hole*) olarak adlandırılan delikler görülmektedir.

Kütle hareketlerinin oluşumunu doğal yolla engelleyen faktörlerin başında; bölgedeki bitki örtüsünün varlığı yer alır. Bitki örtüsü sığ kütle hareketlerinde, özellikle krip veya hızlı akmalarda yüzey suyunu kontrol ederek, toprak tabakasını bir arada tutması açısından zeminin duraylılığını arttırmaktadır. Bu nedenle bitki örtüsünün bozulmaması stabiliteyi arttırıcı bir başka önlemdir. Bununla birlikte yapılacak inşaatların doğal dengeyi bozma ihtimalînin kuvvetli olması durumlarında ise yamaçta, muhtemel (olası) kütle hareketlerini engelleyici müdâhalelerin gerçekleştirilmesi gerekir. Kayma riski bulunan yamaçlarda gerçekleştirilebilecek müdâhaleler, kayalarda düşme ve yuvarlanmaları engellemek amacıyla yamaca serilen çelik ağlar *(steel wire mesh)*, yamacın stabilitesini arttırmak amacıyla yamaç boyunca

gerçekleştirilen kaya bulonu *(rock-bolt)*, ankraj *(anchor, tie-back)* uygulamaları ve yamacın önüne yapılacak olan ağırlıklı veya ankrajlı istinat duvarları, palplanşlar *(sheet pile)*, kazıklar ve topukta yapılacak olan ek desteklemeler şeklinde özetlenebilir. **Ankraj:** Derin kazıların güvenle açılması ve inşaat sırasında emniyetli olarak durması için yüksek şev duvarlarının desteklenmesinde kullanılan destek elemanıdır. Ankraj; üzerine uygulanan gerilme kuvvetini elverişli zemine ileten yapısal bir parça olup risk oluşturacak yanal yük, ankraj ile sağlam tabaka tarafından taşıtılması sağlanmaktadır (Şekil 9.24, 9.25).



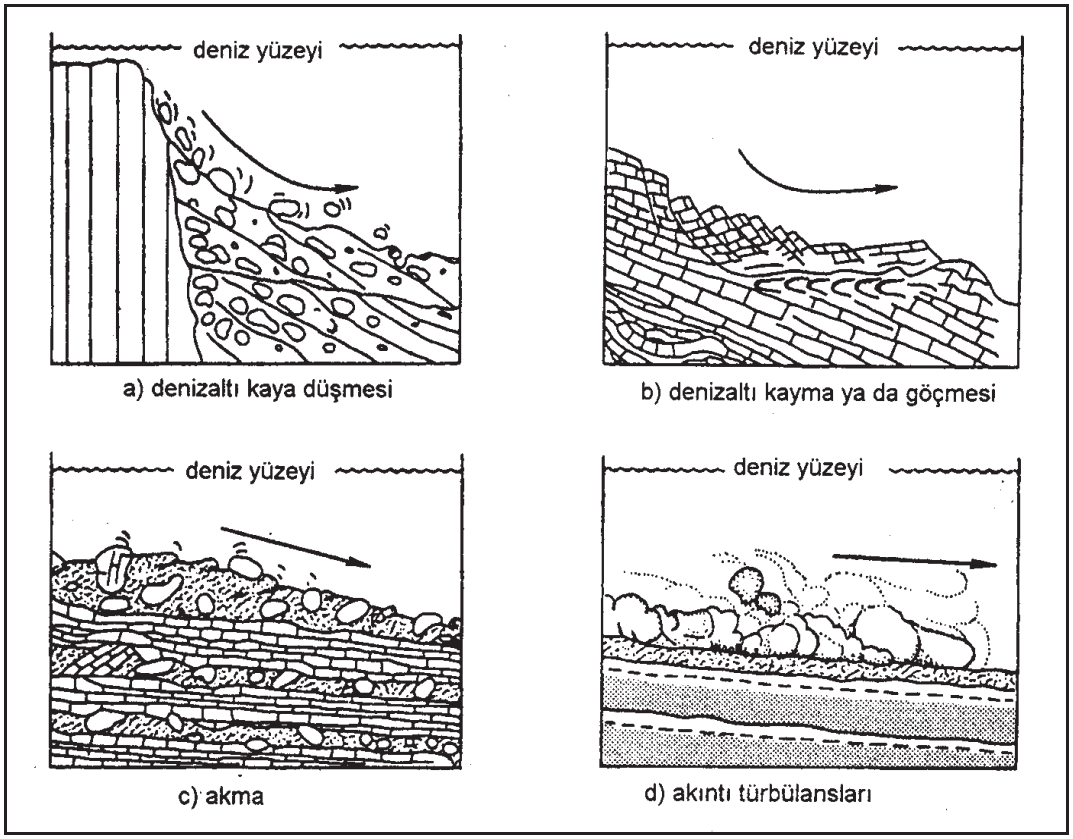
Şekil 9.24. Kütle hareketlerinin engellenmesinde kullanılan yöntemler (*Fookes* ve *Sweeney*, 1976).



Şekil 9.25. Yamaç duraylılığını sağlamak amacıyla kayada gerçekleştirilmiş bulonlama. Kazı ile birlikte gelişen gerilme boşalmalarının denetlenmesi, çatlaklı kayanın çekme gerilmelerini alabilmesini sağlamaya ve bozulan gerilme durumunu yeniden kurmaya yönelik önlemler, bulonlar *(bolt)* ve ankrajlar *(anchor)* ile sağlanmaktadır.

9.5. Deniz Altı Kütle Hareketleri

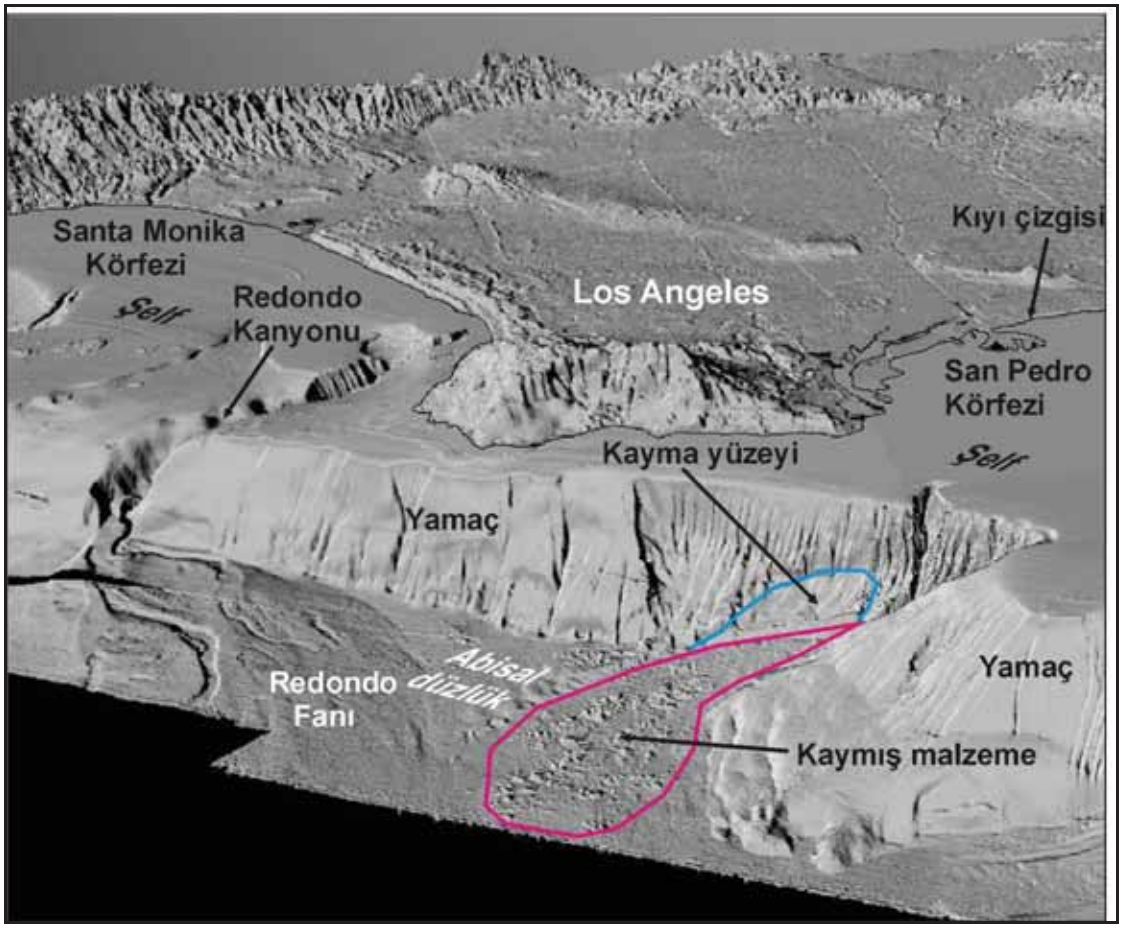
Kütle hareketleri denizel alanlarda da sıklıkla gelişmektedir. Denizlerde kütle hareketleri en çok kıta yamaçları ve kıta eteklerinde gerçekleşmektedir. Bu hareketleri denizlerde tetikleyen unsurların başında, sediment yükündeki artış, büyük kentlerin denize doğru mühendislik önlemleri alınmadan gelişmesi, depremler ve yamaç eğimi gibi kısmen kara alanlarındakilere benzer nedenler gelir. Bununla birlikte deniz tabanlarında, sediment içerisinde donmuş hâlde bulunan gazın (gaz hidrat/metan), ortam koşullarının değişimine (ısınma) bağlı olarak gaz hâline geçerek sedimentin içerisinden ayrılarak yukarı, deniz yüzeyine doğru yükselmesi sırasında sedimentler üzerinde yarattığı duraysızlıklar da deniz altı heyelânlarının önemli nedenleri arasında yer almaktadır. Deniz altında kütle hareketleri boyutu birkaç yüz metreden yüzlerce km'ye varan büyüklüklere ulaşabilmekte, sığ ve derin sularda birkaç derece gibi düşük eğimlerde oluşabilmekte ve büyük tsunamilere de neden olabilmektedir. Deniz altı kütle hareketleri; deniz altı kaya düşmesi, deniz altı heyelânı, deniz altı moloz veya çamur akması şeklinde görülebilmektedir (Şekil 9.26).



Şekil 9.26. Deniz altında oluşan kütle hareketleri (Önalp ve Arel, 2004).

Deniz altı heyelânları; limanlar-rıhtımlar, deniz altı boru ve enerji hatları, petrol-gaz plâtformları, su altı tünellerine ciddî hasarlar verirler. Deniz altı zemin hareketlerinde, çökellerin kayma direncinin çok düşük olması, boşluk suyu ve gaz basınçlarının geostatik gerilmelere yakın düzeylere çıkması duraysızlığı çok büyük alanlarda oluşturabilmektedir. Su altı yamaçlarında duraysızlığı; deprem, dalga etkisi, gelgit, çökelme hızı, gaz etkileri ve aşınmalar gerilmeyi artırarak direnci düşürmektedir (Önalp ve Arel, 2004).

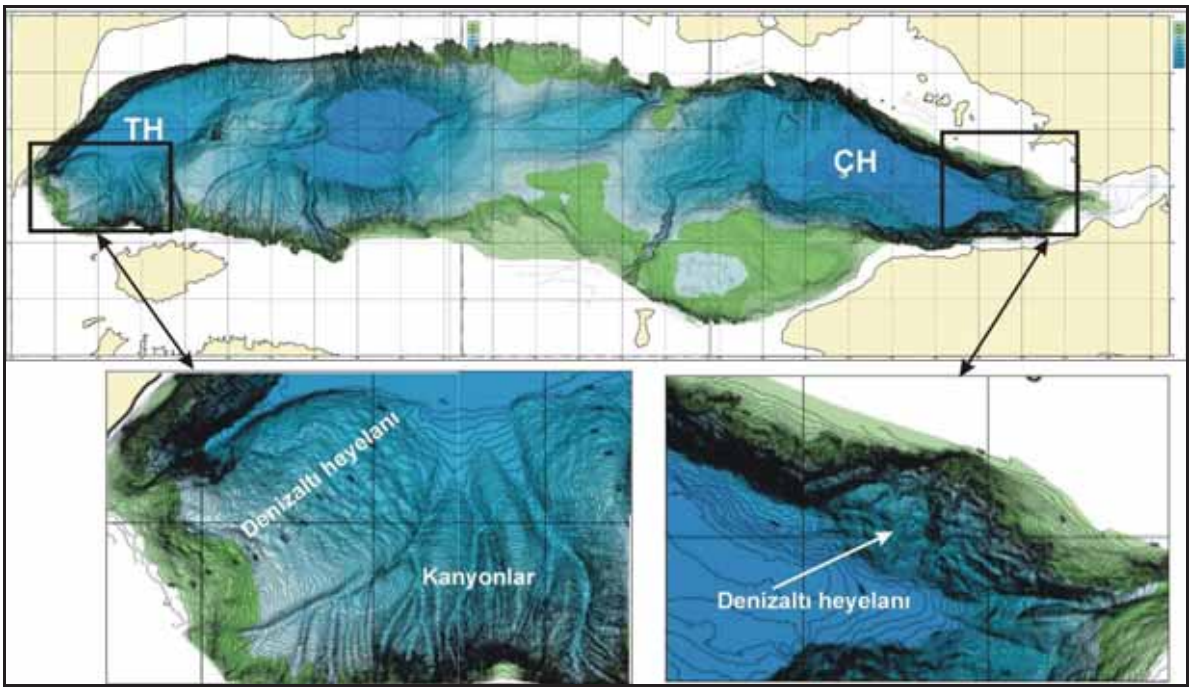
Heyelânlar, deniz altında da kayma yüzeyleri oluşturup bu yüzeyler boyunca hareket edebilirler. Bu tür hareketler, yamaçta büyük çanakların oluşmasına ve yamaç boyunca meydana gelen türbiditik akmalar ise kıta yamaçlarında kanyon oluşumlarına neden olurlar (Şekil 9.27).



Şekil 9.27. *Los Angeles* açıklarında kıta yamacında meydana gelmiş olan bir deniz altı heyelânına ait sayısal arazi modeli (*Normark* vd., 2004).

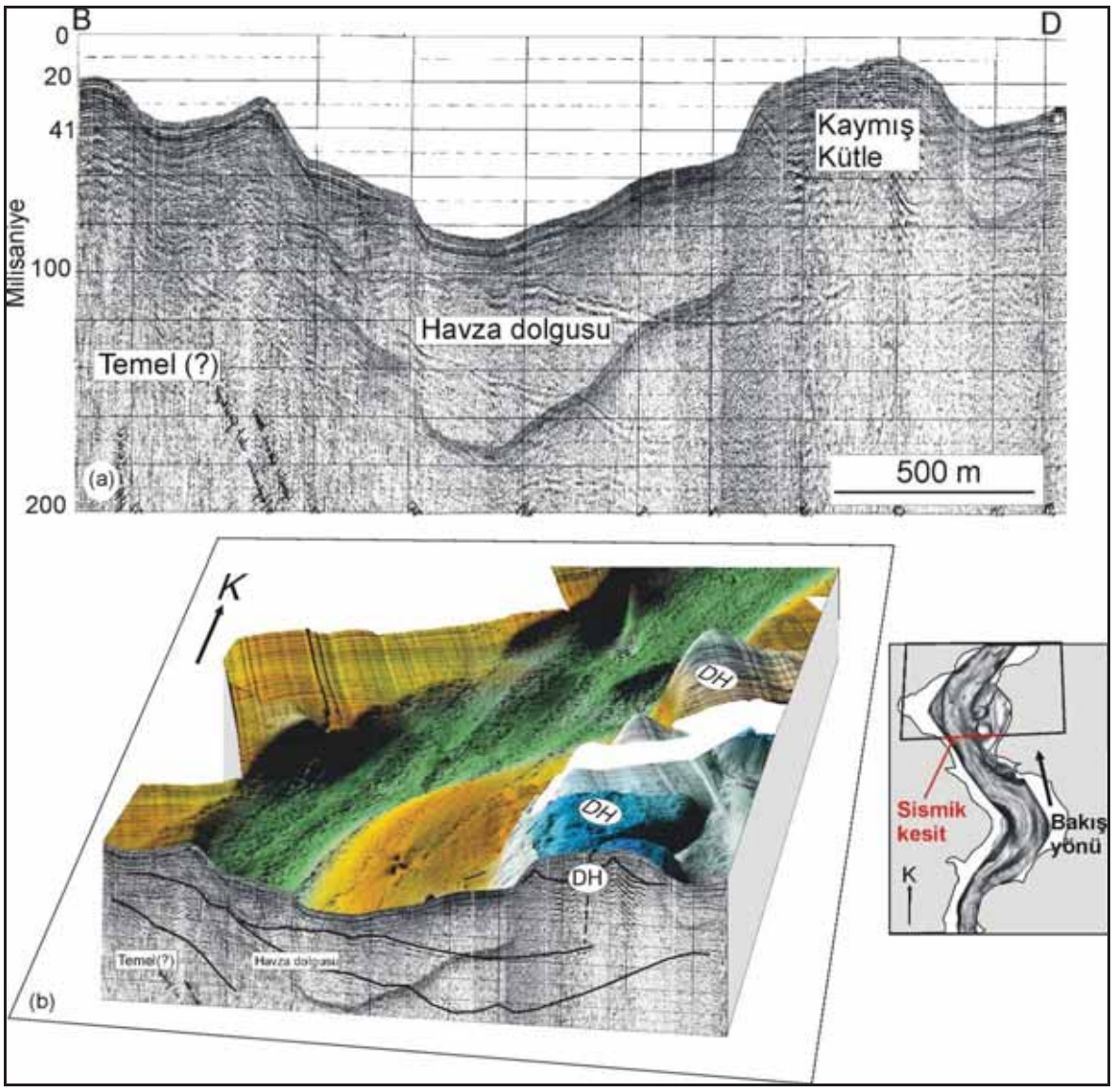
Deniz altı heyelânlarına ait benzer izler, ülkemizin gerek nüfus ve gerekse sanayi bakımından en yoğun bölgesi olan Marmara Denizi kıyı

yamaçları boyunca da gözlenmektedir (Şekil 9.28; Gazioğlu vd., 2002; 2005; Gökaşan vd., 2003; Kuşçu vd., 2005). Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'na (SHODB) bağlı TCG Çubuklu ve TCG Çeşme gemileri ile Fransız-*IFREMER* Deniz Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı *R/V Le Suroit* gemisi tarafından yapılan hassas batimetrik ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda, Marmara Denizi yamaçlarında şelfin dış kenarından abisal düzlüğe doğru olan pek çok sediment hareketlerine ait izler belirlenmiştir. Bu sediment hareketlerinin bir bölümü yamaç boyunca sediment yoğunluk akıntısı (türbiditik akıntılar) şeklinde olmakta ve yamaçlar üzerinde pek çok kanyonun gelişmesine sebebiyet vermektedir. Bunun dışında Çınarcık Havzası kuzey yamacında gelişmiş bir rotasyonal kayma ve Tekirdağ Havzası güney yamacında gelişmiş olan bir çamur akıntısı gibi kütle hareketlerini de Marmara Denizi içerisinde gözlemek mümkündür. Bu durum, tektonik açıdan aktif olan Marmara Denizi içerisinde bu aktivitenin tetikleyeceği heyelânların oluşabileceğini ve bu heyelânlara bağlı bazı tsunami oluşumlarını da mümkün kılabileceğini gündeme getirmektedir (Yalçıner vd., 2002).



Şekil 9.28. Marmara Denizi içinde, kıyı yamaçlarında oluşmuş heyelânlar. Mikro-batimetri haritası üzerinde (*Rangin* vd., 2001) Çınarcık Havzası (ÇH) kuzey yamacındaki rotasyonal kayma ve Tekirdağ Havzası (TH) güney yamacındaki çamur akıntısı (Gazioğlu vd., 2002, 2005).

İstanbul Boğazı içerisinde de bazı kütle hareketine rastlanmaktadır (Gökaşan vd., 2005, 2006). Bu hareketlerden bir bölümü akma türü yapılar olmakla birlikte boğazın Anadolu yakasında yer alan Umuryeri açıklarında Dz. K.K. SHODB tarafından toplanmış olan sismik ve batimetrik veriler, bu alanda önemli bir deniz altı heyelânının varlığına işaret etmektedir (Şekil 9.29). Bu verilerden yararlanarak Umuryeri kıyılarındaki içbükey şekillenmenin de söz konusu heyelânın çanağı olması gerektiği sonucuna varılmıştır (Gökaşan vd., 2006; Şekil 9.29).



Şekil 9.29. Deniz altı heyelânın izleri. İstanbul Boğazı Umuryeri açıklarında meydana gelmiş deniz altı heyelânının Dz. K.K. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığınca bu alanda toplanmış olan sismik ve mikro-batimetrik veriler üzerindeki izleri (Gökaşan vd., 2006) DH=Deniz altı Heyelân Malzemesi.

9.6. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:

9.6.1. Kuzulu Heyelânı/Akması: Doğal nedenlerle oluşan karmaşık kütle hareketlerine bir örnek, (Gökçeoğlu vd., 2005).

Sivas şehri kuzeyinde yer alan Koyulhisar'ın batısında, Kuzulu kasabasında 17 Mart 2005 tarihinde anî kar erimesi sonucu heyelân ile başlayıp, daha sonra akma şeklinde devam eden bir karmaşık kütle hareketi meydana gelmiştir. Gökçeoğlu vd. (2005) tarafından yapılan çalışmalarda, kayan ve akan malzemenin, 1.800 m'den fazla bir mesafe katettiği belirlenmiştir (9.6.1).

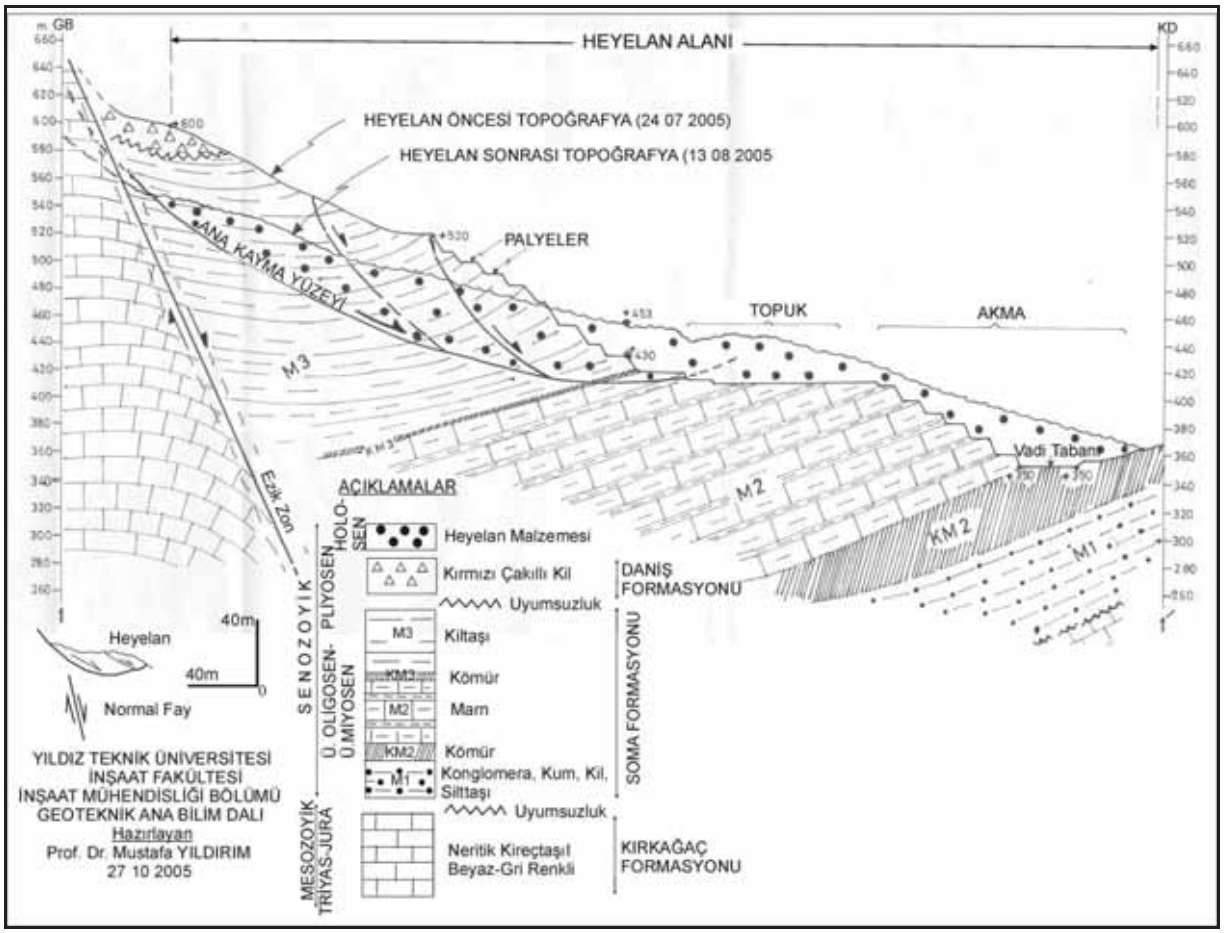


9.6.1. Kuzulu Heyelânı.

9.6.2. Manisa/Soma Heyelânı: Yapay nedenlerle oluşan kütle hareketlerine uygulamalı bir örnek, (Yıldırım, 2005).

25.07.2005 tarihinde Manisa İli, Soma İlçesi'ndeki bir kömür açık işletmesinde, fotoğrafı ve zemin kesiti, örnek şekil "9.6.2" de verilmiş olan, yaklaşık 5 milyon metreküp malzeme, açık işletmenin yamacı boyunca kaymıştır. Heyelânın ana nedeni, kabul edilebilir bir güvenlik için izin verilebilecek değerlerden daha dik kazı şevlerinin teşkil edilmiş olması, taç bölgesinde yamaca paralel uzanan bir fayın ve heyelânın taç bölgesine birleşen kuru dere yatağının dikkate alınmamış olmasıdır:





9.6.2. Manisa/Soma Heyelânı. Heyelân alanını ve heyelân mekanizmasını gösterir zemin kesiti (Yıldırım, 2005).

9.6.3. İstanbul “Kemerburgaz Düzenli Katı Atık Depolama Sahası”nda (Odayeri Deponi Alanı) oluşan heyelânın önlenmesine yönelik örnek uygulama:

Kemerburgaz Deponi Alanında katı atıkların depolanması için, 1993 yılı başında kullanıma hazır hâle getirilen deponi alanında 02.06.1995 tarihinde bir heyelân oluşmuştur. Bu alanda yapılan jeolojik ve geoteknik çalışmalar sonucu, deponi alanında limit denge durumundaki arazi yamacında hazır hâle getirilen ve deponi tabanı için oluşturulan düşük eğimli şevde, 1993 yılından itibaren çalışmalara iki yıl ara verilen deponi alanındaki stabilite bozukluklarının, sondajlarda öngörülenden daha çok fazla kalınlıklara ulaşan kontrolsuz yapay dolgu zeminden ve ara verilen süre içinde drenaj eksikliğinden kaynaklandığı görülmüştür (Yıldırım, 1997).

Dolgu zemininde oluşan heyelânı harekete geçiren en büyük etkenin, yüzeysel ve yüzey altı (yer altı) drenaj eksikliği olduğu saptanmıştır (Şekil: 9.6.3. A-J arası). Yağmurların oluşturduğu sızıntı suları, birkaç yıl öncesinden itibaren gereken yerlerde drenajların yapılmamış olması nedeniyle yamaçlarda dolgu zemininin hızla yumuşamasına, kayma mukavemetinin tahmin edilenden daha az olmasına ve dolgu stabilitesinin bozulmasına neden olmuştur. Gerekli önlemlerin alınmasıyla (9.6.3.F-J), duraylı ve çevre ile uyumlu duruma getirilen bu deponi alanı örneği, deponi alanlarının projelendirilmesine baz teşkil edecek esas kriterlerin, geoteknik çalışmalar yanında jeoloji ve mühendislik jeolojisi koşullarıyla da ne denli uyumlu olması gerektiğini göstermektedir. Gereken önlemlerin alınmasıyla, Kemerburgaz-Odayeri Katı Atık Tesisleri; günümüzde en modern ve tam anlamıyla çevre dostu, örnek gösterilecek tesisler arasında yer almıştır (Şekil: 9.6.3. K ve L).



9.6.3.A) Kemerburgaz Deponi Alanında (düzenli katı atık depolama sahası) katı atık dökümü için hazırlanmış BA-I Hücresi (Aralık1993).



9.6.3.B) Kemerburgaz Deponi Alanında çöp dökümüne hazır BA-I hücresi. Deponi alanı çalışmalarına iki yıl ara verildikten sonra ilk katı atıkların (çöplerin) dökülmesi (12.01.1995).



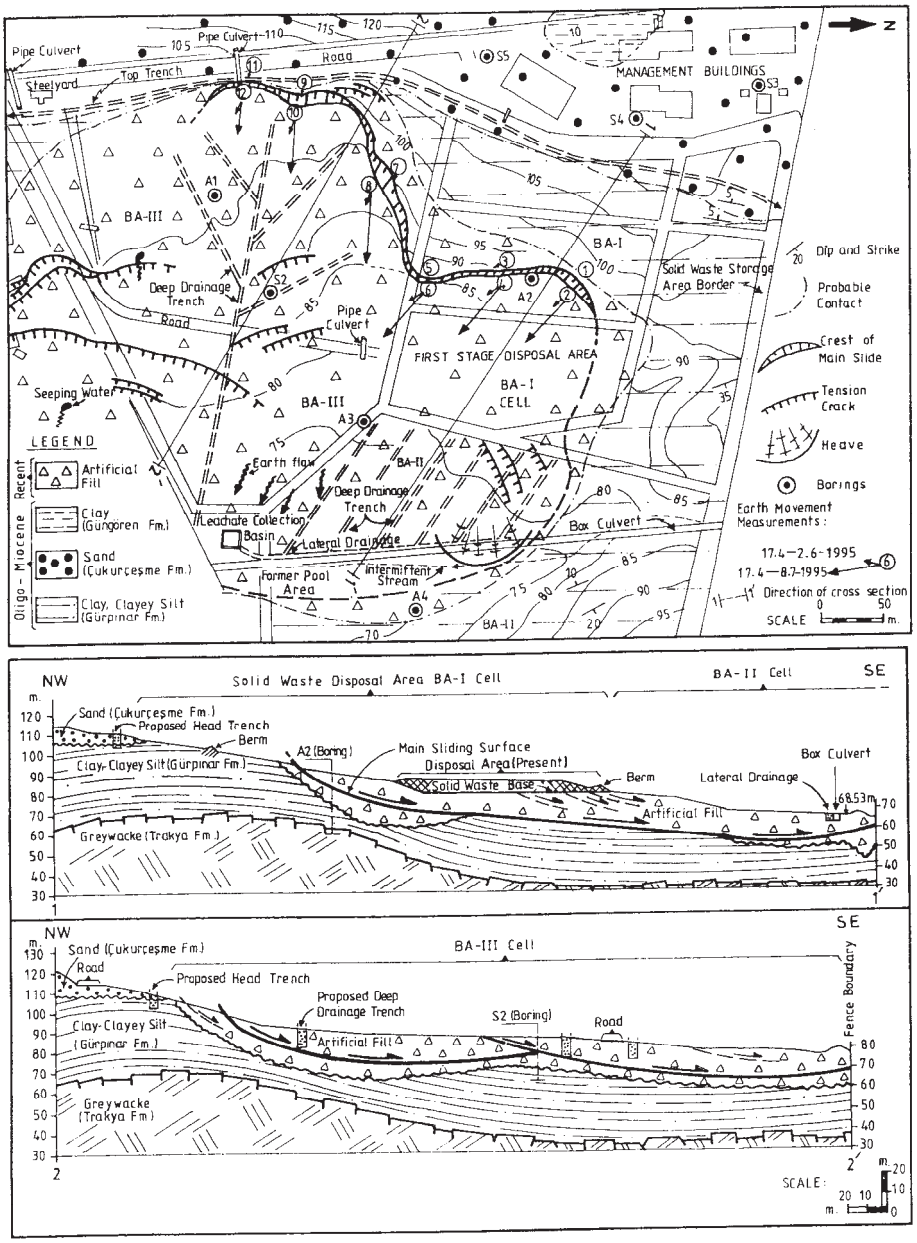
9.6.3.C) Deponi Alanında oluşan heyelân. Katı atıkların depolanması için kullanıma hazır hâle getirildiği düşünülen, ancak 1993 yılı başında yeterli drenaj önlemlerinin alınmadığı ve kontrolsuz yapay dolgu üzerinde yer alan ilk BA-I hücresinde başlayan heyelân (02.06.1995).



9.6.3.D) Heyelânın BA-1 ve yanında henüz çöp dökümü için hazırlanmamış BA-III hücresine doğru giderek büyümesi (08.07.1995).



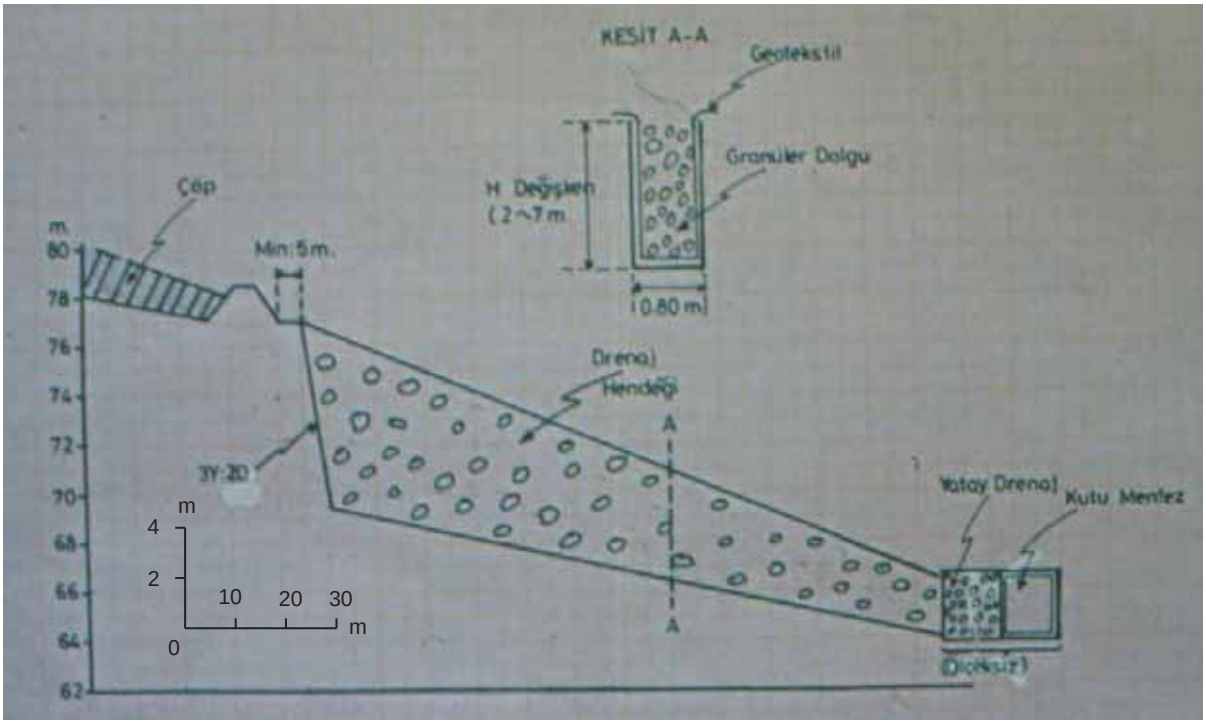
9.6.3.E) Vâdi tabanında heyelân topuğunda yer alan betonarme çöp sızıntı suyu havuzunun heyelândan etkilenmesi (08.07.1995).



9.6.3.F) Kemerburgaz Katı Atık Depolama Alanının *(solid waste disposal area)* mühendislik jeolojisi haritası ve kayma mekanizmasını gösterir zemin kesitleri. Heyelânı önlemek için; YTÜ, İnşaat Fak., İnş. Müh. Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı tarafından yapılan saha çalışmalarında, heyelânlı bölge üzerine yerleştirilen 12 adet gözlem noktasındaki topoğrafik ölçümlerle, kayma düzlemini oluşturan zemin hareketlerinin esas (ana) aynadaki şiddeti ve doğrultusu belirlenmiştir. Yüzeysel drenaj için önerilen en uygun kafa hendeği *(top trench)* ve yeraltı drenajı için önerilen drenler ile kılçık dren *(deep drainage trench)* yerleri, derinlikleri ve kutu menfeze *(box culvert)* bağlantı yerleri üstte yer alan mühendislik jeolojisi haritasında gösterilmektedir. Şeklin alt kesiminde gösterilen Kesit 2-2′ üzerinde yapılan stabilite analizleri heyelânın; esas aynasının yine dolgu sınırı içinde kaldığı, dolgu içinde oluşan diğer dairesel kaymalarla birbirini takip eder ve eklenir şekilde birleştiği (ileri ve geriye doğru gelişen heyelân/*progressive and retrogressive landslide*) ve dere talveginde son bulduğu anlaşılmaktadır (Yıldırım, 1997).

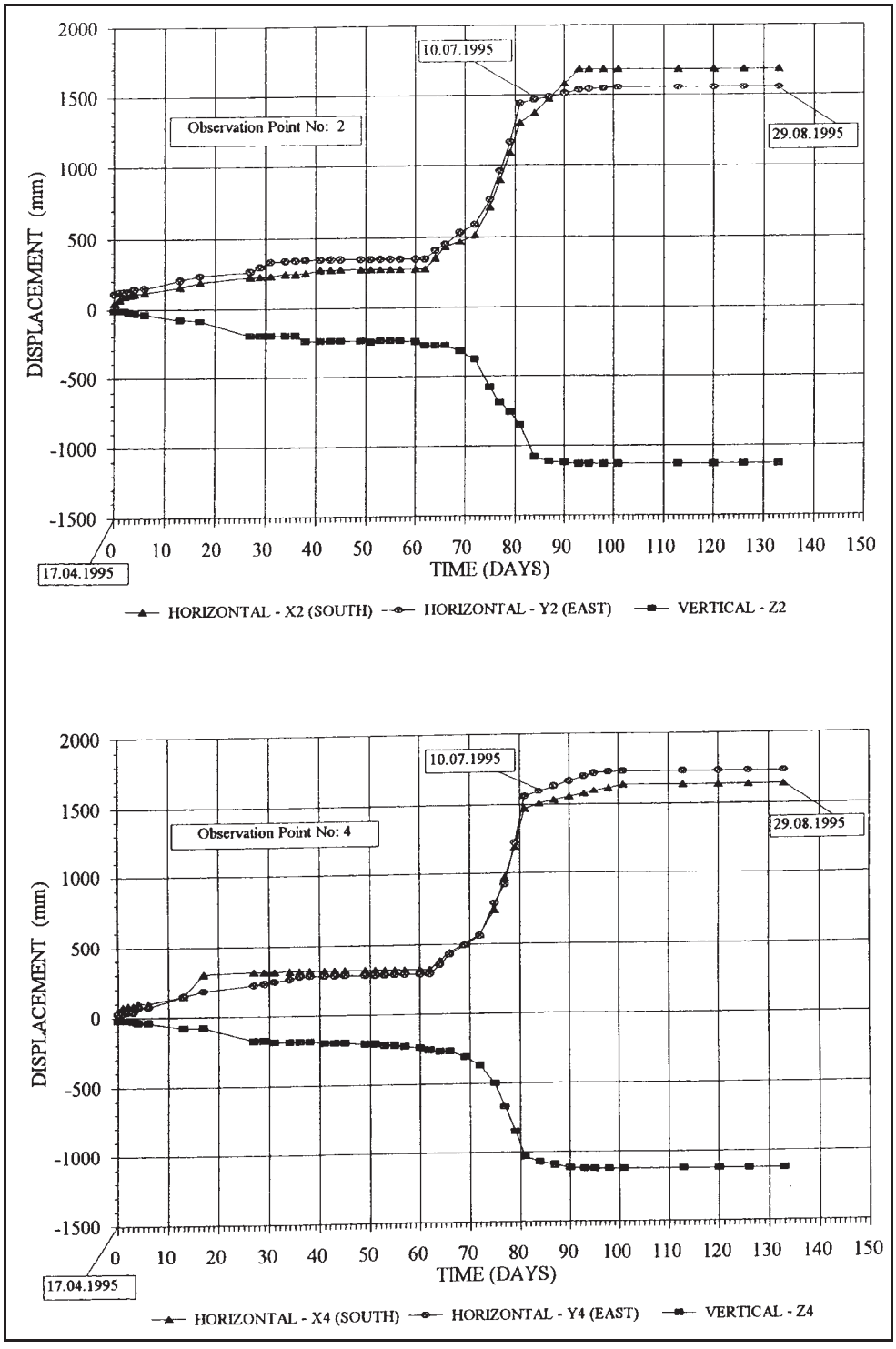


9.6.3.G) Yer altı (yüzey altı) drenaj hendeği yapım çalışması (1995).



9.6.3.H) Drenaj hendeği kesiti ve kutu menfez. YTÜ, İnş. Fak., Geoteknik Anabilim Dalı tarafından heyelânlı bölge için önerilen yer altı drenaj hendeği kesiti ve vâdi tabanında dere yatağı boyunca uzanan *kutu menfeze bağlantısı (1995).

***[Kutu Menfez**: Drenaj sırasında, dolgunun bir tarafında biriken veya bir taraftan gelen akarsuyu, kontrol altında diğer bir tarafa iletmek üzere kullanılan kare veya dikdörtgen kesitli betonarme su geçidi**]**.



9.6.3.İ) Kemerburgaz Deponi Alanında oluşan heyelânda belirlenen zemin hareketleri. Topoğrafik ölçümlerde 08.07.1995 tarihli maksimum yatay yer değiştirme 183 cm, düşey yönde ise 181 cm'dir. Drenaj önlemlerinin 10.07.1995 tarihinden itibaren gerçekleştirilmesine paralel olarak zemin hareketleri, iki ayrı gözlem noktasında da (2 ve 4 No'lu gözlem noktası) görüldüğü gibi Temmuz 1995 ortalarından itibaren yavaşlamaya başlamış ve 9 Ağustos tarihinde ise tamamen durmuştur (Yıldırım, 1997).



9.6.3.J) Heyelânın iyileştirme çalışmalarıyla önlenip stabil ve hazır hâle getirilmesiyle yeniden kullanıma açılan Kemerburgaz Deponi Alanı (Odayeri). BA-I Hücresi ile kil kaplaması (30cmx2) hazırlanmakta olan BA-II Hücresi. Ön tarafta kaplama kili olarak kullanılmak üzere alınan ve en alt kotta açılan tabiî zemin çukuru görülmekte. Depolama hücrelerinin altında yer alan tabiî zeminin kalın bir yeşil renkli geçirimsiz aşırı konsolide killerden oluşması ve yeraltı suyu içermemesi dolayısıyla yapay dolgu içinde sınırlı kalan heyelânda, katı atıklardan kaynaklanan herhangi bir çevre kirliliği oluşmamıştır (13.09.1995).



9.6.3.K) İstanbul Avrupa Yakası Katı Atık Tesisleri Girişi (Ocak 2013).

Bugün İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin bir kuruluşu olan İSTAÇ A.Ş. (İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş.) tarafından yönetilen Kemerburgaz (Odayeri) Düzenli Katı Atık Depolama Sahasında (deponi alanı), 1995 yılından itibaren İstanbul Avrupa Yakasının tüm katı ve tıbbî atıkları kontrollü olarak çevreyi ve yeraltı sularını kirletmeyen bu sahada depolanmakta, 2001 yılından itibaren de çöpten gübre üretimi (kompost gübre üretimi) sağlanmaktadır.



9.6.3.L) Katı atık gazından elektrik üreten santral. Kemerburgaz Deponi alanında katı atıklardan (çöp) elde edilen metan gazının toplanıp (yaklaşık 20-25 yıl süre boyunca) yakılmasıyla enerji üreten elektrik santrali tesisi (Ocak 2013).

Modern ve emniyetli Kemerburgaz Deponi Alanı Tesisinde 60 Hektar alandan toplanan gaz saatte 20 MW elektrik üretmekte, fazla gelen gaz, depolama tanklarında biriktirilmekte, elektrik santralinde 600°C sıcaklığa ulaşan bacalardaki ısıdan da faydalanılarak yapılan ısıtma sistemiyle, bitki yetiştirmek üzere seralarda kullanılmaktadır. Ayrıca, nihai kota ulaşmış katı atık tepe ve tepe düzlükleri geçirimsiz kil ile kaplanarak üzerleri bitkilerle yeşillendirilmeye başlanmıştır. Ortadoğunun en büyük "Düzenli Katı Atık Tesisleri Depolama Sahası"nı oluşturan Avrupa Yakası, Kemerburgaz-Odayeri Deponi Alanı, çevre dostu ve çalışan mühendis ve teknik elemanlarıyla birlikte örnek bir tesistir.

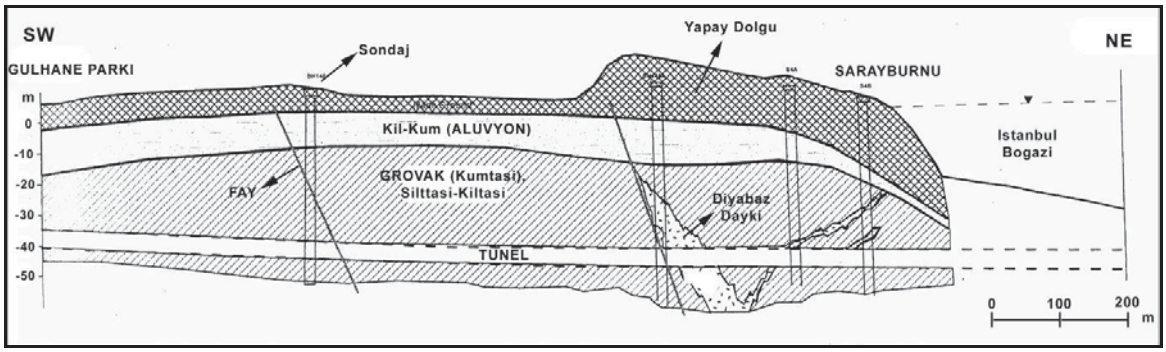
9.6.4. İstanbul Topkapı Sarayı, İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi Binası ile Sur-i Sultanî Duvarlarında meydana gelen deformasyonların nedenleri:

Yataya yakın bir topoğrafyada yer alan Topkapı Sarayı'na ait Gülhane Parkı içindeki, Zemin+1 Normal Kattan oluşan müze binası ve yakın çevresinde yapılan sondaj verilerine göre zemin yüzünden itibaren 14 m kalınlığa ulaşan yapay bir dolgu, yapay dolgunun altında 8 m kalınlığında killi silt ve plâj kumundan oluşan güncel alüvyal çökeller yer almaktadır. Daha altta ise zemin yüzünden 40 m ilâ 47 m'ler arasındaki derinliklerden geçen yan yana iki

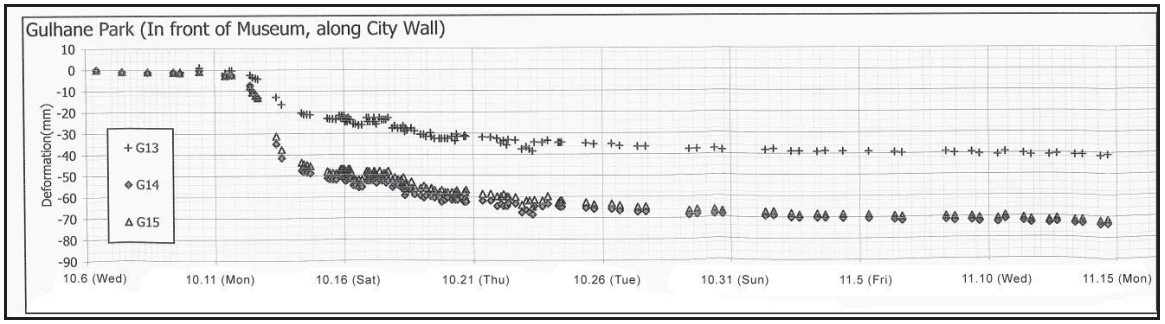
adet TBM ile açılan Marmaray Tünel Güzergâhının da içinden geçtiği grovak kayaları (Paleozoyik yaşlı) bulunmaktadır. Grovaklar (kumtaşı), silttaşı ve kiltaşlarıyla ardalanmalı (=tekrarlanmalı) olup inceleme konusu alanı ve çevresinde doğu batı doğrultuda uzanan birbirlerine paralel, birkaç adet ve yaklaşık düşeye yakın (70°) ezik kırık zonlarını içermektedir.

Sarayburnu-Yenikapı arasında Marmaray Projesi kapsamında raylı sistemi oluşturan ve batırma tüp tünele birleşen yeraltı delme tünelleri tam kesit yöntemiyle (TBM: Tünel Açma Makinası/Köstebek, *tunnel boring machine*) gerçekleştirilmiştir. Gülhane Parkı içinde yer alan iki katlı mütemadi temel sistemine sahip çelik yapı olarak inşa edilmiş "İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi" binası altında, zemin yüzünden itibaren 40 m ilâ 50 m derinlikler arasında grovak kayaları içinden geçen 1. tünel güzergâhında 10 Ekim 2010 tarihinde TBM'in geçişi sırasında zemin yüzünde teşkil edilen okuma noktalarında tünelin açılması sırasında ve sonrasında düşey zemin yer değiştirmeler ölçülmüş ve Müze Binası ile Sur Duvarlarında da ayrılmalar, çatlaklar tespit edilmiştir. En yakın okuma noktalarında yapılan ölçümlerde, tünel kazısının başlaması ile birlikte düşey zemin deplâsmanlarının oluşmaya başladığı tespit edilmiş, yaklaşık 7 gün sonra deplâsmanların 60 mm - 70 mm değerine ulaştığı, daha sonra gittikçe yavaşladığı ve yaklaşık 40 gün içinde 10 mm civarında ilâve deplâsman oluştuğu gözlenmiştir. Açılan 7,85 m çaplı 1. tünelin zemin yüzünden derinliği göz önüne alındığında, ölçülen yüzey zemin deplâsmanlarının (=yer değiştirme) beklenilenden oldukça fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedenleri arasında üst yapay dolgu tabakasının tünel makinasından (TBM) kaynaklanan titreşimlerle sıkışması en yüksek ihtimal (olabilirlik, olasılık) olarak öngörülmüştür. Bunun yanında, tünel açılması ve/veya başka nedenlerle yeraltı su seviyesi değişimleri ve tünel güzergâhında rastlanılan kırık zonların oturmalara yol açmış olduğu, bu nedenlerle de muhtemelen 2011 yılının ilk aylarında 1. tünele 68,6 m'lik yatay bir mesafede açılacak 2. tünelin açılması sırasında da titreşimler mümkün olduğunca düşük düzeylerde tutulması, yeraltı su seviyesinde değişimler oluşmaması için azamî dikkat gösterilmesi, ezik zonların önlem alınarak geçilmesi, aynı zamanda yüzey zemin hareketlerinin ölçümüne itina ile devam edilmesinin uygun olacağı belirtilmiş, müze binasının, mevcut durumda dikkate değer bir tehlike arz etmediği saptanmıştır.

Aşağıda yer alan Örnek Şekil "9.6.4.A"da; Marmaray Projesi-Japon Ortak Girişim Firmaları ekibi tarafından hazırlanmış Gülhane Parkı-Sarayburnu arası zemin kesiti ve Marmaray Tünel Güzergâhı, 9.6.4.B'de; İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi ve yakın çevresinde zeminde gözlenen oturmalar, 9.6.4.C'de; "İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi" Binası'na bitişik Tarihî Sur Duvarı'nda (Sur-i Sultanî Suru) oluşan çatlak ve çatlağın zamana bağlı hareketini izlemek amacıyla, çatlak üzerine yerleştirilmiş yüzey ekstansometreleri, 9.6.4.D ve 9.6.4.E'de de bu yüzey ekstansometrelerinin yakından görünüşü yer almaktadır. Şekil 9.6.4.D'deki ekstansometre, çatlağın ilerleme yönünü ve miktarını göstermekte olup **"Çatlak Ölçer"**, 9.6.4.E'deki ekstansometre ise çatlağın hareket miktarını ölçmekte olup "**Deplâsman Ölçer**" olarak adlandırılmaktadır. 9.6.4.1'de ise ilgili onarım-iyileştirme önerilerine yer verilmektedir.



9.6.4.A) Gülhane Parkı-Sarayburnu arası zemin kesiti ve Marmaray Tünel Güzergâhı; Ekim 2010.



9.6.4.B) Zemin oturması. Gülhane Parkı, İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi Binası ve yakın çevresinde Marmaray Projesi, tünel açma çalışmaları sırasında 11 Ekim - 15 Kasım 2010 tarihleri arası, zeminde gözlenen oturmalar.



9.6.4.C) Yüzey ekstansometreleri. Gülhane Parkı İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi Binasının bulunduğu alanda, zemin yüzeyinin 40 m altından, TBM Makinası'nın Ekim 2010 tarihinde geçişi sırasında müze binasına bitişik, tarihî "Sur-i Sultanî Suru" duvarında oluşan bir çatlak ve bu çatlağın ilerleme yönünü ve genişliğini zamana bağlı olarak değişimlerinin ölçülmesi için çatlak üzerine yerleştirilmiş yüzey ekstansometreleri (03.11.2010).



9.6.4.D) Çatlak ve Çatlak Ölçer. C'de Sur-i Sultanî Suru duvarında görülen çatlağın yakından görünüşü ve çatlağın zaman içinde, ilerleme yönünü ve genişliğini gösteren Çatlak Ölçer *(crack meter)* (03.11.2010).



9.6.4.E) C'de yer alan Sur-i Sultanî Suru duvarındaki çatlağa sabitlenmiş, çatlağın zamanla değişen genişliğini ölçen Deplâsman Ölçer (03.11.2010).

9.6.4.1) Tarihî "Sur-i Sultanî" Sur duvarında görülen çatlaklara ilişkin tavsiye edilen onarım ve iyileştirme önerileri :

Osmanlı İmparatorluğu'nun 7. Sultanı, 29 Mayıs 1453'de İstanbul'u fetheden Fatih Sultan Mehmed Han (II. Mehmed, 1432-1481) tarafından İstanbul Sarayburnunda 1478 tarihinde yaptırılan Topkapı Sarayı'nın kara tarafını koruyan yaklaşık 1400 m'lik Sur-i Sultanî Surlarında (Sur-u Sultanî veya Topkapı Sarayı Surları) yer alan tonoz yüzeyindeki çatlama ve ayrılma görülen kısımlardaki taşlar, ilgili kısım askıya alındıktan sonra değiştirilmesi önerilmiştir. Ayrıca tonoz tuğlaları arasında ortaya çıkan çatlaklara, özellikleri belirtilen bağlayıcı malzeme enjekte edilmesi, duvarlarda görülen çatlaklar için, izleyen onarım yöntemi benimsenmesi, eğer oturmalar tamamlanmışsa yapının taşıyıcı sisteminde sistem iyileştirme ve onarım önerilerinin yapılması uygun olacağı tavsiye edilmiştir. Duvarlardaki 1 cm'den geniş çatlaklar doldurulabildiği kadarıyla Horasan Harcı ile doldurulması (C, D ve E), doldurma işlemi tamamlandıktan sonra da bazı boşluklar kalmış olacağı, ancak Horasan Harcı'nın basınçla enjeksiyonu mümkün olmadığından genişliği 1 cm'den fazla olan çatlaklar, Horasan Harcı ile doldurulduktan sonra bu çatlaklara aşağıda sözü geçen puzolanik esaslı **(Doğal Puzolan:** Öğütülerek su ve kireçle karıştırılınca çimentolama gücü kazanan Trakitik Tüf**)** kireç enjeksiyonu yapılması tavsiye edilmiştir. Horasan Harcı'nın uygulanmasını zorlaştıran, genişlikleri 1 cm veya daha dar olan çatlaklar, Horasan Harcı'nın özelliklerini benzer özellikler gösteren puzolanik esaslı kireç enjeksiyon harcı enjekte edilmesi önerilmiştir (Kocatürk, Yıldırım, Özaydın, 2010).

Horasan Harcı özelliklerine dair kısa bilgiler, aşağıda verilmektedir:

Osmanlı İmparatorluğu (Osmanisches oder Türkisches Reich) döneminde inşa edilen yapılarda; Türkler tarafından bulunan; öğütülmüş pişmiş tuğla, kiremit gibi pişirilmiş kil malzemelerin tokmakla dövülüp toz hâline getirilmesinden sonra elekten geçirilerek elde edilen ince tozun veya taş tozunun kireç ve su ile karıştırılmasından oluşturulan harca **"Horasan Harcı"** denilmektedir. Horasan harcında kilin pişirilme sıcaklığı, harçta en önemli etkenlerden biridir (Ulukaya vd. 2012). Bu harç *(mortar)*, bağlayıcı olarak özel geliştirilmiş puzolanik malzeme ve agregaları da içermekte, kireç ile pişmiş kil malzemeye, tuğla tozu, gereğinde ek olarak da yer yer yumurta akı ve reçine de katılmaktadır. Kırılmış tuğla, kirece katıldığında serbest kirecin açığa çıkarak sıva veya duvar yüzeyinde çiçeklenme oluşmasını (kalsiyum karbonat) engellemektedir **[**günümüzde; sertleşmiş beton içindeki, çimento harcındaki bileşenlerin çözünüp dışarı sızması ve yüzeyde kristalleşip birikmesi sonucu oluşan lekeler de "**çiçeklenme**" olarak tanımlanmaktadır**]**.

Restorasyon uygulamalarında geleneksel yöntemlere uygun olarak şantiyede imâlatı yapılan ve "Horasan Harcı" olarak isimlendirilen tuğla kırığı katkılı, kireç esaslı harçlar kullanılmaktadır. Bu harçlar tarihî eserde kullanılmış mevcut yapı malzemelerine uyum sağlamaktadır. Karışıma ilâve edilen ve yapay puzolanik malzeme olarak tanımlanan tuğla, keramik=seramik, pişmiş toprak kırıkları ve tozları, harca hidrolik özellik kazandırmaktadır. Horasan Harcı olarak tanımlanan harcın kireç/tuğla oranı genellikle 1/1 1 ilâ /4 arasında değişmektedir. Bu harca, mukavemetini arttırmak için; hem dolgu hem de katkı maddesi olan tuğla-keramik kırıkları ve tozu yanında kum, taş tozu, taş pirinci, katkı olarak yumurta akı vb. maddeler de ilâve edilmiştir. Söz konusu kırılmış tuğla, kirece katıldığında, içeriğinde bulunan aktif killer kireçle reaksiyona girerek hidrolik özellik, yani su ile reaksiyona girerek *****prizlenme özelliği kazanan bağlayıcıya dönüşmektedir.

***[Prizlenme:** Beton ve harçlarının katılaşmaya başlama süresi**].**

Kireç elde etmek üzere, içeriğinde % 10-25 arasında kil bulunan killi kalker, 900°C – 1.100°C kızdırıldığında, killi kalkerin içeriğinde bulunan killer aktif hâle geçerek, su kireci (hidrolik kireç) elde edilmektedir. **Su kireci;** bileşiminde % 10'dan fazla kil bulunan killi kalkerlerin ve % 50 kalker + % 50 kilden oluşan marnların *(marl)*, sinterleşme sınırının altında pişirildikten sonra su, buhar ya da öğütme yolu ile toz hâline getirilip su ile karıştırıldıktan sonra belirli sürelerde havada veya su altında sertleşmesi ile oluşan bağlayıcı bir malzemedir (Uğur, 2011). Eğer kireçtaşında kil yoksa yani sadece kalsiyum karbonat içeriyorsa bu durumda **hava kireci** elde edilmiş olmaktadır. Hava kireci kullanılarak elde edilen harç, suya karşı dayanımsız iken, hidrolik kireç veya tuğla-keramik kırığı ve tozu ilâve edilerek hazırlanan hidrolik harçlar ise suya karşı dayanıklıdır (Güleç, 1989).

Osmanlı İmparatorluğu Döneminde Horasan Harcı hazırlamada kullanılacak tuğlaların yeni ve iyi pişirilmiş olması koşulu şartnamelerde belirtilmiştir. Bu koşulların eski şartnamelerde yer alması, Horasan Harcı ve sıvası hazırlanması ile ilgili oluşan yılların deneyimini ve birikimini ifâde etmektedir. Bu birikim, çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanması ile birlikte azalmış, daha sonraki dönemde ise sadece eski eser nitelikli yapılarda kullanımı devam etmiştir. Restorasyon sırasında hazır harçların kullanımı, sahada yapılan harç imâlatları sonucunda oluşan birçok sakıncayı ortadan kaldırmaktadır. Horasan Harcı olarak kullanılacak hazır harçlar; kireç esaslı olmaları, alt yüzeye iyi yapışmaları, nefes alabilme yeteneği yüksek, içerdiği suda çözünebilir tuzlar ve su emme özelliği sınırlı, çiçeklenmeye karşı dirençli olmaları gibi özellikte hazırlanmaları esastır. Mekanik özellikleri de standartların tarif ettiği sınırlar içinde olmalıdır. Duvar sıvalarında ve duvar örme işlemlerinde şantiyede üretilen Horasan Harcı'nın kullanımı uygun olmakla birlikte, enjeksiyon işlemlerinde bu amaç doğrultusunda üretilmiş hazır harçların kullanımı daha uygun olacağı tavsiye edilmiştir. Çünkü enjeksiyon yapılacak çatlakların doldurulabilmesi için, enjeksiyon malzemesinin akışkan olması, içeriğinde enjeksiyon işlemini engelleyecek boyutta dolgu malzemesinin kirlilik oranında dahi olsa, bulunmaması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılacak malzemenin de tıpkı Horasan Harcı'nda olduğu gibi mevcut yapı ile uyum göstermesi gerekmektedir. Böylesi bir enjeksiyon harcının sahip olması gereken özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Harç, kireç esaslı olmalı, yüksek akışkanlık gösterirken, su kusma görülmemeli, hidratasyon ısısı düşük ve sülfatlara karşı dirençli, nefes alabilme özelliği gelişmiş, mekanik özellikleri standartların tarif ettiği sınırlar içinde olmalıdır. Doğal hidrolik kireç, puzolanik filler (**Filler** = Taş unu, ≤0.25 No'lu elekten geçen en ince agrega) ve mikronize karbonatlar içeren malzemeye bazı özellikler sağlayıcı kimyasal katkıların ilâve edilmesi, rötreyi engellediğinden ve işlenebilirliği arttırdığından, uygun olacaktır. Bu özellikler; plâstik hâlde iken rötreyi engelleyici maddeler, doğal su tutucular ve akışkanlaştırıcılardır. Katkı maddelerinin hiçbirisi çözünür tuzlar (alkali, sülfat, klor veya nitrat) içermemelidir ve zamanla bozulmamalıdır. Elde edilen harcın hiçbir orijinal yapı malzemesi veya restorasyon işlemi sırasında ve sonrasında kullanılan herhangi başka malzemeyle olumsuz kimyasal etkileşim oluşturmadığı kanıtlanmış bir harç olması gereklidir. Söz konusu harç, aşağıdaki teknik özelliklere sahip olması tavsiye edilmektedir:

Harcın dâne boyutu	: Dâne 0-30 mikrometre arasında değişmeli ve % 85 i 15 mikrometre=$15x10^{-6}$ m olmalı,
Priz süresi	: 10-20 saat
Basınç dayanımı, UNI EN 196	: 7 günde 100 kgf/cm^2
	: 28 günde 170 kgf/cm^2
Eğilme dayanımı, UNI EN 196	: 7 günde 30 kgf/cm^2
	: 28 günde 50 kgf/cm^2
Statik elâstisite modülü, UNI 8556	: 85.000 kgf/cm^2

Isı genleşme katsayısı : 8 x 10^{-6}

Uygulama Yöntemi:

- Mevcut çatlakların mekanik temizliği yapılmalı,
- Çatlak boyunca 1 m'ye en az 4 adet olacak şekilde matkapla delik açılıp enjeksiyon hortumu yerleştirilmeli,
- Çatlakların her iki yönü hidrolik kireç esaslı harç ile kapatılmalı, harcın mukavemetini kazanması için en az 24 saat beklenmeli,
- Toz hâlindeki 1 kg enjeksiyon malzemesi 0,3 litre temiz su ile düşük hızlı matkap yardımıyla karıştırılarak homojen hâle getirilmeli,
- Enjeksiyon makinası düşük basınçta çalıştırılarak en alt sıradaki delikten başlanarak hazırlanan harç enjekte edilmeli ve
- Enjeksiyon malzemesinin üst sıradaki başka bir delikten taşması ile enjeksiyon deliği kapatılarak diğer deliğe geçilmeli, yani tüm çatlakların enjeksiyon harcı ile doyurulmasına özen gösterilmesi tavsiye edilmektedir.

Yukarıda belirtilen sözlü ve yazılı öneriler doğrultusunda alınan önlemler ile 2011 yılından itibaren gerek İslâm Bilim ve Teknoloji Müzesi Binası, gerekse Müze Binası'na bitişik Topkapı Sarayı'nı çevreleyen Sur-i Sultanî Surları'nda görülen tüm deplâsmanların azalarak son bulduğu gözlenmiştir (Kocatürk, Yıldırım, Özaydın, 2010). Sur-i Sultanî Surları'nın aslına uygun olarak **restorasyon** (=aslına bozmadan onarma, yenileme) ve **konservasyon** (=koruma) çalışmalarına Mart 2011'de başlanmış olup bu çalışmaların İstanbul'un diğer tarihî surlarında da devam etmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

9.6.5. Farklı Oturmaya Örnek:

Türkiye'nin birçok yerinde bilhassa yerleşimi yoğun olan illerde, yüksek eğimli yamaçlarda açılan şevlerde stabiliteyi sağlamak için yapılan istinat yapılarında ya da eğimli bu tür arazilerde toplu konut veya dik yamaçtan kaynaklanan manzarası güzel villa türü yapıların oturtulması için açılan temel zeminlerinde stabilite ve bilhassa bina temellerinde farklı oturma gibi çok sık problemlerle karşı karşıya kalınmaktadır.

Bina temelleri için yamaçta hafredilerek oluşturulan düzlükte, bina temel kotlarının; mevcut yüksek yamaç eğimi nedeniyle yamaç üst kesimlerinde ana zemine, daha düşük kotlarda yer alan yamaç alt kesimlerinde ise zemin yüzeyine yakın yer alacaktır. Temellerin zemin yüzeyine yakın ayrık zemin, kontrolsuz yapay dolgu veya bitkisel toprak *(topsoil)* üzerine oturtulması, drenaj önlemlerinin iyi alınamaması gibi nedenlerle, zaman içinde bu tür zayıf zeminler *(weak soil)* farklı oturmalara neden olabilecektir. Bu durum, drenaj eksikliği yanında, çoğunlukla bazı kontrol mühendisliği hizmetleri eksikliğinden,

diğer bir ifâde ile ana zemin, kontrolsuz yapay dolgu veya bitkisel toprak zeminlerin iyi tanınamamasından ya da farkına varılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu gibi nedenlerle, zeminde stabilite bozuklukları ve üzerinde yer alan yapılarda önlem alınmadığı takdirde hasar ve sorunlar ile karşı karşıya kalındığı günümüzde de sık sık gözlenmektedir.

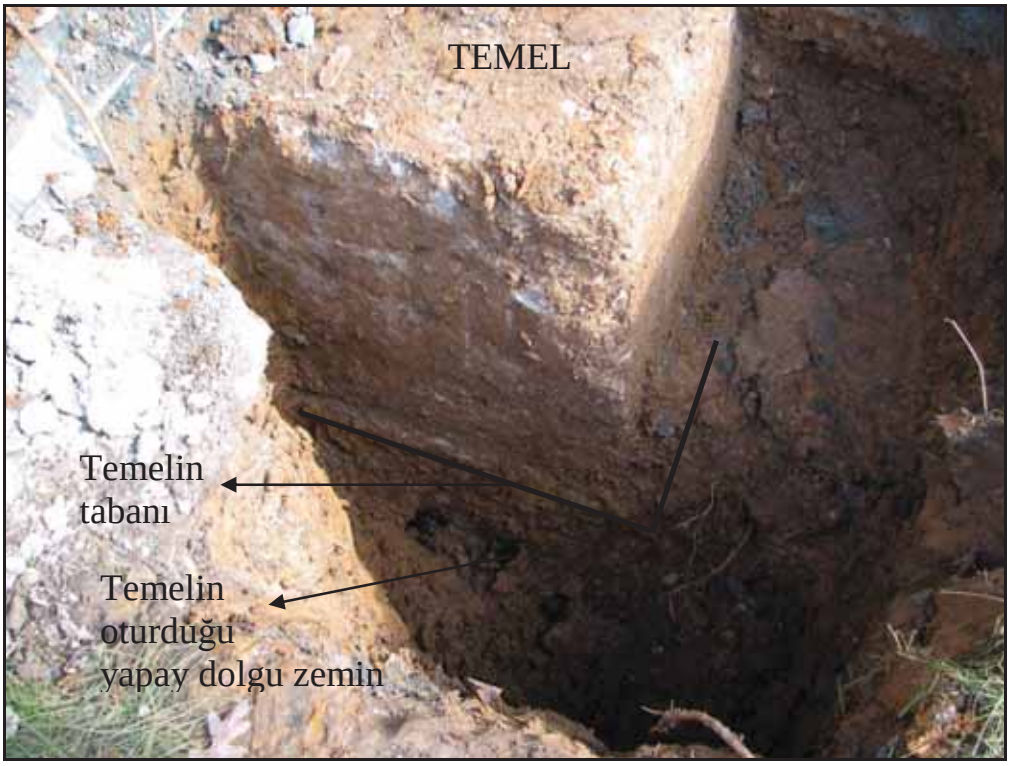
Aşağıdaki örnekte, İstanbul Asya Yakasında Beykoz'da vâdiye bakan bir yamaçta, site içinde yer alan müstakil ve her biri 3 katlı inşa edilmiş tekil temeller *(individual footing)* üzerine inşa edilmiş villaların birinde, zemin etüdü yapılarak villa temellerinde farklı oturmaların oluşturduğu hasarlar tespit edilmiştir:

Binada oluşan çatlakların nedeni için yerinde yapılan incelemelerde, betonarme villa, 1 bodrum+zemin+1 normal kat+1 çatı katından oluştuğu görülmüştür. Yüksek eğimli bir vâdi yamacında yer alan villanın yan duvarlarında, pencere köşelerinde ve üst balkon konsolunda arazi eğimi yönünde çatlaklar meydana geldiği gözlemlenmiş, villanın bahçesinde yapılan gözlemlerde ise arazinin yöredeki yaklaşık % 35 eğimli alanda, zeminin yüzey kesimlerinde ana zemine ait olmadığı tespit edilememiş yapay dolguda, yer yer krip niteliğinde hareketlerin oluşturduğu morfolojik yapı belirlenmiştir. Villa ve civarında 1. yazar tarafından yapılan incelemelerde, arazi eğimi sebebi ile villanın çevresine ve temellerine gelebilecek yağmur sularının yeterince uzaklaştırılmasını sağlayacak gerekli ve kapsamlı bir drenaj sisteminin mevcut olmadığı ve genel bir drenaj probleminin de var olduğu tespit edilmiştir.

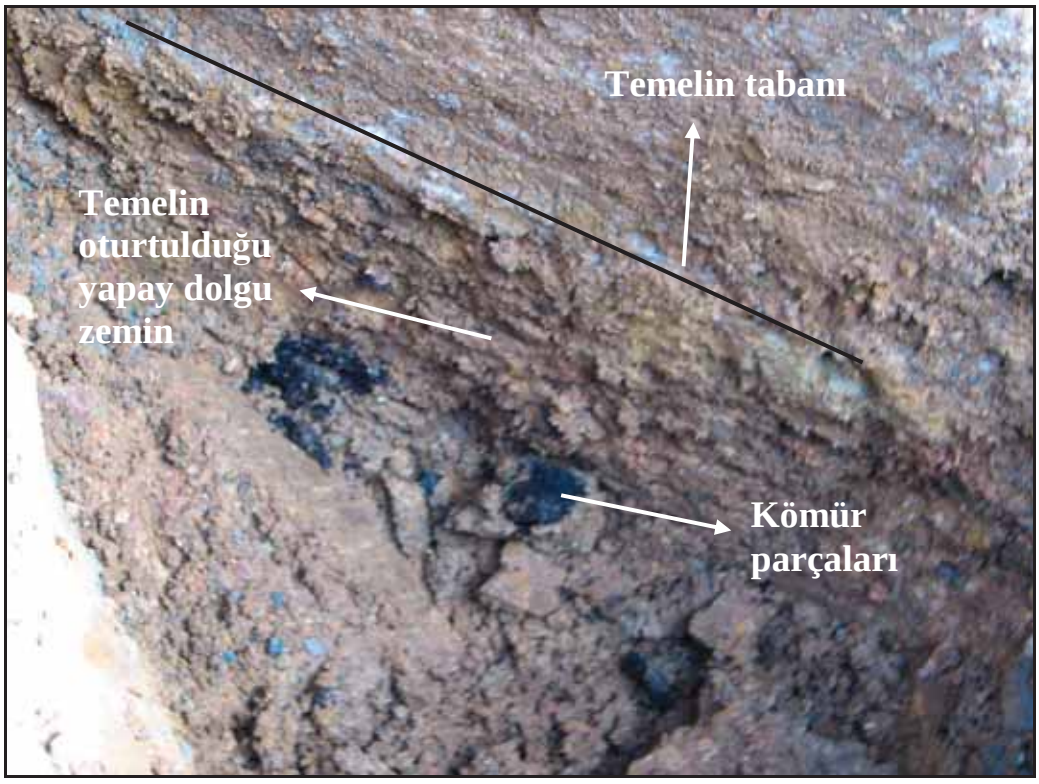
Yamaçta yer alan villa, betonarme karkas *(concrete frame)* bir yapı olarak kolon-kiriş *(column-beam)*, döşeme *(slab)* ve bağ kirişleri *(bond beam)* ile bağlanmış tekil temellerden oluşan bir temel sisteminden *(foundation system)* ibaret olduğu belirlenmiştir. Bina *(building)* yan duvarlarında görülen çatlaklar üzerine (9.6.5.A), farklı oturmaların nedenini belirlemek üzere, temellerinin oturduğu zemini görmek ve yerinde incelemeler yapmak amacı ile evin düşük kotlarında yer alan bahçe tarafında bu eve ait tekil temellerden bir tanesinin bitişiğinden, temel sistemine zarar vermeyecek şekilde bir çukur açtırılmıştır (9.6.5.B, C).



9.6.5.A) Farklı oturma nedeniyle binanın her iki yan duvarında yamaç aşağı yöne doğru meydana gelen çatlaklar (28.01.2011).



9.6.5.B) Kontrolsuz yapay dolgu üzerinde yer alan tekil sömel (temel) (03.02.2011).



9.6.5.C) Kömür kırıntılarını içeren, kontrolsuz yapay dolgu üzerine oturtulmuş ve 9.6.5.B'de yer alan tekil temel tabanının yakından görünüşü (03.02.2011).

Villada açılan 80 cm derinliğindeki temel çukurunda, temel derinliği 50 cm olarak ölçülmüştür. Sömel'in (**Sömel,** *footing*: Temel papucu) oturduğu zeminden laboratuarda deney yapmak üzere çeşitli örnekler alınmış ve zeminin mukavemeti hakkında bilgi edinebilmek amacı ile cep penetrometresi ile temelin oturduğu zeminin değişik nokta ve derinliklerinden yaklaşık 10 adet serbest basınç mukavemeti *(unconfined compressive strength)* ölçülmüştür. Temel çukurunda yapılan incelemeler sonucunda, söz konusu villa temelinin az çakıllı, kömür ve bitki kırıntılı, organik içerikli kahverengi kilden oluşan bir tabana (kontrolsuz yapay dolguya) oturtulmuş olduğu görülmüştür (Örnek Şekil 9.6.5.B ve 9.6.5.C).

Yapılan çalışmalarda temel tabanının; kömür parçaları içeren bir zemine oturduğu ve laboratuar deney sonuçları, bu dolgu zeminin yüksek plâstisiteli orta katı kıvamda bir kil olduğunu göstermiştir. Villanın alt kotlarda bahçe tarafında yer alan bu temellerin sağlam zemin (ana kaya) yerine, yapay dolgu zemine oturtulması ve zeminin beklenilebileceği gibi yüzey sularının da iyi drene edilmemiş olması yanında, zamana bağlı oturmalar nedeni ile villa yan duvarlarında çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda, yapay dolgu zemininde meydana gelmiş olan oturmaların devam edip etmediğinin tespit edilebilmesi için çatlakların ilerleme yönünü belirleyen bir çatlak ölçer ya da çatlakların genişliğini ölçen bir deplâsman ölçerin yerleştirilerek düzenli okumalar alınması önerilmiştir.

Sonuç olarak villa ve mahallînde 28.01.2011 ve 03.02.2011 tarihlerinde yapılan incelemeler ve temel zemininden alınan örnekler üzerinde yapılan gerek yerinde, gerekse laboratuardaki ölçümler neticesinde:

1. Söz konusu villanın, daha düşük kotlarında alt kesimde bahçe tarafında yer alan temellerinin sağlam zemine (ana zemin/kayaç) oturtulmadığı, temellerin az çakıllı, kömür ve bitki kırıntılı, organik içerikli kahverengi orta katı kilden oluşan yapay dolgu bir zemine oturtulmuş olduğu görülmüştür.

2. Villada meydana gelen çatlakların, temel sisteminin alt bahçe kısmında kalan kesiminin oturtulduğu zeminde, zamana bağlı olarak oluşan oturmalardan (konsolidasyon) kaynaklanmış olduğu sonucuna varılmıştır. Bu oturmaların devam edip etmediğini tespit edebilmek için duvarlardaki çatlakların bulunduğu yerlere bir çatlak ölçer veya deplâsman ölçer yerleştirilerek düzenli okumalar alınarak izlenmesi önerilmiştir.

3. Villa ve civarında yapılan incelemelerde, arazi eğimi sebebi ile villanın çevresine ve temellerine gelebilecek yağmur sularının uzaklaştırılmasını sağlayacak yeterli ve kapsamlı bir drenaj sisteminin olmadığı ve genel bir drenaj probleminin de var olduğu gözlemlenmiştir.

9.6.6. Heyelânda Ana Kayma Düzleminin Belirlenmesi:

İstanbul, Kemerburgaz-Tayakadın Mevkii, eski kömür havzalarının bulunduğu bölgede, kuzeye % 10-15 arası eğimli bir yamaçtan geçen ve 2008 yılında yapılan doğu batı doğrultuda uzanan çift (duble) asfalt yol *(dual carriageway, divided road)* üzerinde, 2009 yılında bir heyelân meydana gelmiştir. Bu kesimde yapılan zemin etüt sondajları verileri, arazi zemin yapısının yüzeyden itibaren birkaç metre kalınlıkta kontrolsuz yapay dolgu altında, bölgenin ana zeminini oluşturan, yer yer kum ara bantları içeren aşırı konsolide sert siltli killerden (Üst Oligosen-Üst Miyosen dönemi çökelleri) oluştuğunu göstermektedir. Heyelân oluşan kesimde yol boyunca Şubat 2010 yılında derinlikleri 24 m ile 30 m arası değişen, 11 adet zemin etüdü sondajları açılmış ve bu sondajlardan **inklinometre** (=eğimölçer, *inclinometer*) ölçümleri alınmıştır. İnklinometre ölçümleri ile zeminde oluşan kayma yüzeylerinin derinliği, zemin hareketlerinin miktar ve yönlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İnklinometre ölçümlerinden, ana kayma düzleminin yaklaşık 13 m derinlikte olduğu sonucuna ulaşılarak, doğu-batı doğrultuda uzanan asfalt yol güzergâhının alt kotlarını oluşturan kuzey kenarı boyunca ve yola paralel bir kazıklı heyelân önleme yapısı tasarlanmıştır.

Sondajlarda, zeminde oluşan kayma yüzeylerinin derinliği ile zemin hareketlerinin miktar ve yönlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İnklinometre ölçümlerinde kayma düzlemi yer yer 20 m'ye ulaştığı, ancak heyelânın en aktif olan ana kayma düzleminin maksimum 13 m derinlikte olduğu öngörülerek, oluşan heyelânı önlemek için gerekli ilâve jeolojik ve geoteknik etüt ve değerlendirmeler sonucunda, heyelânın oluştuğu bölgede, kaymanın durdurulması için önerilen alternatiflerden, kazıklı tutucu yapı alternatifinin uygulanmasına karar verilmiştir. Diğer bir ifâde ile Şubat 2010 tarihinde, ortalama 25 m derinliğinde yapılan sondajlardan elde edilen bulgular ve inklinometre okumaları, yamaçta oluşan kayma yüzeylerinin en fazla yamaç yüzeyinden 13 m derinlikte olduğuna işaret ettiği şeklinde yorumlanmıştır.

Yolun kuzey kenarı boyunca tasarlanan kazıklı yamaç stabilizasyon yapısının, minimum 15,5 m ve heyelânın en derin yerinde ise maksimum 28 m boyda olmak üzere, 527 adet 120 cm çapında, akstan aksa 3,6 m aralıklı çift sıra fore kazıklardan *(bored piles)* ve bunları birbirine bağlayan 5,2 m genişlikte bir başlık kirişinden oluşan, 570 m uzunluğunda heyelân önleme yapısı inşa edilmesine karar verilmiştir. Kazıkların amacı, bölgedeki kaymayı durdurmaya yönelik olduğundan, kazıkların önlerinde zemin yüzünden maksimum 13 m derinliğe kadar bir kayma olsa dahi arkasındaki zeminin etkisini karşılayabilecek şekilde tasarlandığı varsayılmıştır. Parametreleri hesaplanan bölge için geoteknik analizler, plaxis V.8 bilgisayar programıyla yapılmış, stabilite için rezidüel (artık kalıcı) parametrelerle statik durumda 1,3 ; dinamik durumda ise 1,1 güvenlik sayısı aranmış; yapılan analizler, bölgenin kazıklı tutucu yapı alternatifi ile güvenli hâle geleceği düşünülmüştür. Ayrıca ana kayma düzlemi derinliği maksimum 13 m öngörüldüğünden; önlem olarak heyelân alanı boyunca kazıklı tutucu yapının sırasıyla 28 m, 22 m ve 15,5

m'lik kazıklar ile üç tip olarak tasarlanarak projelendirilmiştir. Stabilite analizleri sonucunda projelendirilen kazıklı tutucu sistemin statik ve dinamik koşulların etkisi altında heyelân alanının güvenliğinin sağlanacağı, ayrıca kazıklı yapının arkasındaki ana yolu ve devam eden şevi güvenli hâle getireceğini statik ve dinamik durum analiz sonuçlarına göre de güvenli olacağı, kazıklı tutucu yapının bu etkiler altında bir stabilite sorunu yaratmayacağının belirlendiği varsayılmıştır. Böylelikle hesaplamalara göre, heyelân alanına yapılan kazıklı tutucu yapı, ana yol platformunun stabilizasyonunu sağlayacak ve platform arkasındaki kaymayı engelleyerek proje sahasının güvenli hâle getirilebileceği öngörülmüştür.

Kasım 2010 tarihinde asfalt yolun kuzey bitişiğinde ve doğu-batı doğrultuda uzanan yola paralel, 570 m uzunluğunda, kazıklı yamaç stabilizasyon yapısı (kazık istinat yapısı, *pile foundation*) inşa edilmiş, ancak buna rağmen heyelânın devam ettiği ve istinat yapısının yer yer kırılıp parçalandığı görülmüştür.

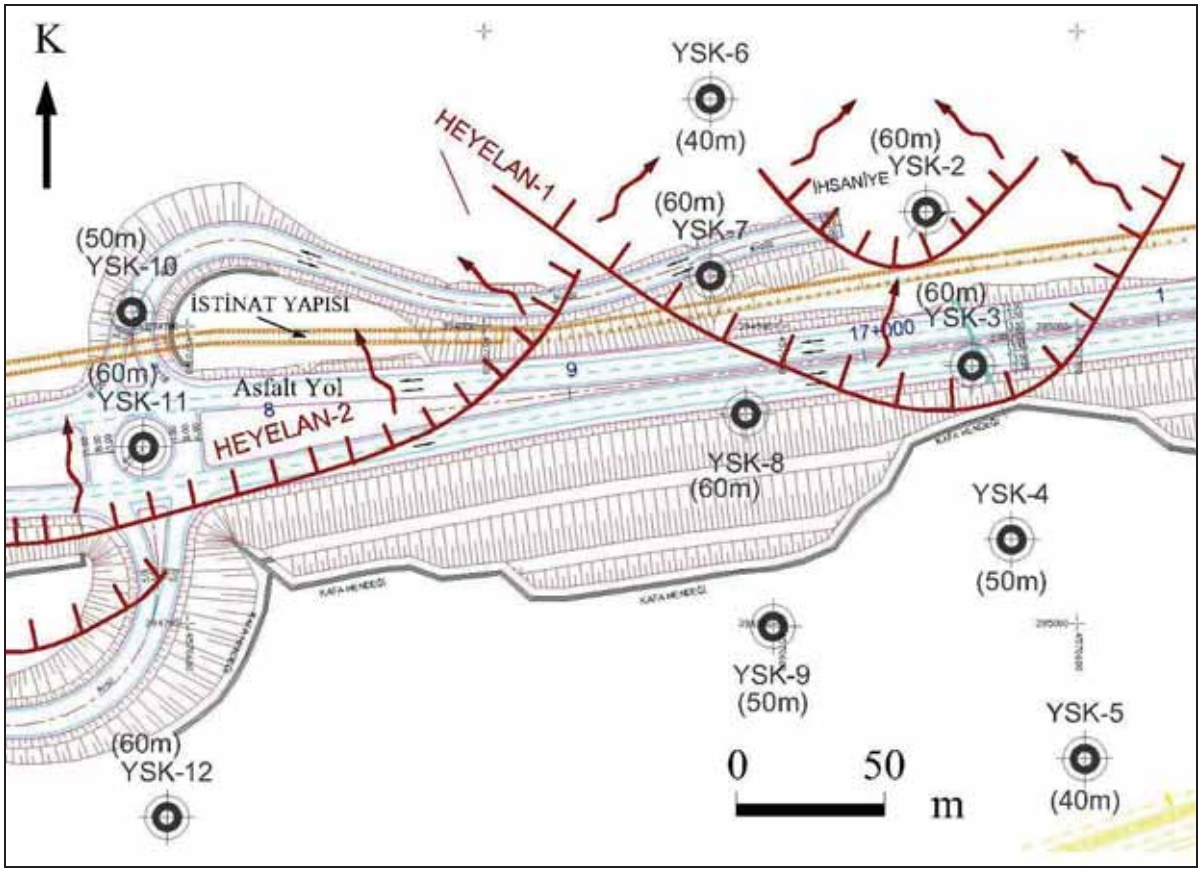
Bölgede imâlatın tamamlandığı ve ilk optik okumaların alındığı 30.10.2010 tarihinden itibaren kazıklarda meydana gelen bu hareketlerden kaynaklı, bazı anolarda oturmalar ve birkaç anoda da kesme çatlakları ve 0,5 m'ye varan ve gittikçe ilerleyen kırılmalar oluşmaya başlamıştır.

Aralık 2010 tarihinden itibaren, kazıklı tutucu yapı olarak adlandırılan istinat yapısının parçalanmaya devam ettiğinin görülmesi üzerine, yörede Ocak-Şubat 2011 tarihleri arasında, yeniden ve derinlikleri 40 m ilâ 50 m arasında değişen ilâve 24 adet sondaj kuyusu *(borehole)* açılmıştır. Bu kuyuların bazılarında inklinometre ölçümleri yapılmış, Mart 2011 tarihinde yeraltı su seviyesi ve basıncının belirlenmesine yönelik çalışmalar ise 10 adet piyezometre kuyusunda ilgili firmalarca 2011 tarihinde gerçekleştirilmiştir.

Bu değerlendirmelere göre, yörede jeolojik istifin, katı-çok katı kil birimler ile orta sıkı-sıkı-çok sıkı kum birimleri ardalanmalarından oluştuğu, alt seviyelere doğru gidildikçe çok katı-sert, aşırı konsolide *(overconsolidated)* kil birimlere geçildiği ve bu kil tabakalar içinde yer alan kum bantlarından süzülen suların, kil birimleri içerisinde içsel sürtünme mukavemetini azaltarak, kayma düzlemlerini oluşturduğu, yeraltı su seviyelerinde ise artezyene rastlanmadığı, aktif heyelânın ise yüzey kotundan itibaren 40 m derinliğe kadar devam ettiği görülmüştür.

Heyelân önleme yapısı olarak daha önce projelendirilen kazıklı tutma yapısının yeterli olmadığının ortaya çıkması sonrasında YTÜ İnş. Fak. Geoteknik Anabilim Dalı'na müracaat edilip ek araştırmalar yapılması talep edilmesi üzerine, YTÜ Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyeleri tarafından inceleme alanında gerekli çalışmalar yapılmıştır (Özaydın, Yıldırım, Berilgen 2012).

YTÜ, Geoteknik Anabilim Dalı'nca yapılan ek arazi jeolojik ve geoteknik çalışmalar kapsamında, derinlikleri 40 m – 60 m arasında değişen ve heyelân araştırmasına yönelik 15 adet yeni ilâve zemin sondajı ve inklinometre tesisi ile ölçümlerinin yapılması plânlanmış, uygulamaya konmuş ve zemin kesitleri YSK-5 sondajı ile YSK-2 sondajı arası alınmıştır (9.6.6.1.A ve 9.6.6.1.B).



9.6.6.1.A) İstanbul-Kemerburgaz'da oluşan heyelân ve sondaj yerlerini-derinliklerini gösterir harita (Yıldırım, 2012).

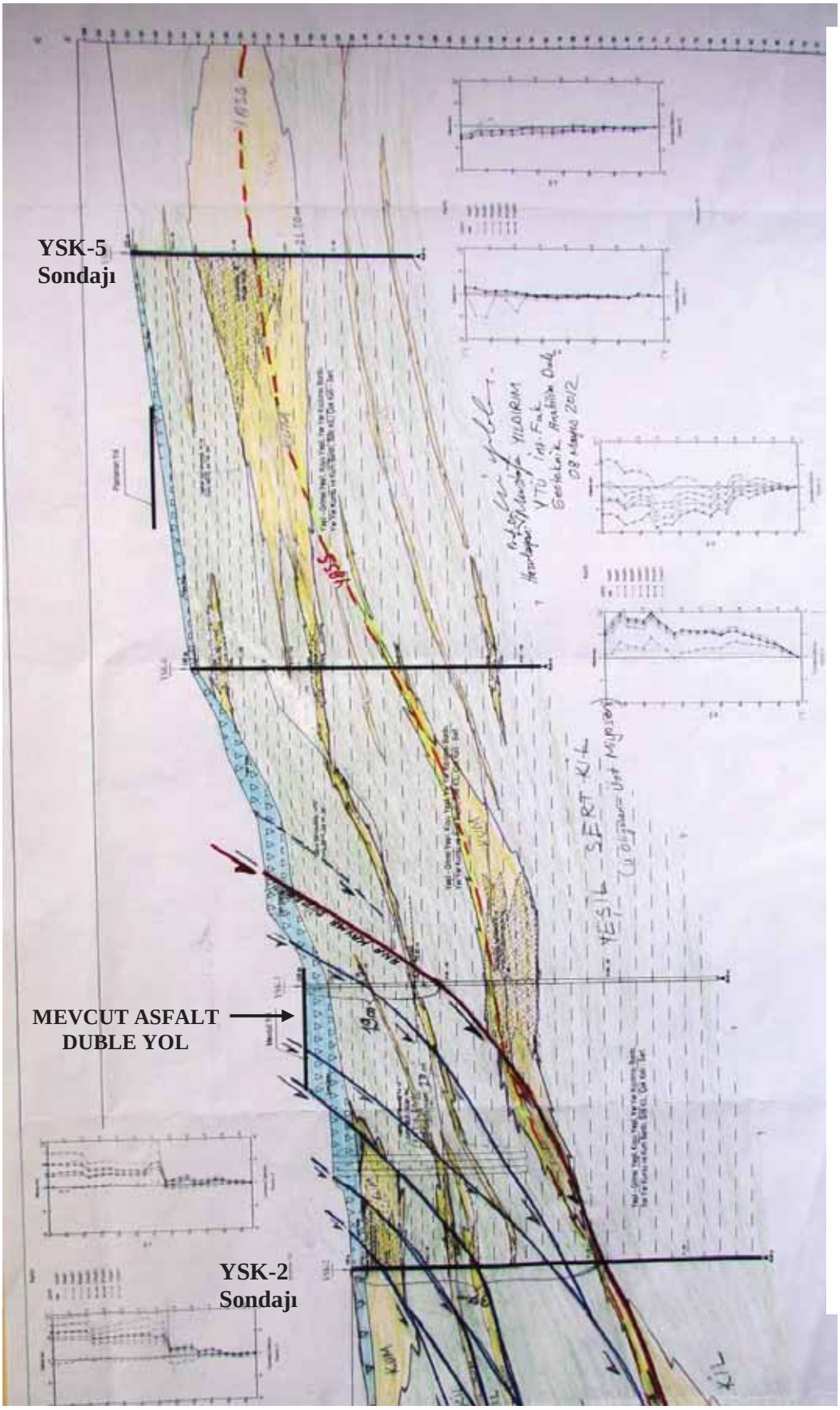
Bu yeni sondajları takiben 20 Ocak 2012 tarihine kadar alınan inklinometre ölçümleri sonucunda (Tablo 9.6.6.1), asıl ana kayma düzleminin kazık boylarının daha da altında, zemin yüzeyinden 35 m - 40 m arası derinliklere *(drilling depth)* ulaştığı saptanmıştır.

Tablo:9.6.6.1) Şekil 9.6.6.1'deki haritada yerleri gösterilen sondajlardan 20.01.2012 tarihinde alınan inklinometre ölçümleri (bilgi[2000], 2012).

Kuyu no	Sondaj başlangıç tarihi	İnklinometre ilk ölçüm tarihleri	Sondaj derinliği (m)	İnklinometre derinliği (m)	İnklinometre üst kotu (m)	Yer değiştirme miktarı ve yönü	
						A* Yönü (mm)	B** Yönü (mm)
YSK-2	27.10.2011	03.11.2011	60,00	60,00	128	33	26
YSK-4	23.11.2011	30.11.2011	50,00	50,00	146	18	7
YSK-5	02.12.2011	07.12.2011	40,00	40,00	150	8	-15
YSK-7	10.11.2011	21.11.2011	60,00	60,00	131	125	-24
YSK-9	27.11.2011	03.12.2011	50,00	50,00	150	15	15
YSK-10	10.11.2011	17.11.2011	50,00	50,00	122	125	-115

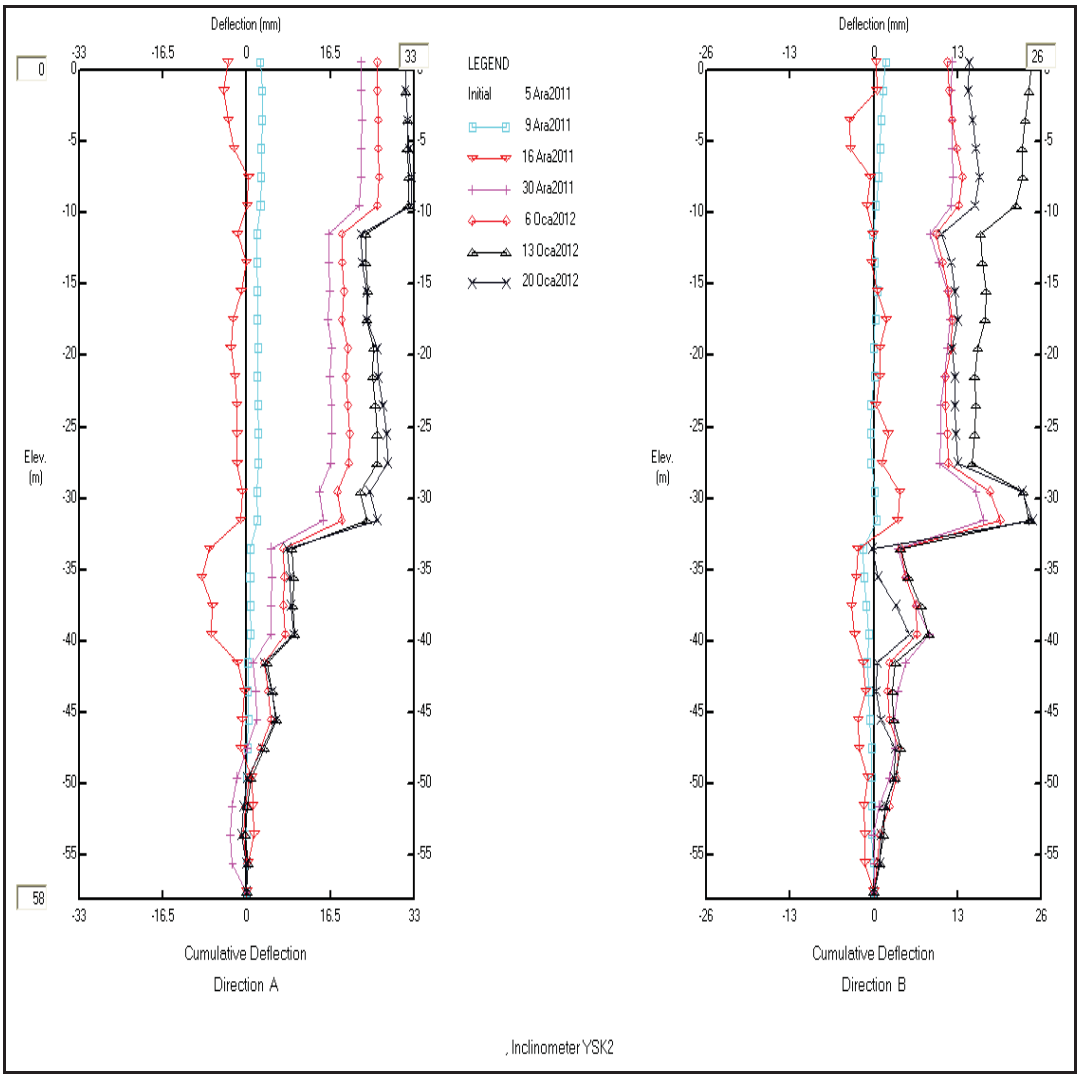
***** A+ yönü: Hareketin olduğu yön olarak seçilmektedir. Burada A+ hareketin topoğrafik eğimin azaldığı kuzey yönü göstermektedir. A- güney yöndür.

****** B yönü: Hareketin olduğu yamaç aşağı doğru bakıldığında sağ taraf "+" (doğu yön), sol taraf ise "-" (batı yön) olarak belirlenir. A ve B yönleri arasında oluşan ilerleme değerlerinin bileşkesi heyelân hareketinin yönünü ve miktarını vermektedir.



9.6.6.1.B) İstanbul, Kemerburgaz-Tayakadın YSK-5 ile YSK-2 sondajları arası heyelân kesiti (Yıldırım, 2012).

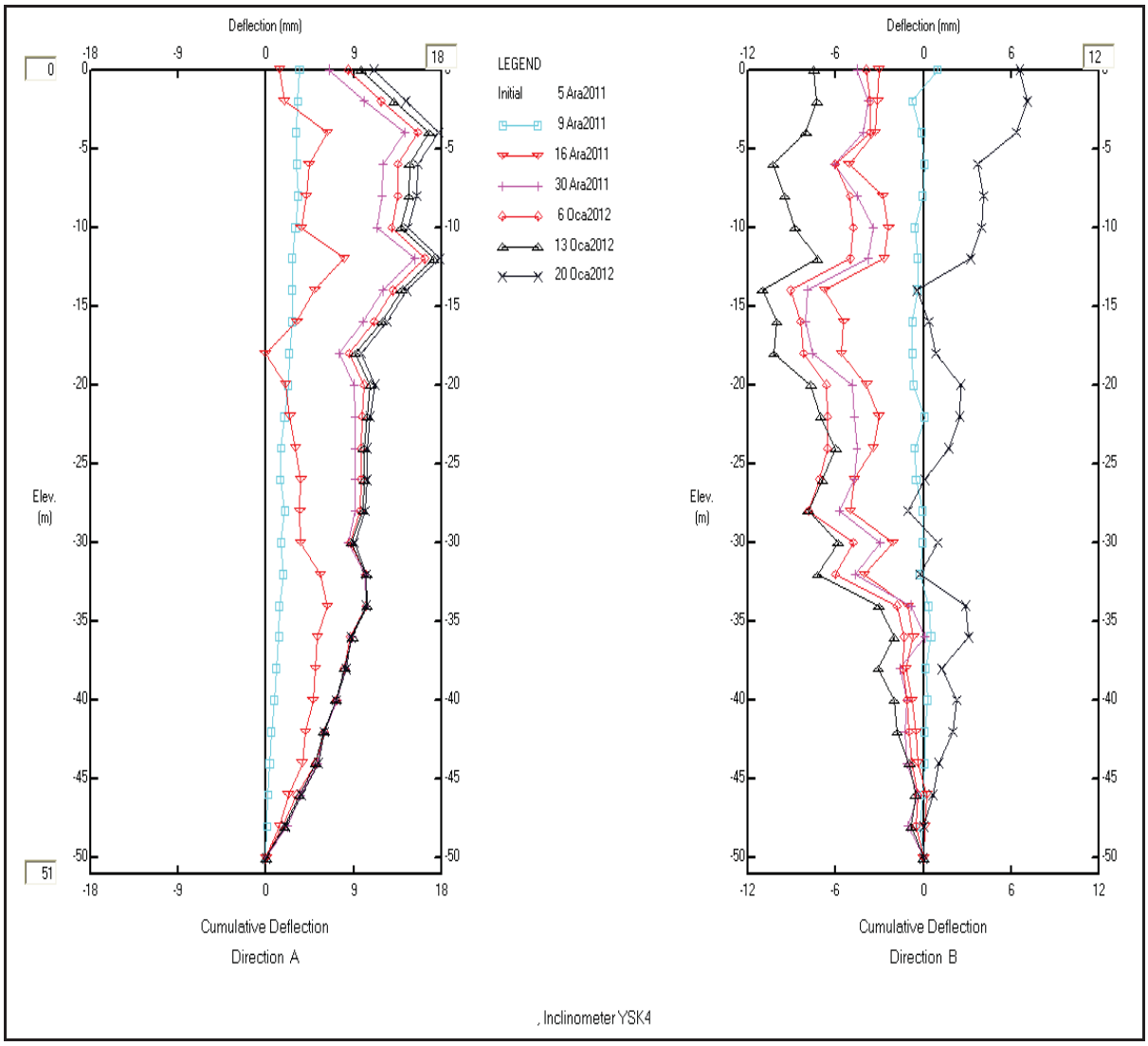
İnklinometre değerlendirmeleri: İstanbul Kemerburgaz-Tayakadın yolunda yapılan YSK-2, 4, 5, 7 ve 10 No'lu sondajlardan alınan inklinometre ölçümleri, Şekil 9.6.6.2 ile 6 arası verilmektedir. Çift (duble) asfalt yolun da içinde yer aldığı heyelân güzergâhında yapılan sondajları takiben, bu sondajlar içinde yapılan inklinometre ölçümleri, referans teşkil etmesi açısından önce sıfır okumaları, daha sonra da başlangıç okumaları alınmaya başlanmıştır. Belirli zaman aralıklarında 20 Ocak 2012 tarihine kadar yapılan okumalara göre; YSK-2 sondajında, zemin hareketleri özellikle zemin yüzünden itibaren 35 m derinlikte olup ana kayma yönünü oluşturan kuzey yönde 33 mm, doğu yönünde 26 mm'dir. 7 Şubat 2012 tarihinde inklinometre borusu 35 m derinlikte ana heyelân düzlemi tarafından kesilmiş ve devre dışı kalmıştır (9.6.6.2) .



9.6.6.2. Kemerburgaz, YSK-2 sondajı inklinometre ölçümleri.

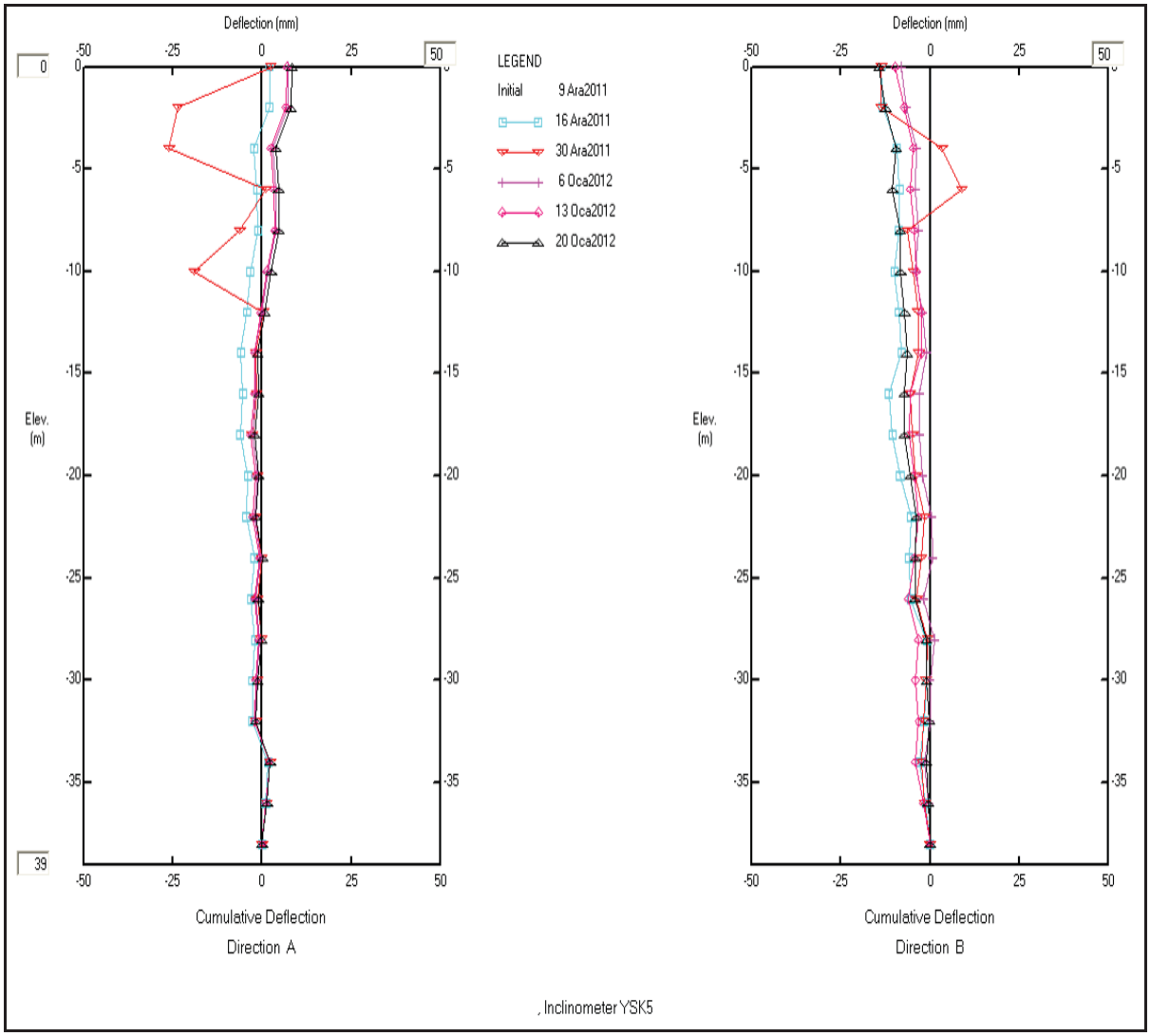
YSK-4 sondajında hareket, zemin hareketlerinin yüzeye yakın kesimlerde daha fazla olduğu görülmekte, çok önemli mertebelerde olmamakla birlikte derine doğru azalmaktadır.

Son okumaya göre ise kuzey yönünde (A+ yönü) 18 mm, doğu yönünde (B+) 7 mm'dir (9.6.6.3).



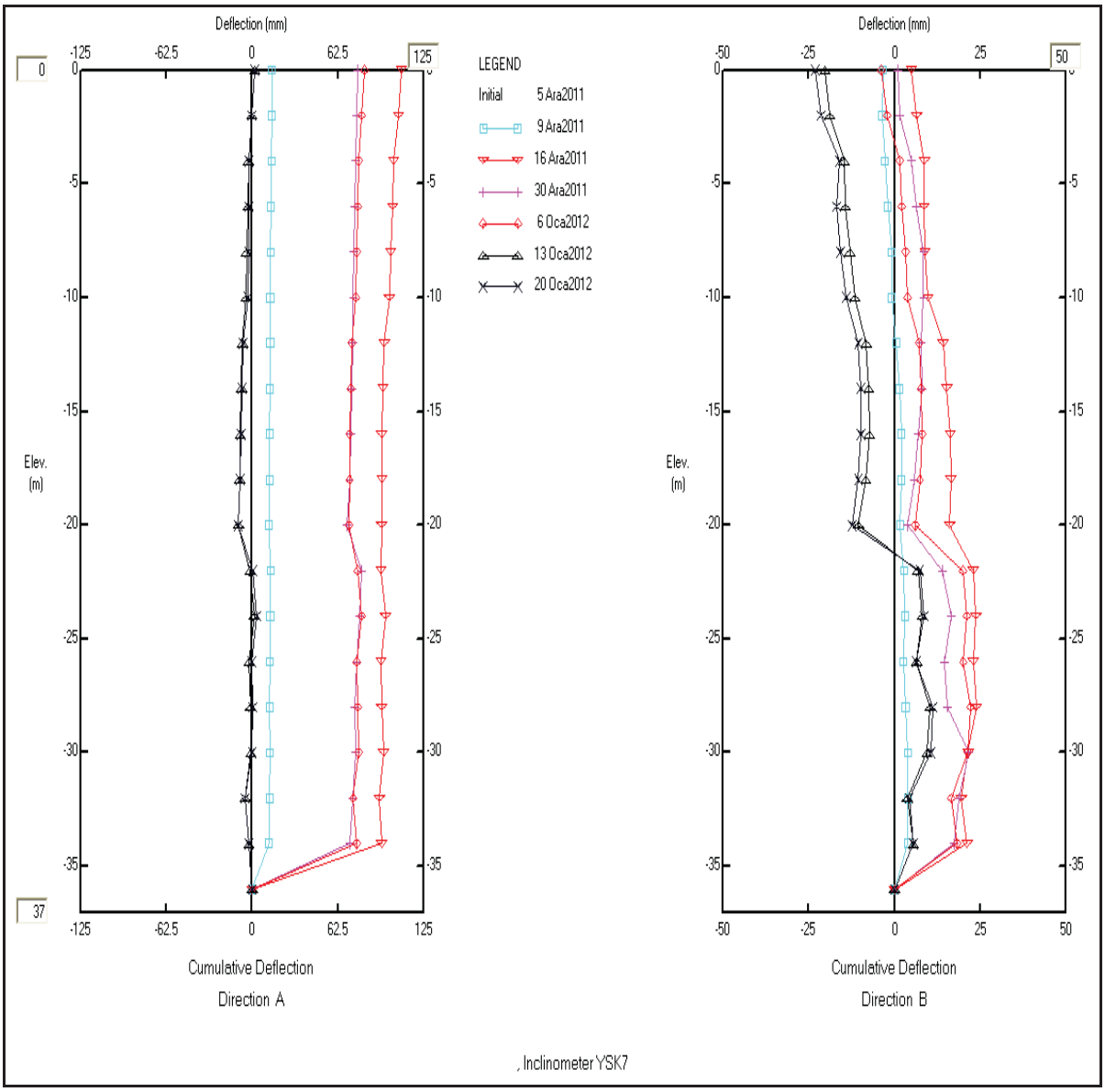
9.6.6.3. Kemerburgaz, YSK-4 sondajı inklinometre ölçümleri.

YSK-5 sondajında, zemin yer değiştirmelerinin yüzeye yakın kesimlerde oluştuğu gözlenmekte ve son okumaya göre kuzey yönünde 8 mm, batı yönünde 15 mm mertebesindedir. Ancak bu okumalara göre kesin bir kayma yüzeyinin oluştuğu yorumu yapılamaz (9.6.6.4).



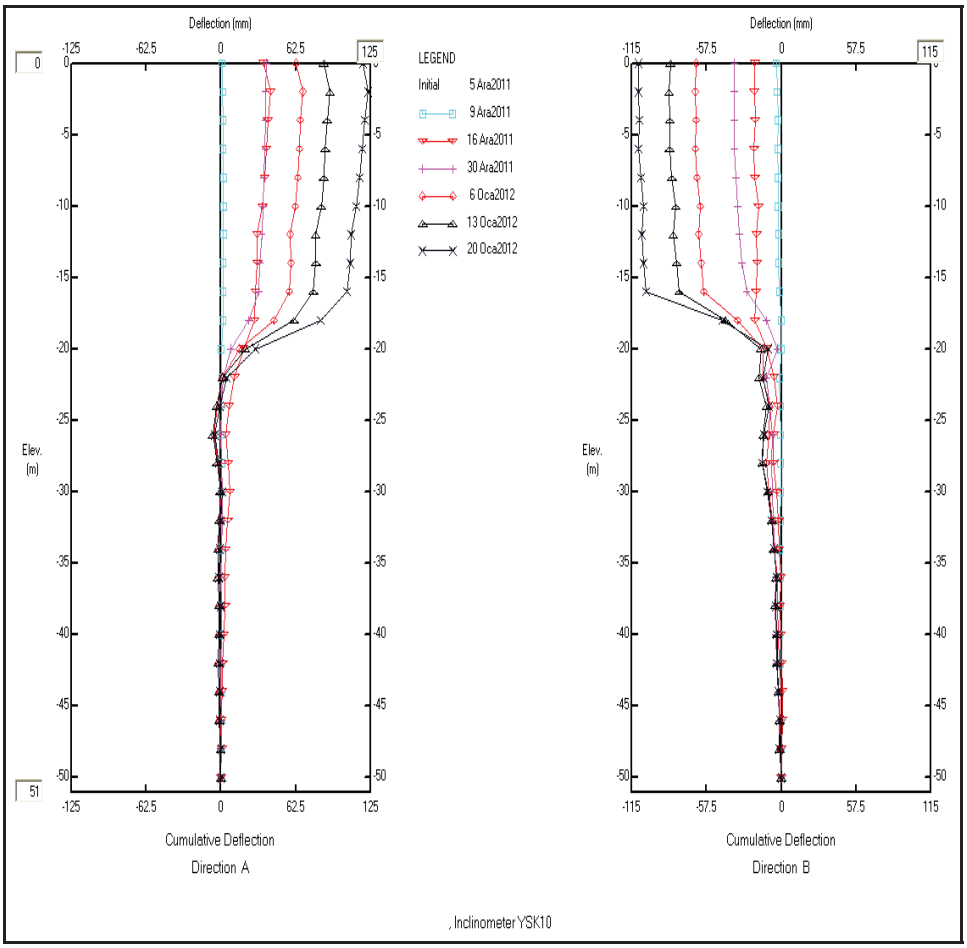
9.6.6.4. Kemerburgaz, YSK-5 sondajı inklinometre ölçümleri.

YSK-7 sondajında, ölçülen zemin yer değiştirmelerinin özellikle yüzeyden 36 m–37 m ve daha derinlerde yoğunlaştığı gözlenmektedir. 16 Aralık 2011 tarihindeki okumada, zemin yer değiştirmesi kuzey yönünde 125 mm, batı yönünde 24 mm civarında iken, bir sonraki okumada inklinometre borusu 36 m'den kesilmiş ve bundan sonraki okumalar 36 m ve üstündeki seviyelerden alınmış, fakat hareket muhtemelen daha altta olduğu için üst kısım geriye yatmış ve bu nedenle hareket ters yöne gibi gözükmektedir (9.6.6.5).



9.6.6.5. Kemerburgaz, YSK-7 sondajı inklinometre ölçümleri.

YSK-10 sondajında, kayma düzlemi derinliği 21 m olup 20 Ocak 2012 tarihli inklinometre okumasına göre kuzey (A+) yönünde 125 mm, batı (B-) yönünde 115 mm zemin yer değiştirmesi meydana gelmiştir. 07 Şubat 2012 tarihi itibarıyla inklinometre borusu zemin yüzeyinden 21 m derinlikte tümüyle kesilmiştir. Bu sondaj yerinde de yakın sondaj verileri ile korele edildiğinde, muhtemelen ana kayma düzleminin 35 m ya da 36 m civarı derinliklerde olduğu söylenebilir (9.6.6.6).



9.6.6.6. Kemerburgaz, YSK-10 sondajı inklinometre ölçümleri.

Tipik bir inklinometre ölçüm sistemi ile ölçüm alınmak üzere sondaj kuyusuna indirilmekte olan inklinometre ölçüm sistemine ait fotoğraflar, aşağıda şekil 9.6.6.7 ve 9.6.6.8'de verilmektedir:



9.6.6.7. Bir inklinometre (eğimölçer) ölçüm sistemi.



9.6.6.8. Bir sondaj kuyusunda, inklinometre aleti ile sondaj tabanından itibaren yüzeye doğru 1'er metre aralıklar ile ölçüm alınması.

Kemerburgaz Heyelânı'nda, heyelânın gelişimi ve oluşturduğu hasara ait değişik tarihlerde çekilmiş fotoğraflar, aşağıda Şekil 9.6.6.9 da (A-H arası) yer almaktadır.



9.6.6.9.A) Kemerburgaz duble asfalt yolunun güney yamacını oluşturan şevde görülen heyelânın taç kısmı. Heyelân, duble asfalt yolun tamamını etkileyerek yamaç aşağı kuzey yöne doğru gelişmiştir (13.09.2011).



9.6.6.9.B) Heyelân nedeniyle hasar görmüş 570 m uzunluğundaki kazıklı istinat yapısı. Burada, heyelânı önleme yapısında, fore kazık derinliğinin yetersiz kaldığı kazık sistemine ait kazık başlıklarının kırılan kesimleri görülmektedir (14.10.2011).



9.6.6.9.C) Kazık başlıklarının kırılan kesimleri ve göçme (13.09.2011).



9.6.6.9.D) 5,20 m x 1,20 m boyutlarındaki kazık başlığının heyelân nedeniyle kırılması ve donatıların kopması (13.09.2011).



9.6.6.9.E) Heyelân nedeniyle kazık başlığının kırılması, donatıların kopması.
Heyelân önleme yapısı 1,20 m çaplı ve en derin yerinde 28 m'ye ulaşan toplam 527 adet çift sıra kazıktan oluşmaktadır. Kazık başlığı 5,20 m genişliğinde olup heyelân önleme yapısının toplam uzunluğu 570 m'dir (13.09.2011).



9.6.6.9.F) Kemerburgaz Heyelânının gelişimi (13.09.2011).



9.6.6.9.G) F'de görülen aktif heyelânın hızlı gelişmesi ile topoğrafyada görülen değişim (21.09.2011).



9.6.6.9.H) F'de gözlenen aktif heyelânın hızla ilerlemesi. Heyelânda hareketin başlangıç tarihinden 40 gün geçtikten sonra (21.10.2011) taç bölgesinde ana kayma düzleminin hareket miktarının daha da artarak belirginleşmesi ve düşey atımın (~1 m) giderek büyümesi.

Zemin ortamında (kum ara katmanlı aşırı konsolide kil) gelişen aktif heyelânın önlenmesi için, bu heyelân ve yöresine en uygun çözümün, yola dik yönde oluşturulacak kaya dolgulu hendekler ve kılçık drenler ile yüzey ve yeraltı sularının drene edilmesi ve bu drenaj kanallarının daha aşağı vâdide yer alan ve ana zemini oluşturan kesimlerde kuru dere yataklarına kadar uzatılmasının, yöredeki heyelânı önlemede çok yararlı olacağı tavsiye edilmiştir (Özaydın, Yıldırım, Berilgen, 2012).

9.6.6. 1) Heyelân Modeli – Mekanizması -

YTÜ Geoteknik Anabilim Dalı tarafından derin sondaj verileri ve inklinometre ölçümleri birlikte değerlendirilerek, heyelân bölgesi *(slide area)* arazi zemin yapısını gösteren ayrıntılı kesitler çıkarılmış ve kayma yüzeyleri işaretlenerek muhtemel heyelân mekanizması ortaya konmuştur.

Heyelândan etkilenen asfalt duble yolun güney yamacı tepe düzlüğü ve daha gerisinde 6 km^2 - 7 km^2 gibi çok geniş bir alanı kaplayan eski kömür işletmelerinden arta

kalan ve hafriyat atıkları ile kontrollü olarak doldurulmakta olan kazı çukurları yer almaktadır (muhtemelen İstanbul 3. Hava Limanı arazisi, Tayakadın Mvk.). Tabanlarında ana zemini oluşturan geçirimsiz killi zeminlerin yer aldığı bu çukurlar, uzun yıllar yağmur suları ile dolmuş ve irili ufaklı yapay göl alanlarına dönüşmüşlerdir. Bu kesimlerde, göl içi kenar şevlerinde, killi tabakalar içinde yer alan kum bantları içine su sızıntılarının olma ihtimalî yüksektir. Son yıllarda bu çukurların hafriyat atıkları ile doldurulması sonucunda depolanmış su kütlesi basınç altında kalmış ve daha düşük kotlara inen kuzeye eğimli yamaçlara doğru uzanan kum bantlarında, su akımını oluşumunu teşvik edici ek bir unsur ortaya çıkmıştır. Arazide açılan çok sayıda sondaj verisi birlikte değerlendirildiğinde, hafriyat dolum sahası dışında düşük kotlarda yer alan kuzeye eğimli yamaçta, yamaç içinden aşağıya, asfalt yola doğru bazı kum bantlarının süreklilik arz edebileceği ve bunlar içinde tepe düzlüğünde yer alan yapay göllerdeki su kotu ile ilişkili olarak basınç artışları ve su akımı gerçekleşme ihtimalînin hayli yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yamaç eğiminin genellikle % 10 civarında olduğu arazide, heyelânların oluşmasının bu şekilde açıklanabileceği düşünülmektedir.

9.6.6.2) Stabilite Analizleri

Arazi zemin yapısı ve heyelân modeli ortaya konulduktan sonra öncelikle arazi koşullarında geçerli zemin dayanım parametrelerini geri analizlerle belirleyebilmek amacı ile stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Limit denge analizleri ile inklinometre ölçümlerinden yararlanılarak belirlenen ana derin kayma yüzeyi boyunca kaymaya karşı güvenlik sayısı GS = 1 değerini verecek parametreler araştırılmıştır. Benzer formasyonlar için geçerli olan rezidüel kayma mukavemeti parametreleri olarak $\varphi_r' = 8°\text{-}12°$ aralığı ve $c_r' = 0$ değerleri kullanılarak, GS = 1 sonucunu verecek ortalama boşluk suyu basıncı katsayısı (r_u) değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Sayısal analizler sonucunda, heyelân bölgesi için geçerlilik olasılığı en yüksek rezidüel kayma mukavemeti parametreleri ve boşluk suyu basıncı katsayısı olarak

$$\varphi_r' = 10° \qquad c_r' = 0 \qquad \text{ve} \qquad r_u = 0{,}26$$

değerleri elde edilmiştir. Aynı rezidüel kayma mukavemeti parametreleri ile

$$r_u = 0{,}10 \text{ için} \quad GS = 1{,}23 \quad \text{ve} \quad r_u = 0{,}05 \text{ için} \quad GS = 1{,}30$$

değerleri elde edilmektedir.

Sayısal analiz sonuçları, arazide yeterli drenaj önlemleri alınması ile şev içinde boşluk suyu basınçları oluşmasının engellenebilmesi durumunda kaymaya karşı güvenliğin yeterli düzeye yükseltilebileceğini göstermektedir. Bunun sağlanabilmesi için yolun güney yamacı tepe düzlüğünü oluşturan üst kotlarda yer alan eski yapay göllerden yamaca doğru su sızıntısının engellenmesi ve yüzeysel sulara karşı etkin bir drenaj şebekesi oluşturulması gerektiği belirlenmiştir.

9.6.6.3) Alternatif Yol Güzergâhının Belirlenmesi

Mevcut yol güzergâhı aktif heyelân bölgesi içinde kalmaktadır. Heyelânın ana kayma derinliğinin zemin yüzünden itibaren 40 m'yi bulması nedeni ile stabilitenin kazıklı tutma yapıları ile sağlanması pratik olarak mümkün görülmemiştir. Dolayısı ile etkin drenaj önlemleri alınması durumunda kaymaya karşı güvenliğin yeterli düzeye çıkarılması mümkün görülmekle birlikte, mevcut arazi koşullarında bu önlemlerin uzun süre etkinliğini korumasına ilişkin endişeler bulunmuştur. Bu nedenle aktif heyelân bölgesi dışında, mevcut güzergâhın güney yamacında daha yüksek kotlarda yer alan tepe sırt düzlüğünden geçecek yeni bir güzergâh araştırması (*ripaj) yapılmıştır.

***[Ripaj**: Yol güvenliğini sağlamak, yapı ve toprak işlerini azaltmak amacı ile yol ekseninin enine kesit içinde kaydırılarak yol güzergâhının değiştirilmesi**].**

Arazi incelemeleri ve sondaj verileri ışığında belirlenen bu güzergâhın yamaç tepe düzlüğünde yer alan eski yapay göl su üst kotunun üzerinde olması stabilite açısından yararlı olacağı kanaatine varılmıştır. Ancak uzun süreli stabilite açısından yüzeysel suların zemin içine sızmadan etkin drenaj önlemleri ile kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması gerekliliği belirlenmiştir (Özaydın, Yıldırım, Berilgen, 2012).

Bu heyelân örneğinde önemle vurgulanması gereken husus, mühendisliğin en önemli problemlerinden birini oluşturan heyelânlı arazide yapılmak istenen istinat yapılarının projelendirilmesi ve heyelânın önlenebilmesi için geoteknik etütlerde, mutlak surette, yörenin jeolojisi yanında detaylı mühendislik jeolojisi haritalarından olan, heyelân haritasının doğru çizilmesi, heyelân geometrisinin doğru ortaya konabilmesidir. Bunun için ise ihtimâller göz ardı edilmeyip gerçeğe daha yakın jeolojik modelin ortaya konarak sondajların gerektiği kadar derinlikte yapılması ve alınan inklinometre okuma ve ölçümleriyle birlikte değerlendirilerek o yöreye gereken en uygun tedbirlerin alınıp uygulanması en doğru çözümü oluşturacaktır.

Sonuç olarak uzmanlık gerektiren ve heyelân sistemlerinde ayrıntılı çalışmaların yetersiz kaldığı projelere göre hazırlanan raporlarda, ekonomik kayıplarla karşılaşılmaktadır. Potansiyel heyelân alanından geçirilmiş bu asfalt duble yol güzergâhında, heyelân yeri ve geometrisinin ilk incelemelerde yeterince fark edilememesi sonucu, önemli bir ulaşım yolunu oluşturan yol güzergâhı, heyelân riskinin bulunmadığı daha güney kesime kaydırılarak revize edilmek zorunda kalınmıştır.

9. Bölümün Özeti

Kütle hareketleri, yamaçlarda görülen her türlü yer değiştirme hareketine verilen genel isimdir. Kütle hareketleri, yeryüzünün az veya çok eğimli yüzeylerini oluşturan yamaçlarda ya da insanlar tarafından açılan şevlerde

oluşabilmektedir. Bu tür olaylar, olayın meydana geldiği yere, geometrisine hareket eden malzemeye, hareketin hızına ve şekline, kayma yüzeyinin olup olmamasına göre düşme, devrilme, akma, düzlemsel kayma, eğri yüzeyli kayma (heyelân), çökme-oturma vb. isimlerle anılırlar. Doğada meydana gelen kütle hareketlerinin bazılarında, kütle hareketi türlerinin birkaçı bir arada oluşabilir. Bu durumda meydana gelen kütle hareketlerine karmaşık kütle hareketi adı verilir.

Düşme; değişik büyüklükteki zemin ya da kaya parçalarının, dik yamaçlardan aşağıya düşmesi olarak tanımlanır. Düşmenin esas nedeni, dik yamacı oluşturan kayaçta, çatlak ve kırıklarda birbirini izleyen donma ve erime olayları, yamaç topuğu oyulmaları, yapışma direncinin azalması, boşluk suyu basıncının artması ve yer çekimidir. Düşen malzemenin türüne göre, olaya kaya düşmesi, blok düşmesi ya da toprak düşmesi gibi adlar verilir.

Süreksizlik içeren kayaların orijinal düşey/düşeye yakın konumlarının bozularak aşağı doğru dönüp, zamanla yıkılmalarına devrilme denir. Devrilme türü kütle hareketinde, herhangi bir eğik yüzey boyunca kayma söz konusu değildir.

Kütle hareketlerinden akma ve heyelân diğerlerine oranla daha sık rastlanılan ve etkileri daha fazla hissedilen yamaç duraysızlıklarıdır. Bunlardan akma; toprak ya da taş-toprak karışımı, ayrışmış yüzeysel örtünün, içerisinde bulunan su miktarının artışına göre bazen bir sıvı gibi anîden ve hızla yamaç aşağı akmasına hızlı akma denir. Şayet akma; senede birkaç cm gibi çok yavaş, ancak sürekli olarak yer değiştiriyor ise krip adını alır. Ayrıca dik dağ yamaç eteklerinde birikmiş yamaç molozlarında moloz akması veya heyelân türü gibi hızlı akmalar oluşabileceği gibi; krip hareketleri de oluşabilmektedir. Soğuk iklime sahip ülkelerde, donma-erime süreçlerine bağlı olarak eğimli arazilerde suya doygun kum, silt, kil içerikli zeminlerde gelişen yavaş akma (krip) çeşidine soliflüksiyon denir. Ancak akmanın hiçbir türünde, malzeme ister viskoz veya isterse plâstik olsun, belirli bir akma düzlemi bulunmaz.

Toprak ve kaya karışımından oluşan bir malzemenin, altında oluşturduğu kaygan eğri bir yüzey üzerinde, yani belirli bir akma düzlemi üzerinde, aşağıya ve dışarıya doğru hızla hareket etmesine heyelân denir. Heyelânlarda hareketin oluştuğu ana kayma yüzeyi genellikle içbükey bir

geometri arz eder. Bu nedenle bu tür heyelânlara dönel (rotasyonal) heyelânlar adı verilir.

Bir süreksizlik üzerinde yer alan kayaların, bir fay ya da süreksizlik düzlemi yüzeyi *(discontinuity surface)* boyunca sınırlı bir şekilde aşağıya doğru hareket etmesine "düzlemsel"; kesişen iki süreksizlik düzleminin meydana getirdiği bir kama kütlesinin bu iki düzlem üzerinde ve kesişme hattı boyunca aşağı hareket etmesine ise "kama tipi kayma" denir.

Yeraltı ocaklarında ya da tünel açma çalışmalarında oluşabilen göçüklerin yeryüzüne yansıması, oturmalar şeklinde aksetmektedir. Altları boşaltılan yeryüzü katmanlarının göçmesi sonucu, alçalma hareketinin yeryüzünde gözlenmesine çökme denebildiği gibi tasman ya da subsidans olarak adlandırılmaktadır.

İnşaat mühendisliği açısından; bina-köprü veya baraj gibi mühendislik yapılarının kendi ağırlıkları altında, zeminde meydana gelen düşey şekil değiştirmeler, oturma olarak tanımlanmaktadır. Oturma tahmini mühendislik yapıları için son derece önemlidir. Bir zeminin üzerindeki yapıyı güvenle taşıması için yeterli taşıma gücüne sahip olmasının yanı sıra, yapı ağırlığının etkisi altında zeminin aşırı oturma göstermemesi gerekmektedir. Bina-köprü vb. temellerinin oturacağı zeminin kayma mukavemeti ne kadar yüksek ise taşıma gücü de o kadar yüksek olacaktır. Meydana gelecek oturmaların miktarı; zemin özellikleri ve sıkışabilir tabaka kalınlığı yanında, yüklenen alanın boyutlarına ve yapıdan zemine aktarılacak gerilmelerin şiddetine bağlı olmaktadır. Oturmaya sebep olan nedenlerin başında, zeminlerin boşluklu bir malzeme olmaları gelmektedir. Bu sebepten, hacimsel sıkışabilme özelliğine sahip ve yeni yapılan dolgular gibi zemin kütleleri de hem kendi ağırlıkları altında hem de uygulanan dış yükler altında sıkışırlar. Zeminlerde meydana gelen oturmaların bir kısmı yükün uygulanması ile birlikte ortaya çıkarken (anî oturmalar), önemli bir kısmı ise zamana bağlı olarak gelişmekte (konsolidasyon oturmaları) ve oturmaların meydana gelme hızı zeminin geçirgenliğine bağlı olmaktadır. Bir proje sahasında yüzeyden itibaren yer alan zemin tabakalarının toplam sıkışması sonucu zemin yüzünde veya temel altında meydana gelen düşey yer değiştirme toplam oturma; değişik noktalar arasında oluşan oturma miktarları arasındaki farklar ise farklı oturma olarak adlandırılır.

Kütle hareketlerinin oluşumundaki temel faktör, yamaç eğimi ve yer çekimi etkisidir. Yer çekimi ve yamaç eğimi, malzemeyi kaydırmaya çalışırken, yapışma direnci, pürüzlülük vb. faktörler, stabiliteyi sağlamaya çalışan kuvvetlerdir. Kayacın litolojisi, kimyasal özelliği, bünyesinde yer alan süreksizlikler ve konumları, yeraltı suyu, dış yükler ve gerilme dağılımları, kayan kütlenin geometrisi, kütle hareketlerinde etken olan unsurlardır. Kaymaya neden olan kuvvetlerin, tutucu yani kaymayı engellemeye çalışan kuvvetlerden daha büyük olması ile denge durumu bozulur ve kütle hareketleri oluşur. Bir başka deyişle, ortamdaki denge durumunu bozacak nitelikteki doğal ve yapay etkenler, kütle hareketlerinin oluşumunu tetikler veya boyutlarının büyümesine neden olur. Meselâ süreksizliklerin özellikleri, yamaç eğimine göre konumları, depremler, iklim koşulları, özellikle aşırı yağış ve kar erimeleri, yağışlar ile yamaç topuklarının oyulması, kütle hareketlerini oluşturabilecek önemli etkenlerdendir.

Kütle hareketlerinin tetiklenmesindeki en önemli etkenlerden bir diğeri de denge hâlinde olan doğaya insan eliyle yapılan müdâhalelerdir. Bu etkiler genel olarak başta bitki örtüsünün yok edilmesi, topuktan yük kaldırma, şev üzerine veya yüzeyine yük koyma veya şev eğiminin mühendislik önlemleri alınmadan arttırılması olarak karşımıza çıkmaktadır.

Karalarda olduğu kadar denizlerde de yamaç duraysızlıkları ve kütle hareketleri olmaktadır. Bu hareketlerden, yoğunluk akıntıları olarak adlandırılabilecek olanlar yamaçlar üzerinde kanyonların *(canyon)* oluşmalarını sağlarken; daha büyük miktarlardaki malzemenin deniz içi kenar yamaçlarında oluşturdukları heyelân ve akmalar ise deniz tabanında önemli morfolojik değişikliklere ve sahil şeritlerinde de yer yer tsunamiye yol açmaktadır.

Kütle hareketlerinden korunmanın en kolay yolu, söz konusu hareketi ortaya çıkarabilecek koşulların, jeolojik ve geoteknik etütlerle belirlenmesi suretiyle kütle hareketi öncesi bu koşulların ortadan kaldırılmasıdır. Ancak bu durum yeterli değilse örnek olarak kayalarda düşme ve yuvarlanmaları engellemek amacıyla yamaca serilen çelik ağlar, yamacın stabilitesini arttırmak amacıyla yamaç boyunca gerçekleştirilen bulon, ankraj ve yamacın önüne yapılacak olan ağırlıklı veya ankrajlı istinat duvarları, kazıklar, palplanşlar, topukta destekleme ve yüzey/yeraltı drenaj önlemleri, diğer yöntemler olarak kullanılabilir.

10. BÖLÜM: KAYAÇLARIN ve SÜREKSİZLİKLERİNİN MÜHENDİSLİKTEKİ ÖNEMİ

10.1. Giriş

Günümüzde inşaat teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak yeryüzünde karşılaşılan her tür jeolojik ortamda inşaat yapılması mümkün hâle gelmiş ve bu gelişmeler, yeni plânlama ve uygulamalara yol açmıştır. Bununla birlikte yeryüzünde inşa edilmesi plânlanan yapıların uygulama alanları çoğaldıkça ve yapıların boyutları büyüdükçe yapılan inşaatın riskleri de buna paralel olarak artmıştır. İnşaat mühendisliğindeki en önemli risklerin başında jeolojik faktörler gelmektedir. Söz konusu faktörler kendilerini deprem, heyelân, zemin ve stabilite sorunları, aşınma-birikme süreci, inşaatta yapıtaşı veya katkı malzemesi ya da kullanılan kayaçların mineralojik özellikleri vb. olarak gösterebilirler. Bu konulardan bir kısmına, bu kitaptaki ilgili bölümlerde yer verilmiştir.

Yukarıda sayılan jeolojik faktörlerin etkilediği tüm konuların yanı sıra, kayaçların bünyelerinde bulundurdukları süreksizliklere ait tüm özellikler, özellikle kayacın basınç direncine birinci derecede etki etmelerinden dolayı inşaat mühendisliği uygulamalarında büyük öneme sahiptir. Bu açıdan inşaat mühendisliğinde gerek inşaatın yapılacağı alandaki jeolojik faktörlerin ve gerekse yapı taşı veya agrega malzemesi olarak kullanılan kayaçların özelliklerinin bilinmesi, yapıların dayanım ve buna bağlı olarak kullanım sürelerini önemli oranda etkilemektedir.

Bu bölümde kayaçların jeolojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, mineral-kayaç ve zemin-kaya-taş kavramları ile kayaçların mâruz kaldığı deformasyon sonucu bünyelerinde oluşan fay, kıvrım, yarık, çatlak vb.

süreksizliklerin, mühendislik uygulamalarındaki önemine ve kaya şevlerindeki stabilite sorunlarına değinilecektir.

Bu bölümün sonunda yer alan “Örnek, Uygulama ve Yorumlar”da, kaya kalite göstergesine ait bir uygulama ile kohezyonlu kaya süreksizliklerinde boşluk suyu basıncının olması veya olmaması durumuna göre şevin stabilitesinin bozulmadan açılabilir düşey yüksekliğinin hesaplanmasına ilişkin diğer bir uygulama ve zemin etüt sondaj logları örnekleri verilmiştir.

Ayrıca İstanbul Şişli, Seyrantepe Mevkii’de yer alan ve zemin etütleri tamamlanarak inşaasına başlanan “Türk Telekom Arena Stadyumu” yapımı başlangıcında zemin problemleri çıkması üzerine, kitabın birinci yazarı tarafından 29 Mayıs - 07 Temmuz 2008 tarihleri arasında stadyum alanında jeolojik ve geoteknik çalışmalar yapılmış, sorunlara; ilâve çözümler ve öneriler sunulmuştur.

En son olarak da mühendislik çalışmalarına örnek teşkil etmesi açısından, “Zemin Araştırmalarına Yönelik Örnek Bir Teknik Şartname” hazırlanarak bu bölümün sonunda verilmiştir.

10.2. Kayaçların Jeolojik Özelliklerinin Mühendislikteki Önemi

Kayaçların mühendislikteki kullanımlarına etki eden en önemli özellikleri, oluşumları sırasında ve sonrasında geçirdikleri aşamaların ürünü olan ve etkileri kayaçlar üzerinde birinci derecede gözlenen jeolojik özellikleridir. Bunlar; kayacın oluştuğu ortamda, oluştuğu zamandan günümüze kadar kazanmış olduğu özelliklerdendir. Kayacın litolojisi, mineralojisi, kayacın yapısı olarak tanımlanan masif, sütunsal, yastık ve tabaka yapıları yani kayacın uğradığı deformasyon sonucu kazandığı süreksizlikler-fay, çatlak takımları kayacın büyük ölçekteki jeolojik özellikleridir. Kayacın küçük ölçekteki, doku olarak ifâde edilebilen minerallerindeki boy, şekil ve dizilimleri gibi geometrik görüntüleri içeren özellikleri ile kayacın bünyesinde bulunan su etkisi (jeo-hidroloji) hep birlikte ana jeolojik özellikleri oluşturmaktadır. Bu özellikler yanında kayaçlar üzerinde meydana gelen ayrışmalar ve ayrışma dereceleri de kayaçların mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Kayaçların bir kısmı, sahip oldukları jeolojik özelliklerine bağlı olarak mühendislikte önemli kullanım alanları oluştururken, diğer bir kısmı da bazı

risklerin ortaya çıkmasına neden olurlar. Meselâ, mağmadan düşük sıcaklıklarda kristalleşen ve çoğu kayaç içinde sık rastlanan kuvars minerali, atmosferik koşullara en çok direnç gösteren sert bir mineraldir ve bozunmaya karşı çok dayanıklıdır. Bu yüzden yeryüzünde en sık bulunan minerallerin başında gelir. Kuvars, diğer minerallere oranla aşınması ve bozunması zor bir mineral olduğundan beton ve sıva malzemesi olarak kullanılan iyi bir yapı malzemesidir. Kuvarsın, kil ve organik malzemeden arınmış (yıkanmış) olması tercih nedenidir. Oluştuğu kayadan kopartılıp, taşıyıcılarca (akarsu, rüzgâr, buzul) sürüklenip ve bu arada ufaltılıp kum boyutuna dönüşen kuvars parçacıkları plâj kumlarını oluştururlar ve kum boyutunda ufalanmış olan kuvars aynı zamanda sanayide camın ham maddesidir.

Jeolojik özellikleri açısından inşaat sektöründe kullanılan bir başka mineral grubu ise kil mineralleridir. Kil minerallerinin bir bölümü, su ile temaslarında çok küçük ve levhamsı mineralleri arasına su girmesi sonucu şişme özelliği gösterirler. Kil mineralleri, pratik olarak geçirimsiz özellikte olduklarından baraj *(dam)* inşaatlarında toprak barajlarda, çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Ayrışmamış kristalli mağmatik kayaçlar, dayanımları yüksek olduğundan kaplama taşı ya da beton malzemesi olarak kullanılabilir. Mağmatik kayaçların ufak kristalli olanları ise kristallerinin yapışma yüzeylerinin daha fazla olması nedeniyle mukavemetleri iri kristalli olanlarına nazaran daha fazladır. Bu kayaçlar yüksek mukavemet gerektiren yapılarda olumlu sonuçlar verirler. Bununla birlikte mağmatik kayaçlar içerisinde bulunan feldspat uzun jeolojik dönemler boyunca göreceli olarak ayrışıp kil minerallerine dönüşebileceğinden, kayacın taş ocağından alınırken ayrışmış olup olmadığına, ayrışmış ise ayrışma derecesinin belirlenmesine dikkat edilmelidir.

İkincil bir volkanik oluşuk olan zeolit kristalleri ve oluşturdukları zeolitik tüf yatakları, hafif olması ve suda çözülmeme özelliklerinden dolayı iyi bir yapı taşı olması yanı sıra, çimento katkı malzemesi olarak da kullanılabilir. Ayrıca zeolit, kristalleri arasındaki boşluklar çok az olduğundan iyi bir tutucu filtre malzemesidir.

Bunların dışında kayaçlar, sahip oldukları jeolojik özellikleri bakımından inşaatlarda yapı malzemesi olarak fayda sağlayabilecekleri gibi çeşitli sakıncalar da oluşturabilirler. Bunlara örnek olarak alçının ham maddesi olan

jipsler, hacim deformasyonuna uğradıklarından, özellikle su-kanal yapıları ile baraj-tünel inşaatlarında bu tür kayaçların bulunduğu arazilerden kaçınılması veya mühendislik önlemlerinin alınması gerekir.

10.3. Kayaçların Kimyasal Özelliklerinin Önemi

Kayaçların kimyasal özellikleri, özellikle inşaatlarda doğal ham madde olarak kullanıldığı alanlarda oluşturulacak malzemenin işlevi açısından önem taşımaktadır. Kayaçların kimyasal özellikleri, geçirimsizlik ve dayanım, baraj inşaatlarında birinci derecede önemsenir. Bunun dışında kayaçların, kimyasal bileşimine, ayrışma derecesine bağlı olarak gösterdikleri dayanım ve sertlik, baraj ve tünel başta olmak üzere her tür temel kazılarında *(excavation)*, kazılabilirliği doğrudan etkileyen parametrelerdendir. Diğer bir ifâde ile kayaçların kimyasal bileşimleri, kayacın direncini önemli derecede etkilerler. Bu etkilerin, kayaçların inşaat mühendisliğindeki kullanım alanlarında göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

10.4. Kayaçların Fiziksel Özellikleri

Kayaçların önemli fiziksel özellikleri; birim hacim ağırlığı, porozite, boşluk oranı, geçirimlilik ve tane boyu olarak sıralanabilir. Kayaçların fiziksel özellikleri ile ilgili olarak yapılan tanımlamalara bakılacak olursa:

Birim hacim ağırlığı (γ), *(unit weight):* Kayaçların birim hacimdeki ağırlıklarına "**birim hacim ağırlığı**" adı verilir. Kayacın birim hacim ağırlığı, kayaç içerisindeki gözenek, çatlak, yarık gibi boşlukların ve su miktarının derecesine göre değişik değerler alır. Kayaç içerisinde su veya hava ile dolu hacim, **boşluk hacmi** ($\mathbf{V_b}$) *(volume of voids)* olarak tanımlanır. Birim hacim ağırlığı, kayaçtaki porozite, boşluk oranı, tabiî su muhtevası/su içeriği, $\mathbf{w_n}$ *(natural water content)* gibi özelliklere göre değişir.

Porozite (n), *(porosity):* Kayaçların porozitesi; kayaçtaki boşluk hacminin, kayacın tüm hacmine oranı olarak tanımlanır. Kayaçlarda porozitenin bilinmesi, önemli bir parametre olan boşluk oranının bulunmasına yardımcı olur.

Boşluk oranı (e), *(void ratio):* Kayaçların boşluk oranı; kayaçtaki boşluk hacminin, kayacın katı kısmının hacmine oranı olarak tanımlanır. Bu parametre özellikle, temellerdeki oturma hesaplamalarında ve baraj inşaatlarındaki su sızması vb. problemlerin saptanmasında kullanılır.

Geçirimlilik = permeabilite-***k, (****permeability):* Geçirimlilik; birim zamanda, birim mesafeden geçen suyun akış hızına bağlı bir parametredir. Birimi hız cinsinden olup m/s veya cm/s olarak alınabilir. Özellikle baraj inşaat yeri seçimlerinde, su tutulmasında dikkate alınacak en önemli parametrelerin başında geçirimlilik gelir.

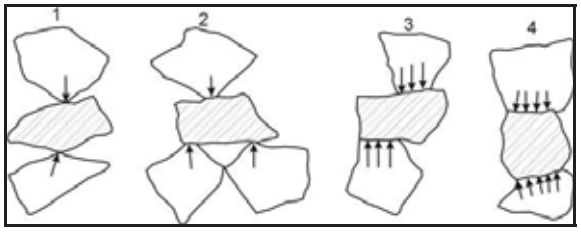
Tane boyu = dâne boyutu**,** *(grain size)**:*** Tamamen ayrışmış mağmatik, metamorfik sedimenter kayaçlar ile taşlaşma geçirmemiş zemin özelliği taşıyan sedimenter kayaçları oluşturan tanelerin boyutlarına göre yapılan sınıflamadır. Taşlaşmamış ya da ayrışmış kırıntılı sedimenter kayaçlarda, çakıl-kum boyutları **elek analizi** *(sieve analysis)* ile kil ve silt arasındaki ayırım ise **hidrometre analizi** *(hydrometer analysis)* ile belirlenir.

10.5. Kayaçların Mekanik Özellikleri

Kayaçların mekanik özellikleri; onların uygulanan bir kuvvete karşı oluşturdukları direnç özellikleri olarak tanımlanır. **Kayaçların direnci** ise üzerlerine uygulanan basınç, çekme, kesme-kayma ve/veya burulma gerilmeleri altında kayacın kırılma, göçme ve bozulmaya karşı gösterdiği dayanıklılıktır. Bu direnç, kayacı oluşturan tane ve minerallerin iç yapılarına ve bunların dizilişlerine bağlı olduğu gibi kayaçlar üzerine uygulanan gerilmenin *(applied stress)* süresi ve koşulları ile de doğrudan ilişkilidir. Kayaç direnci, kayacın dokusuna, kristalleşme ve çimentolanma derecesi ile çimento türüne, kenetlenme derecesine, porozitesine, doygunluk derecesine, homojenliğine, izotropisine, üzerindeki süreksizliklerine ve ayrışma derecesine göre değişir. Kayaçların direnci, arazide ve laboratuarda yapılan deneylerle belirlenir.

Kayaçların direncine etki eden faktörlerden başlıcaları aşağıdadır:

a. Kayacın dokusu: Kayacın içerisindeki eleman veya kristallerin büyüklüğü, biçimi ve dizilişi kayacın direncinde önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 10.1).



Şekil 10.1. Tane dizilişinin basınç direncine etkisi. 4 numaralı diziliş en yüksek direncin oluşacağı örneği temsil etmektedir (Erguvanlı, 1994).

b. Kayacın çimentolanması: Sedimentlerde, kayacın taneleri veya kristalleri arasında yer alan, ancak sayılamayacak kadar ufak ve tane ile aynı anda çökelmiş her türlü, çok küçük kristallerden oluşan dolgu malzemesine **matriks**; çökelmeden sonra oluşan, değişik boyuttaki taneleri birleştiren kimyasal bileşiğe (hamur) ise **doğal çimento** adı verilir. Taneleri birbirine bağlayan doğal çimentonun cinsi silis, karbonat, kil, dolomit veya demir oksit olabilir. Çimento malzemesindeki değişim, kayacın basınç direncinde önemli bir etki oluşturur. Meselâ, çimentosu kil olan kayaçların basınç direnci az, karbonat olan kayaçların orta, silis olan kayaçların ise fazladır.

c. Kenetlenme derecesi: Kristallerin birbirlerine bağlanması, bağlanma yüzeyleri ve kristal kenar biçimleri basınç direncini etkiler.

d. Porozite (gözeneklilik)**:** Bir kayacın boşluk hacminin tüm hacme oranı porozite olarak tariflenir. Poroz (=gözenekli, *porous*) ve tane yapısı veya kristallerin birbirlerine göre olan pozisyonlarının birlikte oluşturduğu kemerlenme ve kiriş yapıları, basınç direncinin değişmesinde etkendir.

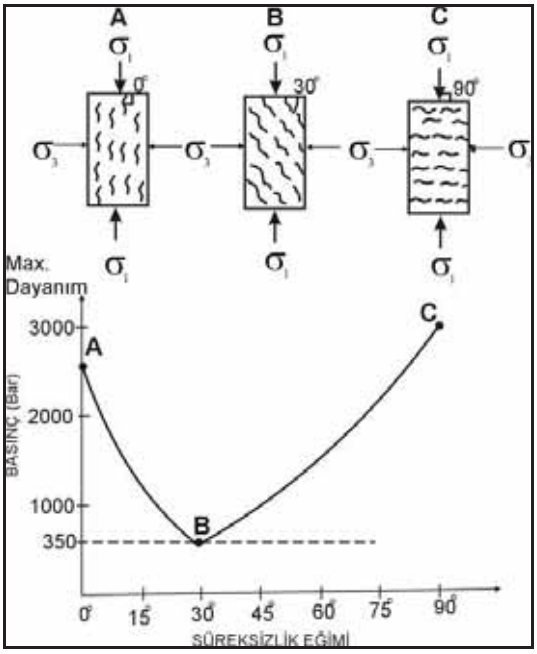
e. Kayacın doygunluk derecesi: Doygunluk derecesi, hacimsel olarak boşlukların ne kadarının su ile dolu olduğunu gösteren bir ifâdedir. Meselâ, killi zemin ve kil içeren kayaların suya doygunluk derecesinin artması basınç dirençlerinin azalmasına neden olur.

f. İzotropi ve homojenlik: Bütün doğrultularda eşit özellikler sunma hâli **izotropi**, benzer cinste ve yapılışta unsurlardan oluşma hâli ise **homojenite** anlamındadır. Kayaçların her tarafındaki maddesel ve bünyesel özelliklerinin aynı ya da farklı olması, basınç direncine direkt olarak etki yapar. Kayalar genellikle litolojiden kaynaklanan farklı malzeme özellikleriyle ya da farklı madde dağılımıyla heterojen, dokusal yapı ve süreksizlikler nedeniyle de farklı doğrultularda, farklı fiziksel özellikler göstermeleri sonucu anizotrop olmaktadırlar.

g. Süreksizlikler: Kayaların bünyelerinde tabaka yüzeyleri, laminasyon, şistiyet yüzeyleri, çatlak, yarık gibi oluşmuş ve belirgin bir yer değiştirme oluşturmamış zayıflık düzlemlerine süreksizlik *(=joint=fracture=break)* denmektedir.

Süreksizlikler, kayanın basınç dayanımı üzerindeki değişimlere birinci derecede etki eder. Şekil 10.2'de, tek eksenli basınç deneyleri altında olan silindirik bir taş *****karot üzerinde, tek eksenli gerilme durumunda σ_1 asal normal gerilmesi altında değişik düzeylerdeki açılara sahip süreksizliklere bağlı olarak malzemenin dayanımı, şekildeki grafikte gösterilmiştir. Buna göre, farklı açılarda süreksizliğe sahip olan tek eksenli gerilme etkisindeki üç numunenin basınç dayanımları C>A>B şeklinde sıralanacaktır. Bunun nedeni, "A" örneğinde eksenel *(axial)* basınç doğrultusu ile kaya süreksizliklerinin aynı doğrultuda olması (0°), "C" örneğinde ise süreksizliklerin düşey eksenel gerilmeye dik doğrultuda (90°) olmasıdır. Bununla birlikte aynı silindirik kaya numuneleri, üç eksenli basınç gerilme etkisi altında, eksenel olarak (σ_1) yanal olarak da $\sigma_2=\sigma_3$ gerilmeleri altında kırılırlar ($\sigma_1>\sigma_2=\sigma_3$). Bu durumda yanal gerilmeler etkisiyle dayanım, A=C>B şeklinde gerçekleşir (Şekil 10.2).

***[Karot:** Sondajda karotiyerden alınan numune**]**.



Şekil 10.2. Tek eksenli ve üç eksenli basınç gerilme etkisi altındaki kaya numunelerinin içerisindeki süreksizlik açısının değişimi ile değişen dayanım ilişkileri (A numunesinde süreksizlik ile düşey eksenel gerilme yönü arasındaki açı 0°; B numunesinde 30° ve C numunesinde 90°).

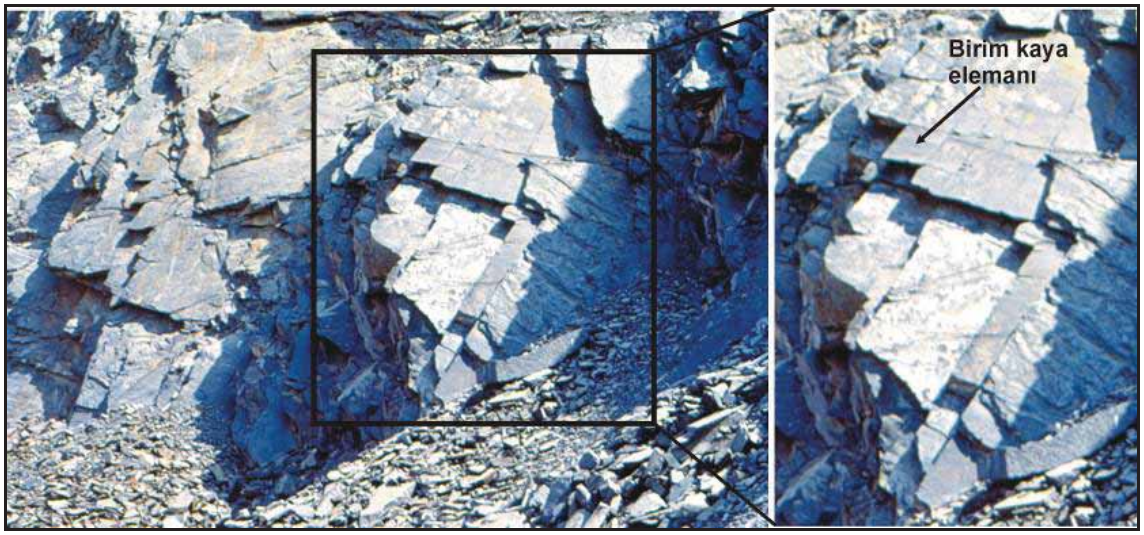
h. Ayrışma derecesi: Kayalar üzerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler ile oluşan ayrışma *(weathering),* kayanın ilksel yapısı üzerinde bozucu bir etki gerçekleştirir. Bu durum, söz konusu kayanın dayanımında, ayrışma derecesi artışına bağlı olarak önemli derecede azalmalara, kaya yamaçlarında da stabilite bozukluklarına neden olur.

10.6. Kayaç, Kaya, Taş ve Zeminlerin Mühendislik Özellikleri

Kayaçlar, kaya ve zeminlerin jeolojideki ortak adı olup mineral topluluklarıdır. Kayaçlar; oluşumları açısından atomdan, moleküle, kristale, minerale ve sonuçta kayaca ulaşan bir bileşen dizisi izlerler. Bu açıdan mineral ve kayaç tanımları doğadaki cisimlerin oluşumu ve sonrasındaki gelişmeleri (tekâmül) ile ilgili yerbilimsel kavramlardır. Bununla birlikte mühendislik açısından mineral ve kayaçlar; **taş** *(stone),* **kaya** *(rock)* ve **zemin** *(soil)* kavramları içersinde de değerlendirilirler. Bu değerlendirmede, kayaçların oluşum ve gelişimlerini anlayıp değerlendirmekten çok, bu cisimlerin yapılacak mühendislik uygulamalarına olan olumlu veya olumsuz yönlerdeki etkilerinin belirlenmesi ön plândadır. Bu nedenle, İnşaat mühendisliği çalışmalarında ağırlıklı olarak **kaya** ve **zemin** kavramları önem kazanmaktadır.

Taşlaşma işlemi geçirmiş olan yani mağmatik kayaçlarda soğumuş, sedimenter kayaçlarda ise "**diyajenez**" olarak adlandırılan taşlaşma sürecini tamamlamış olan doğal çimentolu, kristalli kayaçlar ile metamorfik kayaçlar, kaya (*rock)* olarak tanımlanır. Mühendislik açısından **kaya;** kohezyonu ve içsel sürtünmesi daima var ve yüksek, dayanımlı ve üzerindeki yükü daha iyi taşıyabilme özelliğini içeren ve tek eksenli basınç mukavemeti genelde 10 kg/cm^2 den daha büyük olan doğal bir malzemedir. Sertliği yüksek olan kayaların, dirençleri de yüksektir. Ancak sağlam kayalar; kazılabilme, kırılabilme, patlatılabilme ve öğütülebilme açısından maliyeti yükseltici özelliklere sahiptir.

Mühendislikte kaya kavramı ile birlikte anılan ve arazide kaya mostrasından koparılıp laboratuar ortamında test edilmesi için alınan numuneler **taş** olarak adlandırılır. Doğal ortamda bünyesinde makro süreksizlik içermeyen ve makro süreksizliklerle sınırlandırılmış en küçük kaya parçasına **birim kaya elemanı** denir (Şekil 10.3.A).



Şekil 10.3.A) Birim kaya elemanı. Birim kaya elemanı ve birim kaya elemanını oluşturan süreksizliklere; sistematik çatlak takımlarını içeren ayrışmamış, sağlam mavi grovak mostrasından bir örnek (İkitelli Taş Ocakları, Temmuz 1992).

Birim kaya elemanlarını sınırlayarak bunların arasında yer alan ve doğal oluşmuş, düzlemsel ya da hacimsal yapı bozukluklarına **süreksizlik** (çatlak), kaya kütlesinde komşu iki süreksizlik arasında ölçülen dik mesafeye **süreksizlik aralığı** veya çatlak ara uzaklığı, bir süreksizliği oluşturan iki kayaç parçası arasındaki boşlukta ölçülen dik uzaklığa da **süreksizlik açıklığı** denir. Bu açıklıklar dolgu malzemesi ile doldurulmuş veya dolgusuz olabilir. Kaya süreksizlikleri içinde yer alan dolgu malzemesi kil ise kayanın direnci azalır, karbonat ya da silis olduğu takdirde artar. Hangi yönde gelişmiş olursa olsun belirli bir uzunluk boyunca sayılan toplam süreksizlik sayısına **ortalama çatlak sıklığı** denmektedir.

Taş numuneler üzerinde laboratuar ortamında yapılacak olan deneyler, taşın bağlı olduğu kayanın bünyesinden alınan, süreksizliklerin ihmal edildiği durumdaki, maksimum direncinin belirlenmesini sağlarlar ve taş numuneler, birim kaya elemanı olarak adlandırılan **monolitik** (yekpare taş, tek cisim) parçalardır. Kayalar, jeolojik zaman dilimleri içerisinde, yerkürenin dinamiğine bağlı olarak üzerinde gelişen basınç ve çekme gibi kuvvetlerin etkisi ile deformasyona uğrarlar ve üzerlerinde süreksizlikler oluşur. Bu nedenle, süreksizliklere sahip olan kaya kütlesinin dayanımı, bünyesinden alınan taş numuneye oranla çok düşüktür. Kayalar, yeryüzünde yüzeylendiği kesimleri ve kütlelerinde bulunan süreksizlik yüzeyleri boyunca değişik derecelerde zamanla fiziksel ve kimyasal ayrışmaya uğrarlar. Bu ayrışma kayacın,

süreksizlikler arasında bulunan parçalarının ilksel yapısının da bozuşmasına ve buna bağlı olarak basınç dayanımının daha da düşmesine neden olur (Tablo 10.1).

Tablo 10.1. Kohezyonlu zemin ve kayaların sınıflandırılması.

No	KAYAÇ	Serbest basınç mukavemeti		Örnekler
		kg/cm^2	~MPa	
S1	ÇOK YUMUŞAK ZEMİN: Parmakla kolayca şekil verilebilir, belirgin topuk izleri gösterir.	<0,25	<0,025	Kil
S2	YUMUŞAK ZEMİN: Parmakla kuvvetlice bastırılarak şekil verilebilir, belirsiz topuk izleri gösterir.	0,25-0,50	0,025-0,05	Kil
S3	ORTA KATI ZEMİN: Parmakla şekil vermek çok zordur, tırnakla iz yapılabilir.	0,50-1,0	0,05-0,10	Kil
S4	KATI ZEMİN: Parmakla şekil verilmez, kürekle kesmek zordur.	1,0-2,0	0,10-0,20	Kil
S5	ÇOK KATI ZEMİN: Kürekle kesilmez. Hafriyat için el kazması gereklidir.	2,0-4,0	0,20-0,40	Kil
S6	SERT ZEMİN : Çok dayanıklıdır, el kazması ile kazmak zordur.	4,0-10	0,4-1,0	Kil
R1	ÇOK ZAYIF KAYA: Jeolog çekici ile sertçe vurulunca ufalanır, cep çakısı ile kesilebilir.	10-50	1-5	Kiltaşı, marn, kaya tuzu.
R2	ZAYIF KAYA: Cep çakısıyla kısmen kazılabilir, sert vuruşta çekiç ucu yüzeyde iz bırakır.	50-250	5-25	Kireçtaşı, kömür, şist, silttaşı.
R3	ORTA SAĞLAM KAYA: Çakıyla kazınamaz, jeolog çekici ile sıkı ve tek vuruşta numune kırılabilir.	250-500	25-50	Kumtaşı, kireçtaşı, şist, silttaşı.
R4	SAĞLAM KAYA: Numune, jeolog çekici ile birden çok sıkı vuruşla kırılabilir.	500-1.000	50-100	Kireçtaşı, mermer, granit, gnays.
R5	ÇOK SAĞLAM KAYA: Çatlaksız numuneyi kırmak için jeolog çekici ile çok sayıda darbe uygulanması gerekir.	1.000-2.500	100-250	Kuvarsit, kireçtaşı, gabro, bazalt.
R6	AŞIRI SAĞLAM KAYA: Jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	>2.500	>250	Kuvarsit, gabro, bazalt.

Bu nedenlerle; laboratuara getirilen bir taş numunesi üzerinde kayada yer alan süreksizliklerin, ayrışmanın, yeraltı suyunun ve benzeri diğer özelliklerin etkisinin bilinmesi mümkün olmadığından, yapılan çalışmalar kayanın tümünün özelliklerini tam olarak yansıtmazlar. Sonuçta aynı cismin farklı boyutlardaki üyeleriymiş gibi görülen taş ve kaya, aslında birbirlerinden önemli farklılıklar içerirler ve bu farklılıklar mühendislikteki önemli kavramlardan birini oluşturur.

Süreksizlikler kaya ortamının en zayıf düzlemlerini oluşturduklarından, kaymayı kontrol eden mekanizmayı da denetlemektedirler. Örnek olarak İstanbul kahverengi grovaklarından alınan ve değişik yönlerde gelişmiş düzenli süreksizlik takımları içeren iri kaya bloklarının süreksizlik düzlemlerinin özellikleri YTÜ, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Anabilim Dalı laboratuarında incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda süreksizliklerin ortalama kohezyon değerleri c = 0 ile 0,45 kg/cm^2 arası, içsel sürtünme açıları ise Φ = 22° ilâ 45° arasında bulunmuştur (Yıldırım, 1999).

Kayalar genel olarak iki kısımda incelenir:

Zayıf Kayalar: a) Yerinde basınç dayanımları ve taşıma kapasiteleri düşüktür. b) içsel sürtünme açısı Φ yaklaşık 15°-30° arasındadır. c) Jeolojik dayanım indeksi (GSI) =10-30 arasındadır (Not: Bulunan GSI sayıları genellikle RMR'nin toplamına yaklaşık olarak eşit çıkmaktadır).

Sağlam Kayalar: a) Yerinde basınç dayanımları ve taşıma kapasiteleri yüksektir. b) İçsel sürtünme açısı Φ yaklaşık 30°- 45° arasındadır. c) Jeolojik dayanım indeksi, GSI (≈RMR) 60-90 arasındadır.

Kaya dayanımındaki farklılıklara en iyi örnek, İstanbul Boğazı yakın çevresinde sıkça yüzeylenen grovak adlı kumtaşlarıdır. Çok zayıf-zayıf kaya özelliği taşıyan kiltaşları ve orta sağlam/sağlam silttaşı kayalarıyla *****ardalanan grovaklar (kumtaşları), zemin yüzeyinden genel olarak 15 m ilâ 30 m arası derinliklere kadar, binlerce seneyi aşkın zaman diliminde fiziksel ve kimyasal ayrışmaya (bozunma) uğramışlar ve ayrışmaları sonucu bu seviyelerin renkleri de kahverengiye dönüşmüştür. Daha alt seviyelerde ayrışma gözlenmemekte ve grovakların ayrışmamış orijinal renkleri mavimsi gri tonlarda olduğundan "mavi grovak" olarak adlandırılmaktadırlar. Mavi kalkerler ya da karbonatlı grovaklar ile de ardalanan dayanımlı ve ayrışmamış sağlam bu tür kayalar

agrega malzemesi ya da yapı taşı olarak kullanılırlar. Bununla birlikte grovağın zemin yüzüne yakın ve çoğunlukla ayrışmış olan kesimleri, ayrışmadan dolayı kahverengimsi renklerde olup agrega olarak kullanılmazlar. Bu tür kayalar, ayrışma artışına ya da tektonik nedenlere bağlı olarak geçiş kayacına ya da çok ileri düzeyde gerçekleşen ayrışmayla birincil özelliklerini tamamen kaybederek kahverengi rezidüel zemine ve toprağa dönüşmektedir. Rezidüel zeminde, ana kayaya ait yapı ve doku da tanınamayacak ölçüdedir. Ayrık grovaklar, silttaşları ve kiltaşları, ayrışma dereceleri bağlı olarak yamaçlarda sıkça stabilite sorunlarını oluştururlar.

***[Ardalanma *(succession)*:** Farklı nitelikteki kayaç tabaka ya da tabakalar topluluğunun art arda tekrarlanmaları. Örn. Şekil 13.B)**]**.



Şekil 13.B) Mermer-kalkşist ardalanmaları. Kırşehir İli, Mucur İlçesi, Geycek Köyü civarında metamorfik kayaçlardan oluşan Kırşehir Masifi'nde (İç Anadolu Masifi, Kaman Grubu-Tamadağ formasyonu, Mesozoyik öncesi; Seymen, 1981) görülen ardalanmalar. İstifteki ardalanmalar; açık beyaz renkli mermerler ile koyu renkli kesimleri oluşturan metapelit (**metapelit:** kiltaşı, silttaşı, şeyl vb. sedimenter kayaçların metamorfizmaya uğramasıyla oluşmuş metamorfik kayaçlar, şistler) ve kalkşistler arasında oluşmaktadır. Koordinatlar: X (kuzey-güney): 4327311, Y (doğu-batı): 629163; Z (râkım) = +1.327 m (Foto: 01.12.2012).

İnşaat mühendisliğinde geçerli olan diğer önemli bir kavram ise taşlaşma geçirmiş veya geçirmemiş olsun, kaya ya da ayrık hâlde bulunan her türlü kayacın, topluca "**zemin**" olarak tanımlanmasıdır. Mühendislik jeolojisinde bu kavram kayaç ile eşdeğerdir. Mühendislik jeolojisi çalışmalarında '**zemin'**ler;

uzun bir jeolojik dönemde birincil olarak büyük çökel havzalarında çökelip, ancak taşlaşma geçirmemiş, gevşek tutturulmuş veya tutturulmamış kayaçlar olarak tariflenirler. Zeminler; kayaların ayrışmasıyla oluşmakta, bu ayrışma sonucu ya yerinde ayrışmış (bozunmuş) ama henüz taşınmamış ya da ana kayadan koparılıp taşınarak başka alanlarda birikerek taşlaşmamış çökelleri oluşturmaktadırlar. Uzun bir jeolojik dönemde tek veya çeşitli cins minerallerden, kayaç parçacıklarından ya da hem mineral hem de kayaç parçalarından oluşan taşlaşma geçirerek katılaşmış kayaçlar **kaya** olarak adlandırılmaktadır. Ayrışmış, ancak bulundukları ortamdan taşınmamış zeminler, bağlı oldukları kayacın kökensel açıdan özelliklerine sahiptirler ve derine doğru gidildiğinde oldukça dereceli olarak ana kayaya geçiş gösterirler. Buna karşın taşınmış sedimenter birikimler ise tabanlarında yer alan ve farklı litolojik özellik içeren kaya ile keskin bir uyumsuzluk yüzeyi tarafından oluşturulmuş bir sınıra sahiptirler. İlgili mühendislik çalışmalarında da; bu özellikler dikkate alınmalı ve farklı özelliklere sahip kaya, taş ve zeminler kendi grupları içinde tanımlanmalı, bunların mukavemet değerleri, arazi *(*yerinde=*in situ)* ve laboratuar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmelidir.

10.7. Zeminin Tanımı, Sınıflandırılması ve Zeminlerde Uygulanan Deneyler

Mühendislikte **zemin;** yerinde ayrışmış veya taşınmış olan kırıntılı *(clastic)* çökellerin oluşturduğu katılaşmamış, taşlaşma işlemi geçirmemiş, taneler arasında boşlukların da olduğu ayrık kayaç olarak tanımlanmaktadır. Zeminler, taneler arasında bağlantı bulunmayan veya suyun etkisiyle taneler arasındaki bağlantının koparılabildiği ayrık kayaçlardır. Zemin mekaniğinin ana konusunu oluşturan zeminler, kendilerini oluşturan kırıntıların (tanelerin =dânelerin) tane boyutuna göre sınıflandırılırlar ve adlandırılır (Tablo 10.2; Şekil 10.4). Sedimenter ve zemin özelliği taşıyan kayaçlarda görülen dereceli tabakalanma, sedimentin iyi boylanmasına ve dolayısıyla zeminin o bölümünün çakıl, kum, silt, kil gibi tane boyuna ait isimlendirme ile tanımlanmasına neden olur. İyi derecelenmiş sedimentlerin oluşturduğu zeminlerin mukavemeti daha yüksektir. Bununla birlikte doğada uniform tanelerin oluşturduğu sedimenter birikimler de bulunmaktadır. Bu durumda, ilk

aşamada zeminin hangi tane boyutundaki kırıntılılardan oluştuğunun belirlenmesi ve bunun belirli bir standartta isimlendirilerek tanımlanması gerekir. Zeminin sınıflandırılması ve mühendislik parametrelerinin üretilebilmesi için ilk aşamada, zemini oluşturan kırıntıların tane boyunun belirlenmesi gerektiğinden, zeminlerde **elek ve hidrometre analizleri** gerçekleştirilerek kırıntılıların tane boyutu, yüzde miktarları ile birlikte belirlenir. Zemini oluşturan tanelerin birbirinden ayrılması işlemi, tane boyuna göre belli aralıklı eleklerde elenmeleri işlemi ile gerçekleşir. Geniş açıklıklardan dar açıklıklara doğru birbirinin altına yerleştirilmiş olan eleklerde elenen iri ve ince dâneli zeminler, çaplarına uygun olarak farklı çaplı eleklerden geçerler. Her bir elek üzerinde kalan ve her bir elekten geçen malzeme miktarının belirlenmesiyle, çakıl ile kum çap aralığındaki malzemenin, kayacın ne kadarlık bir kısmına sahip olduğu, hem miktarsal olarak ve hem de oransal olarak belirlenir. Ancak silt ve kil, tane boyları çok küçük olduklarından en alttaki eleğin (200 No'lu) altında beraberce birikir. Kil ve silti birbirinden ayırmak için ise "**Hidrometre Analizi**" yapılır. Bu deneylerin ardından tane boyutu ve yüzdelerine göre "Tane Çapı Dağılımı Eğrisi" (**granülometre**) yardımıyla zemin sınıflandırılır. Zeminlerin tane boyutu dağılımları; su geçirgenliği, mukavemet, sıkıştırılabilirlik gibi özellikler başta olmak üzere mühendislik özelliklerini etkiler (Özaydın, 2011).

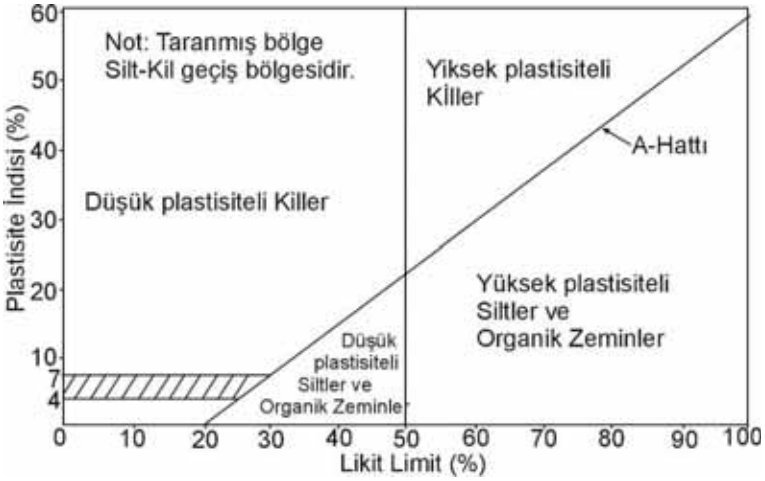
Tane boyları dışında zeminlerin tanımlanmasında ikinci önemli parametre, zeminlerin kütle özelliklerinin belirlenmesidir. Zemini oluşturan katı, sıvı ve gaz (hava) kısımların birbirine göre hacim veya ağırlık oranları, zemin dokusu, kıvamı ve iç yapısı gibi bünyesel özellikleri **zeminlerin kütlesel özellikleri** olarak tanımlanır (Özaydın, 2011). Bu özelliklerin belirlenebilmesi için arazide zemin üzerinde doğrudan veya laboratuar ortamında alınan numuneler üzerinde deneyler uygulanır.

Arazide zemin üzerine uygulanan deneyler araştırma çukurları ve sondajlar içerisinde gerçekleştirilir. Söz konusu deneyler; standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT), cep veyn ve cep penetrometre testi, arazi veyn testi, presiyometre testi, plâka yükleme testi ve sondaj kuyusu kesme testi olarak adlandırılır. Araziden alınan zemin numuneleri üzerinde ise laboratuar ortamında elek ve hidrometre analizleri, kıvam limitleri *(consistency limits),* permeabilite deneyi, ödometre deneyi, kesme kutusu deneyi, serbest

basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, laboratuar veyn ve düşen koni deneyleri uygulanır (Özaydın, 2011).

Tablo 10.2. Birleştirilmiş zemin sınıflandırması.

<table>
<tr><th colspan="3">ANA GRUPLAR
(7,5 cm'den iri malzeme hariç tutulmuştur)</th><th>GRUP SEMBOLÜ</th><th>TİPİK İSİMLER</th></tr>
<tr><td rowspan="8">İRİ DÂNELİ ZEMİNLER
(malzemenin %50'sinden fazlası 200 No'lu elek çapından büyüktür).</td><td rowspan="4">ÇAKIL
(iri malzemenin %50'sinden fazlası, No 4 elekten büyüktür).</td><td rowspan="2">TEMİZ ÇAKIL
(ince az veya yok)</td><td>GW</td><td>İyi derecelenmiş çakıl, çakıl-kum karışımları (ince dâneleri az veya hiç olmayan).</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>Fena derecelenmiş çakıl, çakıl-kum karışımları (ince dâneleri az veya hiç olmayan).</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ÇAKIL
İnce Malzemeli
(oldukça ince var)</td><td>GM</td><td>Siltli çakıllar, fena derecelenmiş çakıl-kum-silt karışımları.</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>Killi çakıllar, fena derecelenmiş çakıl-kum-kil karışımları.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">KUM
(iri malzemenin %50'sinden fazlası, No 4 elekten küçüktür).</td><td rowspan="2">TEMİZ KUM
(ince az veya yok)</td><td>SW</td><td>İyi derecelenmiş kumlar ve çakıllı kumlar (ince dâneleri az veya hiç olmayan).</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>Fena derecelenmiş kumlar ve çakıllı kumlar (ince dâneleri az veya hiç olmayan).</td></tr>
<tr><td rowspan="2">KUM
İnce Malzemeli
(oldukça ince var)</td><td>SM</td><td>Siltli kumlar, fena derecelenmiş kum, silt karışımları.</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>Killi kumlar, fena derecelenmiş kum-kil karışımları.</td></tr>
<tr><td rowspan="5">İNCE DÂNELİ ZEMİNLER
(malzemenin %50'sinden fazlası 200 No'lu elek çapından küçüktür).</td><td colspan="2" rowspan="2">SİLTLER VE KİLLER
Likit Limit < 50</td><td>ML</td><td>İnorganik silt ve çok ince kumlar, kaya tozu, çok az plâstik siltli veya killi ince kumlar.</td></tr>
<tr><td>CL</td><td>İnorganik killer (düşük ile orta plâstisitede), çakıllı killer, kumlu killer, siltli killer, yağsız killer.</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">SİLTLER VE KİLLER
Likit Limit > 50</td><td>MH</td><td>İnorganik siltler, diyatomeli veya mikalı ince kumlu veya siltli zeminler, elâstik siltler.</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>Yüksek plâstisiteli inorganik killer, yağlı killer.</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>Ortadan yükseğe plâstisiteli organik killer.</td></tr>
<tr><td colspan="3">FAZLA ORGANİK ZEMİNLER</td><td>PT</td><td>Turba (peat) ve diğer fazla organik zeminler.</td></tr>
</table>



Şekil 10.4. *Casagrande* Plâstisite Kartı.

10.8. Süreksizliklerin Mühendislikteki Önemi

Yer kabuğunu oluşturan kayaçların üzerinde, oluşumları sırasında ve sonrasında gelişerek kayaç içerisindeki komşu noktalar arasındaki fiziksel ve/veya mekanik bağları koparan yapısal bozukluk ya da çatlaklar olarak tanımlanan '**süreksizlikler**'in bir bölümü, kayaçların oluşumları sırasında birincil (primer) meydana gelir. Bu tür süreksizliklerin en yaygın ve önemli örneğini sedimenter kayaçların, çökelimleri sırasında kazandıkları tabakalaşma oluşturur. Ayrıca mağmatik kayaçlarda soğumaları sırasında gelişen soğuma çatlakları, lâvlarda oluşan akma yapıları, metamorfik kayaçlardaki yapraklanmalar ile minerallerin atom dizilimlerinin oluşturdukları zayıflık bağları boyunca gelişen dilinim düzlemleri de kayaçların oluşum sırasında kazandıkları yapılar olup çok sık gözlenen süreksizliklerdendir.

Kayaçların oluşumları sırasında kazanmış oldukları süreksizlikler dışında, oluşumlarından sonra da yerkürenin dinamiği sonucu gelişen gerilmelerin etkisi ile oluşan deformasyonlara bağlı olarak kayaçlarda ikincil (sekonder) süreksizlikler gelişmektedir. Bu tür süreksizliklere kırık olarak adlandırılan çatlak, yarık ve faylar örnek olarak verilebilir.

Kayaların bünyelerinde (yapı) yer alan süreksizlikler mühendislik açısından büyük öneme sahiptir. Bünyesinde süreksizlikler bulunan kayaların, süreksizlik sayılarının artışına bağlı olarak dayanımları da azalacaktır. Aşırı yüklerde ise süreksizlik düzlemlerinin özellik ve konumlarına bağlı olarak kayanın taşıma gücü önemli oranda azalacaktır. Kayaya uygulanan basıncın

ve bu basınçlarda rol alan kayanın içerisindeki süreksizlikler ve yönleri, kayanın dayanımında farklılıklar oluşturmakta ve şevlerde stabilite sorunlarına neden olmaktadır. Süreksizliklerin içerisindeki dolgu malzemesinin türü ve süreksizliklerin boyutları da kayaların mukavemet özelliklerinde önemli rol oynarlar. Özellikle, kayalardaki çok ince süreksizlikler olarak tanımlanan fissür ve onun ancak mikroskopta gözlenebilen benzeri olan mikrofissür yapıları, kayaçlarda kısmen zayıf zonları oluşturabilirler ve çok az da olsa olumsuz etkileri vardır. Fissürler, çok ince olduklarından görülmeleri oldukça zordur. Bu durum fissürlerin belirlenmesinde zorlaştırıcı bir durum yaratır. Gözle görülebilen çatlak ve yarıklar ise sıklıklarına, birbirleriyle ilintilerine ve içinde yer aldıkları kayaç cinslerine göre kayacın geçirgenlik ve taşıma gücünde belirgin azalmalar gösterirler.

Süreksizlikler niteliklerine göre:

a) Süreksizlik (=çatlak) ara uzaklığı,
b) Kaya kalite göstergesi (RQD),
c) *****Dalga hızı yayılımı

açısından değerlendirilir.

***[**Dalga hızı yayılımı: Kayalarda sismik boyuna dalgaların yayılma hızı >5.000 m/sn ise “ayrışmamış”; 5.000-4.000 m/sn = az ayrışmış; 4.000-3.000 m/s = orta ayrışmış; 3.000-2.000 m/sn = fazla ayrışmış; <2.000 m/sn ise “çok fazla ayrışmış kayalar” olarak tanımlanır**]**.

Kaya içerisinde yer alan çatlaklar daha sonraki aşamalarda ikincil malzeme tarafından doldurulmuş olabilir. Söz konusu dolgu malzemesi içerisinde kil ve jips gibi su ile birleştiğinde şişebilme özelliğine sahip olanları, yüzey veya yeraltı suları etkisiyle şişerek hacim deformasyonuna uğrarlar. Bu da yerüstü ve yeraltı yapılarında olumsuz etkiye neden olur. Çatlaklar, bu açıdan da:

a) Doldurulmamış,
b) Kısmen doldurulmuş,
c) Tam doldurulmuş

olmaları açısından değerlendirilirler.

Çatlak açıklıklarındaki dolgu malzemeleri de kendi içlerinde:
a) Jips, kalsit, kuvars vb. dolgulu,

b) Klorit, epidot vb. malzeme ile dolgulu,

c) Aktif olmayan killer ile dolgulu,

d) Aşırı şişen killerle dolgulu

olmalarına göre değişen özellikler gösterirler.

Mühendislik çalışmalarında özellikle çatlakların ara uzaklığı önem taşımaktadır. Bu açıdan çatlakların arasındaki uzaklık dikkate alınarak aşağıdaki sınıflama (İngiltere) ortaya çıkarılmıştır:

Kayaç Tanımı	Çatlak Ara Uzaklığı (cm)
Çok seyrek çatlaklı (çok geniş aralıklı)	>200
Seyrek çatlaklı (geniş aralıklı)	200-60
Orta çatlaklı (orta derece aralıklı)	60-20
Sık çatlaklı (yakın aralıklı)	20-6
Çok sık çatlaklı (dar aralıklı)	6-2
Aşırı sık çatlaklı (çok dar aralıklı)	<2

Ortalama çatlak sıklığı, inceleme yapılacak arazilerde yüzeyde kayaç mostralarında ölçülebileceği gibi ***sondajlardan da belirlenebilmektedir. Yapılan zemin etüt sondajlarında, karotiyerden alınan karotlar (Şekil 10.5, 10.6, 10.7) üzerinde ölçümler yapılarak incelenen bölgedeki kayanın karot verimi ve kalite göstergesi ve diğer değerleri sayısal olarak belirlenip sınıflandırılabilmektedir.

***[Sondaj** *(boring, drill)*: Yer altında bulunan jeolojik formasyonlar ve yer altı zenginlikleri hakkında bilgi toplamak ve işletmelerde üretime geçmek amacıyla makina ile yerin derinliklerine doğru küçük çaplı kuyuları (delik) açmak için yapılan işlemlerin tümüdür. **Karotiyer** (karot tüpü, *core barrel*): Tijlerin alt ucuna takılan, sondaj esnasında devir ve baskıyı ucunda yer alan matkaba nakleden, devir dâim suyunu ileten, karot parçalarını alıp içinde muhafaza ederek yeryüzüne getiren tüp alettir.

Matkap *(auger)*: Karotiyerin ucuna takılan, delme (kesme) işlemini yapan kesic uç ya da kesici alettir (örn. elmas matkaplar, vidya kronlar, *Rock Bit*'ler, çatal matkap ve baltalar vb.)

Tij *(boring rod)*: İçi boş ve birbirine takılan, kuyuda takımı askıda tutan, içinden su geçebilen iki tarafına diş açılmış çeşitli boy ve çaplardaki çelik borulardır; Gürpınar, 1978)**]**.

Bu amaçla kayadan alınan silindirik karot parçaları üzerinde, kayanın kalitesini belirlemeye yardımcı olan:

- Toplam Karot Verimi (TCR veya TKV),
- Sağlam Karot Verimi (SCR veya SKV),
- Kaya Kalite Göstergesi (RQD),
- Çatlak (=süreksizlik=kırık= eklem) Sıklığı (FF) ve
- Süreksizliklerin özellikleri

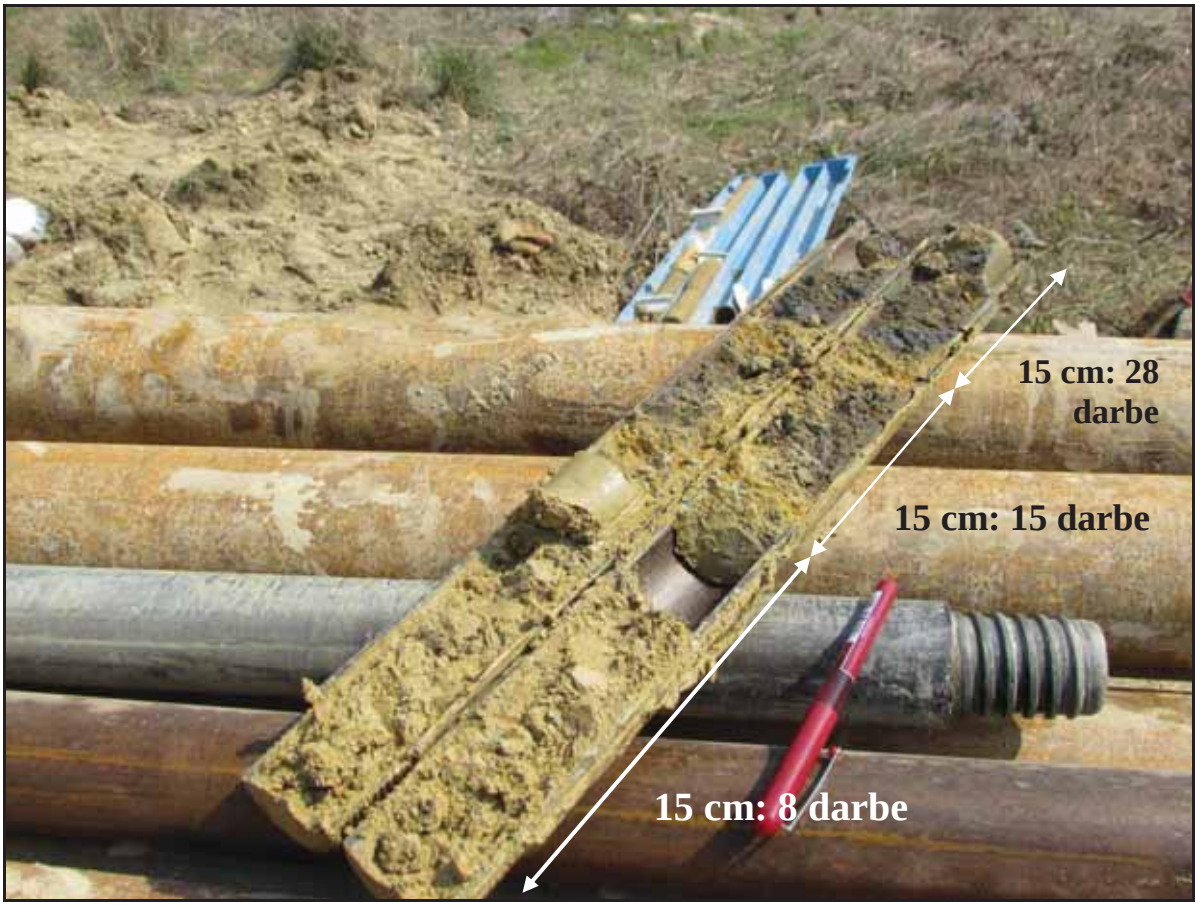
hesaplanır.



Şekil 10.5. Bir temel zemini inceleme sondajı.



Şekil 10.6. Karot sandığı ve karotlar. İstanbul İli, Merter Semti, Zeytinburnu Mithatpaşa Durağı'nda zemin yüzey kotundan (z= +17 m) itibaren, 175,50 m derinliğinde yapılan D-0950313 No'lu İBB sondajından elde edilen silindirik karotlar ve sondaj sandıkları. Sondaj sandıklarında 170 m ile 175,50 m derinlikler arasından alınan mavi grovak kayası karotları görülmekte. İBB-OYO, Mikrobölgeleme çalışmaları; Koordinatlar: X (kuzey-güney) = 4541651.18; Y (doğu-batı) = 407100.13. Bu sondaj yerinde; zemin yüzeyinden 155 m derinliğe kadar kesiksiz devam eden Üst Oligosen-Üst Miyosen yaşlı kil-kum ardalanmalı zemin özelliği taşıyan çökellere; 155 m derinlikten itibaren ise bu kumlu-killi çökellerin diskordan olarak oturdukları, ana kayayı oluşturan Paleozoyik yaşlı mavi grovaklara girilmiştir [Avcılar formasyonu, (Yıldırım vd., 2010); (Foto: 31.01. 2007)].



Şekil: 10.7. SPT tüpü numuneleri. Başakşehir İlçesi, Bahçeşehir Mahallesi'nde bir zemin etüt sondajında yapılan SPT deneyinde 10 m – 10,45 m derinlikler arasından alınan 45 cm uzunluğundaki SPT tüpünde yer alan zeminin görünümü. İlk 15 cm'de (ön tarafta, sarı görünümlü) kumlu kilde 8 darbe, ikinci 15 cm'de yer alan sarımsı kahverengi kumlu kilde 15 darbe, üçüncü 15 cm'de (koyu gri görünümlü) yer alan kilde ise 28 darbe adedi sayılmış, yani SPT darbe sayısı (N)= 15+28=43 bulunmuştur. Ancak sondajdan elde edilen N= 43 darbe sayısı, düzeltme yapıldıktan sonra yani efektif düşey jeolojik gerilme [sadece granüler zeminde kullanılır], enerji, sondaj tij uzunluğu, sondaj çapı ve karotiyer kılıf düzeltme katsayıları ile çarpıldıktan sonra elde edilen "N" değeri kullanılmalıdır (21.03.2012).

Toplam Karot Verimi *(TCR: Total Core Recovery):* Bu parametre, karotiyerin bir ilerleme aralığında (manevra boyu), içerisine aldığı doğal süreksizliklerle ayrılmış karot parçalarının toplam uzunluğunun, karotiyerin ilerleme aralığının uzunluğuna (manevra boyu, ilerleme boyu) oranının yüzde olarak ifâdesidir ve "Toplam Karot Yüzdesi" olarak da adlandırılır.

$$TCR(\%) = \frac{Bir\ ilerleme\ aralığında\ \ (manevra\ boyu)\ karot\ \ parçalarının\ toplam\ uzunluğu}{İlerleme\ aralığının\ (manevra\ \ boyu)\ uzunluğu}$$

Sağlam Karot Verimi *(SCR: Solid Core Recovery):* **"**Silindirik Katı Parça Karot Yüzdesi" olarak da ifâde edilebilen bu parametre, karotiyerin bir ilerleme aralığında içerisine almış olduğu karot parçalarından, silindirik şeklini koruyabilmiş olanlarının, ilerleme aralığı uzunluğuna (manevra boyu) oranının yüzde olarak ifâdesidir.

$$SCR\,(\%) = \frac{Bir\ ilerleme\ aralığında\ \ silindirik\ \ şeklini\ \ (çapını)\ koruyan\ \ karot\ \ parçaların\ın\ toplam\ \ uzunluğu}{İlerleme\ \ aralığının\ \ uzunluğu}$$

Kaya Kalite Göstergesi *(RQD: Rock Quality Designation):* "Kaya Kalitesi Özelliği" ya da "Değiştirilmiş Karot Yüzdesi" olarak ifâde edilebilen bu parametre, karotiyerin bir ilerlemesinde içerisine almış olduğu karot parçalarından, doğal süreksizliklerle birbirinden ayrılmış, boyu 10 cm ve daha uzun olan silindirik şeklini koruyabilmiş parçaların toplam uzunluğunun, ilerleme aralığı uzunluğuna oranının yüzde olarak ifâdesidir. Kaya kalitesinin belirlenmesinde yaygın olarak istifade edilen bu parametre;

$$RQD\,(\%) = \frac{Bir\ \ ilerleme\ \ aralığında\ \ \ boyu\ \ 10\,cm\ ve\ 10\,cm'\,den\ \ büyük\ \ olan\ \ karotların\ \ \ toplam\ \ uzunluğu}{İlerleme\ \ aralığının\ \ \ uzunluğu}$$

formülü yardımıyla hesaplanır.

Sondaj sırasında veya karotiyerden karotun çıkarılması sırasında yapılan zorlama gibi işlem hatalarından doğan karottaki yapay kırılmalar, bu parametrenin hesaplanmasında dikkate alınmazlar.

RQD değerlerine göre "Kaya Kalite Göstergesi" aşağıdaki abakta yer almaktadır (*Deere*, 1963).

RQD (%)	Kaya Kalite Göstergesi
<25	Çok zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok iyi

Çatlak Sıklığı: Birim uzunluğa düşen ve birbirlerine paralel tekrarlanan bir çatlak takımına dik durumdaki bir düzlem içinde ölçülen çatlak sayısına çatlak sıklığı denir.

Ortalama çatlak sıklığı(kstini) (=Ortalama eklem sıklığı=FF): 1 m'deki tüm doğal çatlakların (=süreksizliklerin) sayısı olarak tanımlanır. Bu sayı, arazide mostralar üzerinde belirlenebileceği gibi sondajlarda da karotiyerin bir ilerleme aralığı boyunca içerisine aldığı ayrık ve doğal süreksizliklerin sayısının, ilerleme boyuna (manevra boyu) bölünmesi sonucu belirlenebilmektedir (Örnek Uygulama: 10.10.1). Bu sayı sondajda; belirli bir uzunluk boyunca sayılan toplam süreksizlik sayısının, o uzunluğa bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Kısaca bu parametre, sondajlı çalışmalarda bir ilerlemedeki toplam süreksizlik sayısının, ilerleme boyuna oranı olup sondaj loglarına kaydedilmesi gereken bir parametredir.

Kayalarda ortalama çatlak sıklığı 1 m'de, <1 ise masif; 1 ilâ 3 arasında ise az çatlaklı-kırıklı; 3 ilâ 10 arasında ise orta çatlaklı-kırıklı; 10-50 arası çok çatlaklı-kırıklı; >50 ise parçalanmış kaya olarak tanımlanır. Bir ilerleme aralığı boyunca çatlak sıklığında faylanma veya makaslama nedeniyle belirgin farklılıklar var ise bu kısımlar için çatlak sıklığı ayrıca hesaplanır. Sondajdan kaynaklanan yapay kırıklar çatlak sıklığında değerlendirmeye yani dikkate alınmamalıdır. Sondaj kayıtlarının tutulduğu çizelgeye (föy) de **sondaj logu** *(boring log)* denmektedir.

Zemin Etüt Sondaj Loglarının İçermesi Gereken Hususlar:

- Sondaj loglarında yüklenici, işveren, proje, mevkii, sondaj yeri koordinatları, sondaj-sayfa no, sondajın derinliği, sondajın başlangıç ve bitiş tarihi, ölçeği, sondaj yöntemi ve makinası, sondör, logu yapan ve kontrol mühendisi gibi sondaj veri ve bilgileri yer almalıdır.
- İncelenen arazide yer alan kayaçların başlangıç ve bitiş sınır kotları açık bir şekilde loglarda gösterilmeli, kayaçların litolojik özellikleri ve zemin kaya profili detaylı bir şekilde belirtilmelidir.
- Yeraltı su seviyesinin olup olmadığı belirtilerek, varsa başlangıç kotu işaretlenmelidir.
- İncelenen arazide gerçekleştirilmiş arazi deneyleriyle ilgili veriler; tabaka, derinlik gösterilerek sunulmalıdır (örn. zeminlerde: SPT deneyi en çok kullanılan arazi deneylerinin başında gelmektedir. Bu nedenle eğer arazi deneyi olarak SPT yapılmışsa; deneyin hangi formasyona ait zeminde, hangi derinliklerde gerçekleştirildiği ve ilk, ikinci ve son 15 cm'lerde elde edilen darbe sayıları ayrı ayrı belirtilmelidir).
- Sondaj sırasında zeminden örselenmemiş numune *(undisturbed sample)* alınmış ise alındığı derinliğin yanına UD sembolü kullanılarak bu durum loglarda belirtilmelidir.
- Kayalarda, toplam karot verimi (TCR-karot yüzdesi), sağlam karot verimi (SCR-silindirik karot yüzdesi), kaya kalite göstergesi (RQD) ve ayrışma *(weathering)* gibi veriler, sondaj loglarında gösterilmelidir.

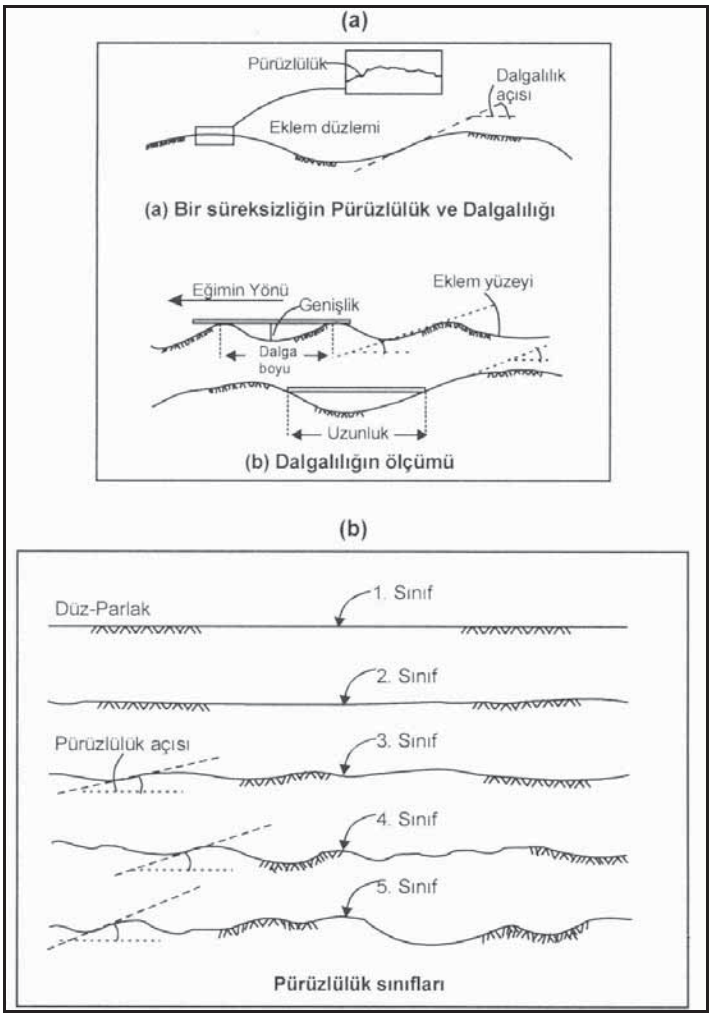
10.9. Kaya Şevlerinde Süreksizlikler ve Stabilite Sorunları

Kaya şevlerinde stabiliteyi denetleyen başlıca unsur süreksizliklerdir. Yani kayalarda, kaymayı süreksizlikler belirlemektedir. Süreksizliklerin, eğim yönleri, pürüzlülüklerinin durumu, dolgu malzemesi içeren süreksizliklerde kohezyon (“c”, *cohesion)* veya süreksizlikler arasında su olup olmaması [boşluk suyu basıncı (“u”, *pore-water pressure*)] durumları yamaç stabilitesini etkileyen en önemli unsurlar olup bu unsurların sayısal olarak belirlenmesi gerekmektedir.

10.9.1. Süreksizliklerin pürüzlülüğü ve dalgalılığı

Bir süreksizlik yüzeyinin, düzlemsellikten küçük ölçekte zikzak yaparak sapmasının ölçüsüne **pürüzlülük** *(roughness)* büyük ölçekte kavis yaparak sapmasının ölçüsünü ise **dalgalılık** *(waviness)* denir. Dalgalılığın değerlendirilmesinde, yüzeydeki hat boyunca değişik noktalarda ölçülen dalga boyu ve genlik parametreleri dikkate alınır. Kayada, kayma yüzeyinin eğim yönü biliniyorsa, pürüzlülük ve dalgalılık ölçümleri bu yöne paralel süreksizlikler boyunca yapılmalıdır. Süreksizlik yüzeyi düz, pürüzlü, ondüleli veya merdivenimsi olabilir. Pürüzlülük, kayaların kayma direncini ve duraylılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bilhassa kaya şevlerinde süreksizliklerin pürüzlülüğü yanında süreksizliklerin sıklığı, doğrultu ve eğimleri, açıklıkları, dolgu kalınlığı, kayma direncini ve dolayısı ile duraylılığı etkilemektedirler. Kaya şevlerinde bulunan süreksizliklerin yüzeylerindeki pürüzlülüğün artması, kayma direncini de arttırmaktadır. Kısaca, süreksizlik yüzeyindeki kavisli ana dalgalanma birinci derece pürüzlülük (dalgalılık), zikzaklar yapan küçük girinti ve çıkıntılar ise ikinci derece pürüzlülük (pürüzlülük) olarak tanımlanır ve ikinci derece pürüzlülüğün eğim açıları, birinci dereceye (dalgalılık) göre daha yüksektir (*Patton* ve *Deere*, 1971). Dolgu içermeyen süreksizliklerde, düşük normal gerilme altında kaymaya karşı mukavemeti, ikinci derece pürüzlülükler kontrol eder. Ancak normal gerilmenin yükseldiği durumlarda ikinci derece pürüzler ezilir ve kayma üzerindeki etkileri kaybolarak kaymayı, dalgalılık (birinci derece pürüzler) kontrol ederler. Normal gerilmenin daha da artması durumunda, tüm pürüzler (çıkıntılar) yenilmekte ve süreksizlik boyunca meydana gelen yer değiştirme, dolayısıyla makaslama dayanımı, doğrudan düz süreksizlik yüzeyleri tarafından denetlenir.

Süreksizlikler bazen dolgu malzemesi içerirler. Süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını, süreksizliğin oluşumundan sonra (ikincil) dolduran ve çoğunlukla ana kaya malzemesinden daha zayıf olan ara yüzey malzemeye **"dolgu malzemesi"** denir. Dolgulu bir süreksizlikte, süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki uzaklık ise **"dolgu kalınlığı"** olarak tanımlanır. Kuvars, kalsit, pirit vb. dayanımlı dolgular hariç tutulduğunda genellikle kil içeren süreksizlikler dolgusuz veya pürüzlü yüzeylere oranla daha düşük makaslama dayanımına sahiptirler ve bu sebeple kaya kütlesinin dayanımında ya da şev stabilitesinde menfi (olumsuz) yönde rol oynarlar. Eğer dolgu malzemesinin kalınlığı, süreksizlik yüzeyi dalgalılığı genişliğinden (genliğinden) büyükse, süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı dolgunun makaslama dayanımı tarafından denetlenir ve bu dolgu; farklı bir katman olarak değerlendirilerek mühendislik özellikleri incelenir. Süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülük ve dalgalılık Şekil 10.8.A ve Tablo 10.3'de verilmektedir.



Şekil 10.8.A) Süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülük ve dalgalılık (Ulusay, 2001).

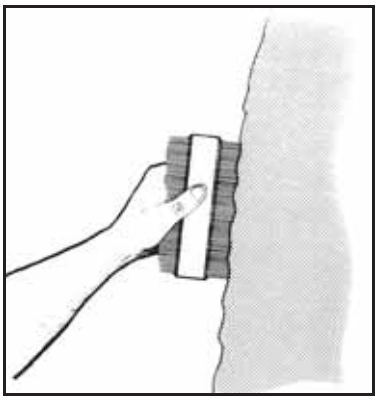
Tablo 10.3. Süreksizlik yüzeylerinde pürüzlülük ve dalgalılık (Ulusay, 2001).

Pürüzlülük		Dalgalılık	
Tanım	Sınıf	Tanım	Sınıf
Kaygan-Parlak	1	Düzlemsel	1
Düz	2	Az dalgalı (düz olmayan)	2
Pürüzlü	3	Dalgalı	3
Çıkıntılı	4	Kavisli	4
Basamaklı	5	Kıvrımlı	5

Pürüzlülük ve dalgalılık ölçümleri; pusula ve disk şeklindeki klinometreler ve mekanik ***profilometre** düzeneği ya da günümüzde temassız lazer profilometresi gibi optik metotlarla bilgisayarda ölçülebilmekte, erişilmesi güç süreksizlik yüzeylerinde ise fotoğrametri ve GPS tekniğinden yararlanılarak yapılmaktadır.

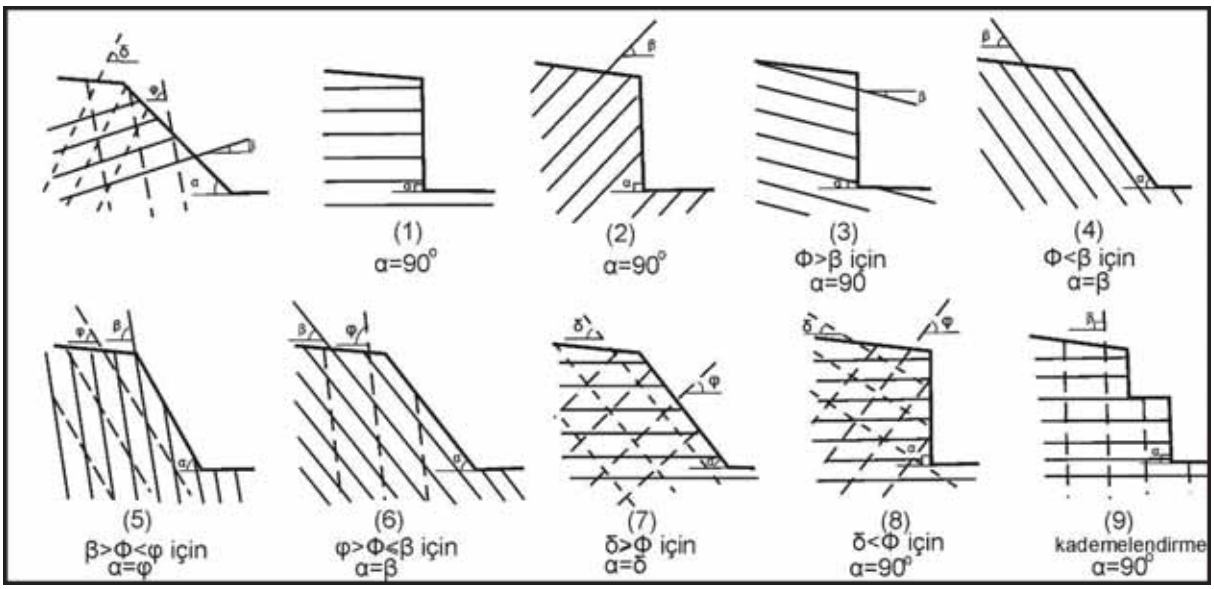
***[Profilometre**: Mikroskobik ya da daha ufak (submikroskobik) yüzey profilini (yüzey topoğrafyası) iki ya da üç boyutlu ölçen bir ölçüm cihazıdır**]**.

En basit ve pratik ölçüm ise "metal telli profilometre" ile yapılmaktadır (Şekil 10.8.B). Metal telli profilometre ahşap bir mengenenin arasına yerleştirilmiş 0,9 mm çapındaki tellerden oluşmaktadır. Gerek arazide, gerekse laboratuarda kullanılan bu mekanik gereç ile süreksizlik yüzeyinin üzerine elle bastırılarak, tellerin süreksizlik yüzeyinin şeklini alması sağlanır ve ahşap kısım üzerindeki vidalar sıkıştırılarak teller sabitlenir (Ulusay vd., 2002). Daha sonra süreksizlik yüzeyinin şekline göre dizilen tellerin konumundan ortaya çıkan profil, kalem ile bir kâğıda çizilerek ve gerekirse sayısallaştırılarak bilgisayar ortamında değerlendirilir.



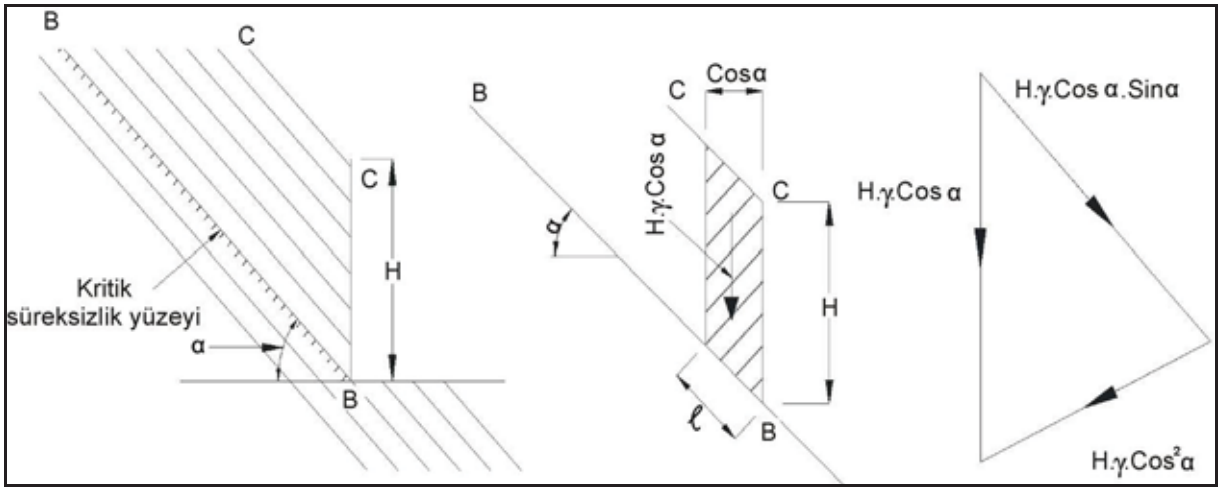
Şekil 10.8.B) Metal telli profilometre ile bir kaya mostrasında süreksizlik yüzeyi üzerindeki pürüzlülüğün pratik olarak ölçümü (*Milne* et al., 1992).

Kaya çatlaklarında (süreksizlikler), kohezyon ve boşluk suyu basıncının olmadığı durumlarda, kaya yamaçlarında oluşturulacak şevlerdeki stabilite; kayma mukavemeti parametrelerinden biri olan içsel sürtünme açısı (Φ) yanında, pürüzlülük ve dalgalılık derecesine bağlı olarak değişir. Pürüzlülük arttıkça içsel sürtünme açısı da artar. Kayalarda; içsel sürtünme ve tabaka-süreksizlik eğim derecelerine göre belirlenmesi gereken kritik şev açıları Şekil 10.9'da verilmiştir.



Şekil 10.9. Düzenli ve farklı yönlerde gelişmiş süreksizlik takımlarını içeren kayalarda, süreksizliklerin yön ve açılarına göre yamaçlarda oluşturulacak şevlere verilmesi gerekli eğimler. Kaya yamacında yer alan süreksizliklerde (çatlaklarda) kohezyon ve boşluk suyu basıncının olmadığı (c=0, u=0) durumlarda, farklı yönlerde gelişmiş sistematik süreksizliklerin eğim yönü ve açılarına göre ampirik olarak şevler için belirlenebilecek kritik şev açıları, [α=kritik şev eğim açısı; β=tabaka eğimi; φ ve δ=çatlak düzlemleri eğimi; Φ=içsel sürtünme açısı (*Terzaghi*'nin verilerine göre, Erguvanlı, 1994)].

Doğada, kayaların süreksizlik düzlemlerinin arası her zaman boş (c=0 ve u=0) olmayabilir. Eğer tabakalanma düzlemleri arası tamamen kırılmamış ya da boş olmayıp yani kohezyonu (c) olan bir malzeme ile doldurulmuşsa şev belirli bir H yüksekliğine kadar 90° eğimle düşey, daha sonra ise tabaka eğimine (α) paralel kazılabilir. Düşey olarak açılacak H yüksekliğinin hesabı için kalınlığı birim olan bir kaya bloğu göz önüne alınır (Şekil 10.10).



Şekil 10.10. Süreksizlikleri kohezyonlu malzeme ile dolmuş çatlaklı kayalara verilecek eğim (Terzaghi, 1962).

Kaya bloğunun ağırlığı $W = \underbrace{\gamma.H.1^m.\ell\cos\alpha}$

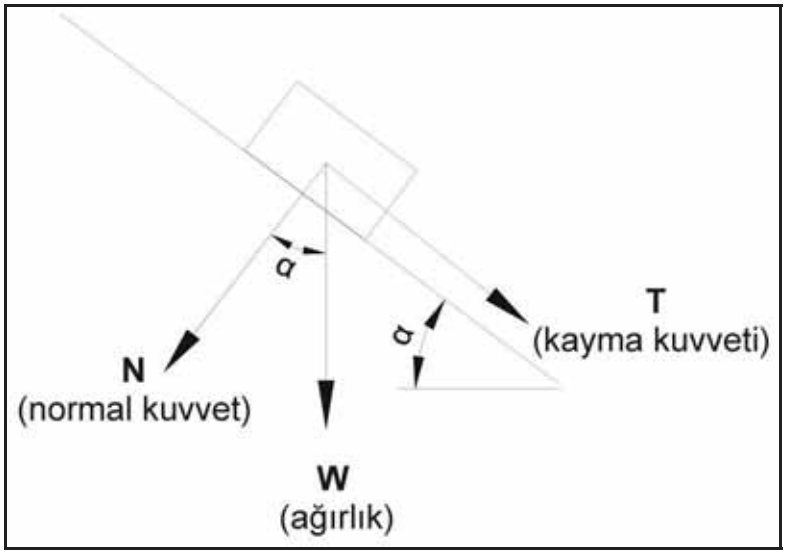
V (hacim)

Bu ağırlık kuvveti, biri süreksizlik yüzeyine paralel, diğeri buna dik iki bileşene ayrılırsa (Şekil 10.11), sırasıyla

$T = W.\sin\alpha$ (Süreksizlik yüzeyine paralel kuvvet)

$N = W.\cos\alpha$ (Süreksizlik yüzeyine dik kuvvet)

elde edilir.

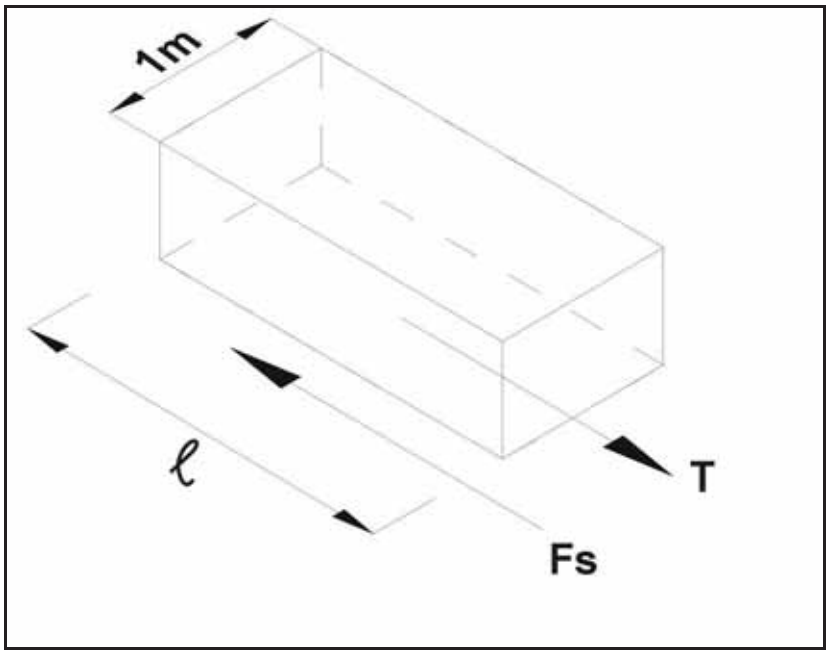


Şekil 10.11. Ağırlık kuvvetinin süreksizlik yüzeyine ve ona dik doğrultudaki bileşeni.

Şekil 10.11'deki N (normal) kuvvetinden dolayı süreksizlik yüzeyinde oluşan F_s (Sürtünme Kuvveti);

$F_s = N.tg\phi = N.\mu$ (μ: sürtünme katsayısı)

şeklinde hesaplanır. Blok üzerine etkiyen kuvvetlerin serbest çizim diyagramı Şekil 10.12'de görülmektedir.



Şekil 10.12. Kaya bloğunun serbest cisim diyagramı.

Bu kuvvetler, gerilme biçiminde gösterilirse;

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{T}{\ell.1} = \gamma.H.\cos\alpha.\sin\alpha \qquad (kg/m^2)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\ell.1} = \gamma.H.\cos^2\alpha. \qquad (kg/m^2)$$

Eğer süreksizlik yüzeyi üzerindeki bloğu, yüzeye dik yönde kaldıran boşluk suyu basıncı "u", kohezyon "c" ile gösterilirse, süreksizlik yüzeyi doğrultusundaki kuvvetlerin (gerilmelerin) dengesinden

$\tau_{kr} = c + (\sigma - u)tg\phi$ hesaplanabilir.

Burada τ_{kr}, kritik kayma gerilmesidir.

Eğer $\tau < \tau_{kr}$ olursa kayada süreksizlik yüzeyi boyunca kayma hareketi meydana gelmez.

$\tau > \tau_{kr}$ olması hâlinde kayma hareketi oluşur.

$\tau = \tau_{kr}$ hâli ise kritik sınır durumunu gösterir. Bu durumda kayma hareketi oluşmaması için $\tau \leq \tau_{kr}$ olmalıdır. Buna göre:

$\tau_{kr} \leq c + (\sigma - u)tg\phi$

$\gamma.H\cos\alpha.\sin\alpha \le c + (\gamma.H\cos^2\alpha - u)tg\phi$

buradan $H \le \dfrac{c - u.tg\alpha}{\gamma.\cos\alpha(\sin\alpha - \cos\alpha.tg\phi)}$

elde edilir.

Taban boşluk suyu basıncı $u = \gamma_{su}.H$ ifâdesi yerine konur ve düzenlenirse,

$$H \le \frac{c}{\gamma.\cos\alpha(\sin\alpha - \cos\alpha.tg\phi) + \gamma_{su}.tg\phi}$$

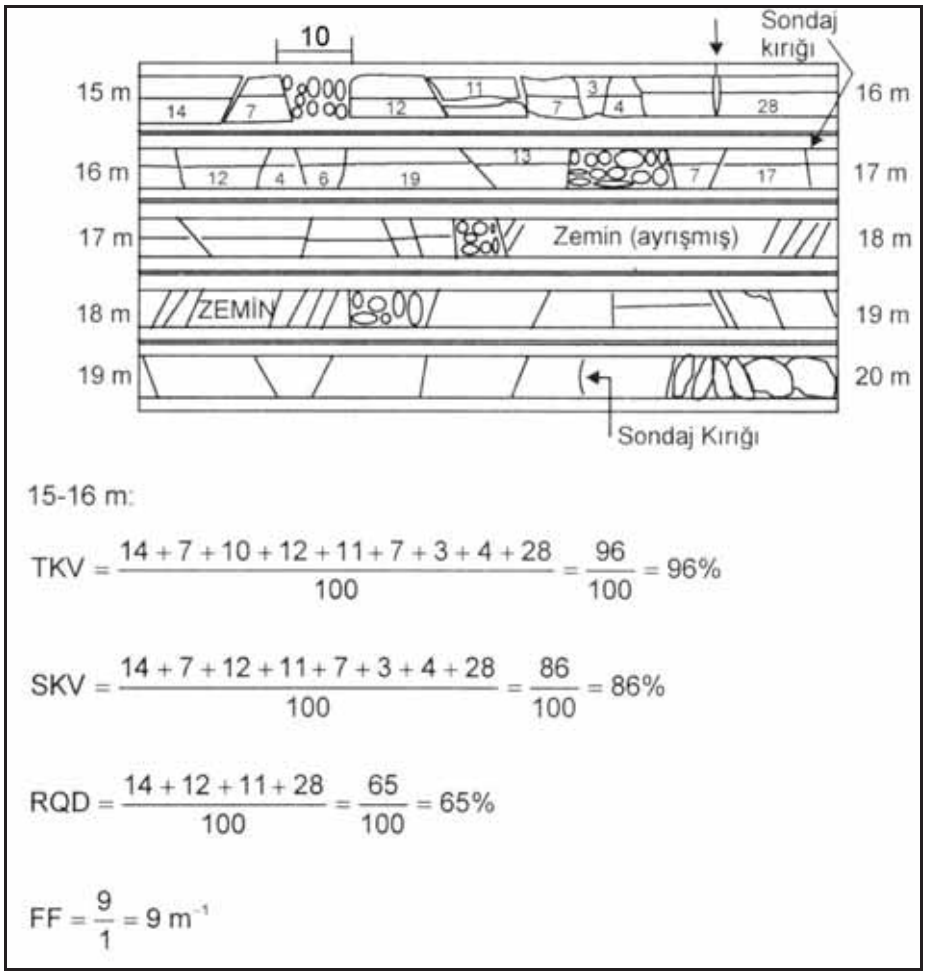
elde edilir.

Eğer u=0 olursa

$$H \le \frac{c}{\gamma.\cos\alpha(\sin\alpha - \cos\alpha.tg\phi)}$$

elde edilir.

10.10. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:



10.10.1. TCR, SCR, RQD ve FF'in Hesaplanması.

10.10.2. Kohezyonlu Kaya Süreksizliklerinde, Boşluk Suyu Basıncının Var Olup/Olmaması Durumunda Şev Stabilitesinin Hesaplanması (Uygulama).

Soru: Sedimenter bir kaya ortamında açılmak istenen yol şevinde, tabakalar şeve (yola) 33° eğimlidirler. Tabakalar arası düzlemlerin (süreksizlik) kohezyonu c=0,15 kg/cm^2 (1.500 kg/m^2), birim hacim ağırlığı γ_n =2,6 gr/cm^3 (2.600 kg/m^3), içsel sürtünme açısı ϕ= 22° olduğuna göre, şev hangi yüksekliğe kadar dik (düşey) kazılabilir?

a) Tabaka düzlemleri arasında su olmaması durumu (u= 0)

b) Tabaka düzlemleri arasında su olması durumu (u≠ 0)

Cevap:

a) u= 0 olması hâlinde,

$$H \le \frac{c}{\gamma.\cos\alpha(\sin\alpha - \cos\alpha.tg\phi)}$$

$$H \le \frac{1500}{2600.\cos 33(\sin 33 - \cos 33.tg 22)}$$

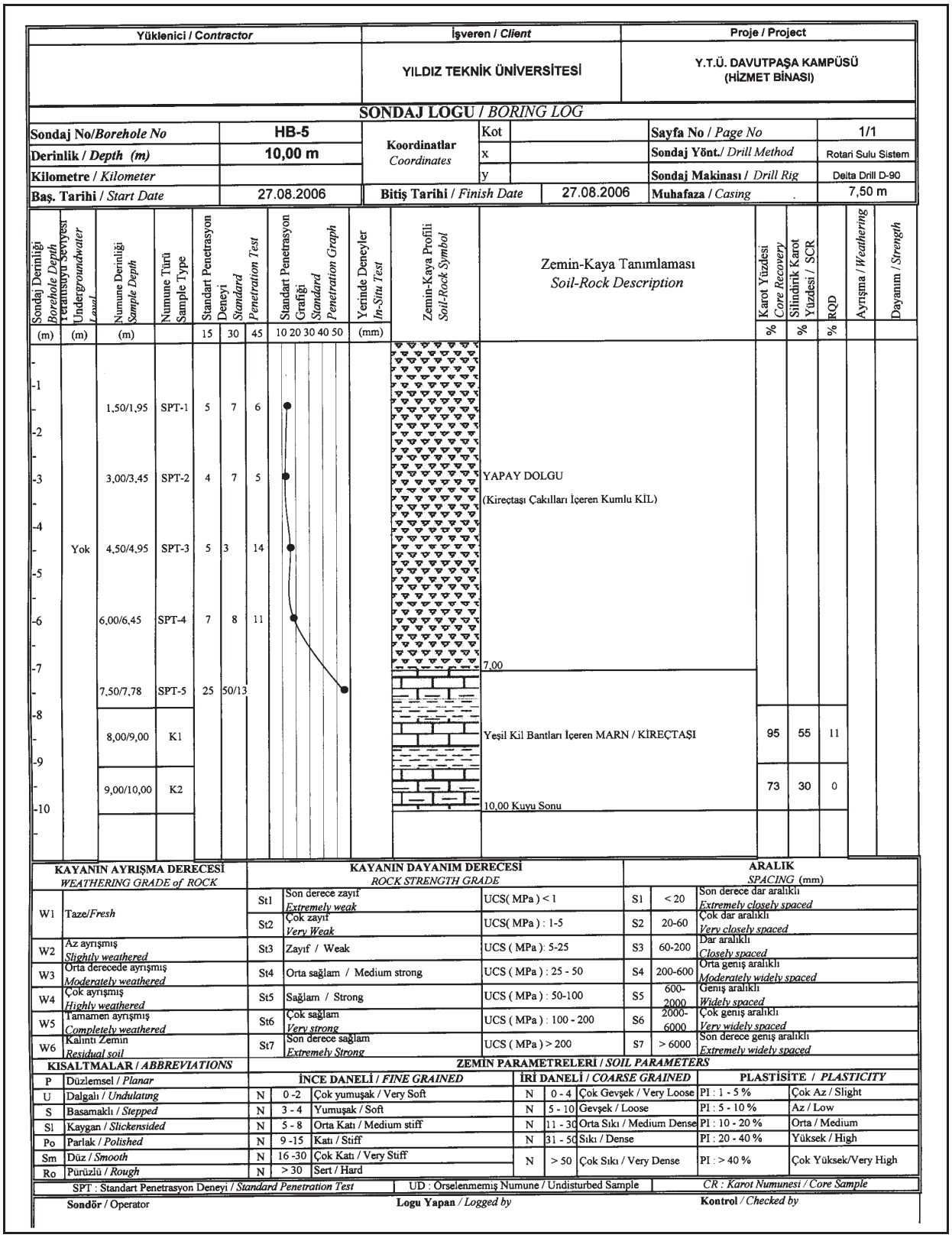
$H \le 3{,}342\ m$ olarak bulunur.

b) u≠0 olması hâlinde (γ_{su}=1.000 kg/m^3),

$$H \le \frac{c}{\gamma.\cos\alpha(\sin\alpha - \cos\alpha.tg\phi) + \gamma_{su}.tg\phi}$$

$$H \le \frac{1500}{2600.\cos 33(\sin 33 - \cos 33.tg 22) + 1000.tg 22}$$

$H \le 1{,}759\ m$ olarak bulunur.



Yüklenici / Contractor	İşveren / Client	Proje / Project
	YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	Y.T.Ü. DAVUTPAŞA KAMPÜSÜ (HİZMET BİNASI)

SONDAJ LOGU / *BORING LOG*

Sondaj No/*Borehole No*	HB-5	**Koordinatlar** *Coordinates*	Kot	**Sayfa No** / *Page No*	1/1
Derinlik / *Depth (m)*	10,00 m		x	**Sondaj Yönt.**/ *Drill Method*	Rotari Sulu Sistem
Kilometre / *Kilometer*			y	**Sondaj Makinası** / *Drill Rig*	Delta Drill D-90
Baş. Tarihi / *Start Date*	27.08.2006	**Bitiş Tarihi** / *Finish Date*	27.08.2006	**Muhafaza** / *Casing*	7,50 m

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m)	Yeraltısuyu Seviyesi *Underground water Level* (m)	Numune Derinliği *Sample Depth* (m)	Numune Türü *Sample Type*	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Yerinde Deneyler *In-Situ Test* (mm)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil-Rock Description*	Karot Yüzdesi *Core Recovery* %	Silindirik Karot Yüzdesi / SCR %	RQD %	Ayrışma / *Weathering*	Dayanım / *Strength*
-1		1,50/1,95	SPT-1	5	7	6									
-2															
-3		3,00/3,45	SPT-2	4	7	5				YAPAY DOLGU					
-4										(Kireçtaşı Çakılları İçeren Kumlu KİL)					
-5	Yok	4,50/4,95	SPT-3	5	3	14									
-6		6,00/6,45	SPT-4	7	8	11									
-7										7,00					
-8		7,50/7,78	SPT-5	25	50/13					Yeşil Kil Bantları İçeren MARN / KİREÇTAŞI	95	55	11		
-9		8,00/9,00	K1								73	30	0		
-10		9,00/10,00	K2							10,00 Kuyu Sonu					

KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ *WEATHERING GRADE of ROCK*		KAYANIN DAYANIM DERECESİ *ROCK STRENGTH GRADE*			ARALIK *SPACING* (mm)		
W1	Taze/*Fresh*	St1	Son derece zayıf *Extremely weak*	UCS(MPa) < 1	S1	< 20	Son derece dar aralıklı *Extremely closely spaced*
		St2	Çok zayıf *Very Weak*	UCS(MPa) : 1-5	S2	20-60	Çok dar aralıklı *Very closely spaced*
W2	Az ayrışmış *Slightly weathered*	St3	Zayıf / Weak	UCS (MPa): 5-25	S3	60-200	Dar aralıklı *Closely spaced*
W3	Orta derecede ayrışmış *Moderately weathered*	St4	Orta sağlam / Medium strong	UCS (MPa) : 25 - 50	S4	200-600	Orta geniş aralıklı *Moderately widely spaced*
W4	Çok ayrışmış *Highly weathered*	St5	Sağlam / Strong	UCS (MPa) : 50-100	S5	600-2000	Geniş aralıklı *Widely spaced*
W5	Tamamen ayrışmış *Completely weathered*	St6	Çok sağlam *Very strong*	UCS (MPa) : 100 - 200	S6	2000-6000	Çok geniş aralıklı *Very widely spaced*
W6	Kalıntı Zemin *Residual soil*	St7	Son derece sağlam *Extremely Strong*	UCS (MPa) > 200	S7	> 6000	Son derece geniş aralıklı *Extremely widely spaced*

KISALTMALAR / *ABBREVIATIONS*		ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*							
		İNCE DANELİ / *FINE GRAINED*			İRİ DANELİ / *COARSE GRAINED*			PLASTİSİTE / *PLASTICITY*	
P	Düzlemsel / *Planar*	N	0 -2	Çok yumuşak / Very Soft	N	0 - 4	Çok Gevşek / Very Loose	PI : 1 - 5 %	Çok Az / Slight
U	Dalgalı / *Undulating*	N	3 - 4	Yumuşak / Soft	N	5 - 10	Gevşek / Loose	PI : 5 - 10 %	Az / Low
S	Basamaklı / *Stepped*	N	5 - 8	Orta Katı / Medium stiff	N	11 - 30	Orta Sıkı / Medium Dense	PI : 10 - 20 %	Orta / Medium
Sl	Kaygan / *Slickensided*	N	9 -15	Katı / Stiff	N	31 - 50	Sıkı / Dense	PI : 20 - 40 %	Yüksek / High
Po	Parlak / *Polished*	N	16 -30	Çok Katı / Very Stiff	N	> 50	Çok Sıkı / Very Dense	PI : > 40 %	Çok Yüksek/Very High
Sm	Düz / *Smooth*	N	> 30	Sert / Hard					
Ro	Pürüzlü / *Rough*								

SPT : Standart Penetrasyon Deneyi / *Standard Penetration Test* | UD : Örselenmemiş Numune / Undisturbed Sample | *CR : Karot Numunesi / Core Sample*

Sondör / Operator | **Logu Yapan** / *Logged by* | **Kontrol** / *Checked by*

10.10.3. Zemin Etüt Sondajında, Yapay Dolgu ve Altında Ana Zemini (zemin+kaya ardalanmalı istif) Kesen Sondaj Logu Örneği.

FİRMA ADI

İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
Fen İşleri Daire Başkanlığı
Altyapı Hizmetleri Müdürlüğü

TEMEL SONDAJ LOGU

SONDAJ *Borehol* No	Z - 1
SAYFA *Page* No	1/5

PROJE ADI / *Project Name* : SARIYER-ÇAYIRBAŞI KARAYOLU TÜNEL İNŞAATI	DELİK ÇAPI/*Hole Diameter* : 90 mm
	YER ALTI SUYU/*Groundwater* : 1.77 m
YERİ-KİLOMETRE/Location - :	MUH. BOR. DER. / *Casing Depth* : 36
SONDAJ DER./*Boring Depth* :40m	BAŞ.BİT.TAR./ *Start Finish Date* :04/02/2008-08/02/2008
SONDAJ KOTU/*Elevation* :6.87	KOORDİNAT / *Coordinate* (N-S) y :4558589.9
SONDAJ MAK.&YÖNT./D.Rig& :Rotari Klasik	KOORDİNAT / *Coordinate* (E-W) x : 418279.1

SONDAJ DERİNLİĞİ	NUMUNE CİNSİ	MANEVRA BOYU *Run*	STANDART PENETRASYON DENEYİ *Standart Penetration Test* — DARBE SAYISI *Numb. Of Blows* 0 - 15	15 - 30	30 - 45	N	GRAFİK *Graph* 10 20 30 40 50 60	JEOTEKNİK TANIMLAMA *Geotechnical Description*	PROFİL *Profile*	DAYANIMLILIK/*Strength*	AYRIŞMA/*Weathering*	KIRIK/*Fracture (30 cm)*	KAROT%(TCR)/*TCoreR*	KAROT%(SCR)/*TCoreR*	RQD %
1								**Bitkisel TOPRAK** 0.25 m.							
2	SPT	1.50 / 1.95	1	2	3	**5**		Sarı - kahve renkli, orta katı **KIL.** 2.50 m.							
3	SPT	3.00 / 3.45	2	2	3	**5**		Sarı - kahve renkli, ince kum seviyeleri ara katkılı **Siltli KIL.** 4.25 m.							
4															
5	SPT	4.50 / 4.95	2	2	3	**5**		Yeşilimsi koyu gri renkli, orta katı **Siltli KIL.** qu = 0.75 kg/cm²							
6															

DAYANIMLILIK / *Strength*			AYRIŞMA / *Weathering*			İNCE DANELİ / *Fine Grained*			İRİ DANELİ/*Coarse Grained*		
I	DAYANIMLI	*Strong*	I	TAZE	*Fresh*	N 0-2	ÇOK YUMUŞAK	*V.Soft*	N 0-4	ÇOK GEVŞEK	*V.Loose*
II	ORTA DAYANI	*M. Starong*	II	AZ AYRIŞMIŞ	*Slightly W*	N 3-4	YUMUŞAK	*Soft*	N 5-10	GEVŞEK	*Loose*
III	ORTA ZAYIF	*M.Weak*	III	ORTA D. AYR	*Mod. Weath*	N 5-8	ORTA KATI	*M.Stiff*	N 11-30	ORTA SIKI	*M Dense*
IV	ZAYIF	*Weak*	IV	ÇOK AYR.	*Slightly W*	N 9-15	KATI	*Stiff*	N 31-50	SIKI	*Dense*
V	ÇOK ZAYIF	*V.Veak*	V	TÜMÜYLE AYR.	*Comp. W.*	N 16-30	ÇOK KATI	*V.Stiff*	N >50	ÇOK SIKI	*V Dense*
						N >30	SERT	*Hard*			

KAYA KALİTE TANIMI - *RQD*			KIRIKLAR-30 cm / *Fractures*			ORANLAR / *Proportions*					
% 0-25	ÇOK ZAYIF	*V.Poor*	1	SEYREK	*Wide(W)*	% 5-10	PEK AZ	*Slightly*	% 5	PEK AZ	*Slightly*
% 25-5	ZAYIF	*Poor*	1-2	ORTA	*Moderate(M*	% 5-15	AZ	*Little*	% 5-20	AZ	*Little*
% 50-7	ORTA	*Fair*	2-10	SIK	*Close(CL)*	% 15-35	ÇOK	*Very*	% 20-50	ÇOK	*Very*
% 75-9	İYİ	*Good*	10-20	ÇOK SIK	*Intense(I)*	% 35	VE	*And*			
% 90-1	ÇOK İYİ	*Excellent*	>20	PARÇALI	*Crushed (Cr*						

SPT	Standart Penetrasyon Deneyi *Standart Penetration Test*	K	Karot Numunesi *Core Sample*	LOGU YAPAN *Logged By*	KONTROL *Checked*
D	Örselenmiş Numune *Disturbed Sample*	P	Pressiyometre Deneyi *Pressuremeter Test*		
UD	Örselenmemiş Numune *Undisturbed Sample*	VS	Veyn Deneyi *Vane Shear Test*	İMZA *Sign*	

10.10.4. Zemin Etüt Sondajında, Bitkisel Toprak ve Alüvyal Zemini Kesen Sondaj Logu Örneği.

YÜKLENİCİ FİRMA:	**Sondaj Logu**	SONDAJ KUYU NO:	
		SONDAJ TİPİ:	ROTARY SULU SİSTEM
		SONDÖRÜ:	
İŞVEREN İDARE:			
PROJENİN ADI:			
SONDAJ KUYUSUNUN YERİ:	YILIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ DAVUTPAŞA KAMPÜSÜ		
İLÇESİ:	ESENLER	SONDAJ BAŞLAMA TARİHİ:	11.01.07
YER ALTI SUYU:	.....	SONDAJ BİTİŞ TARİHİ:	13.01.07
SONDAJ KOTU (Zemin üst):	56,00	KOORDİNAT (y) (N-S):	4543965,11
SONDAJ TOPLAM DERİNLİĞİ:	30	KOORDİNAT (x) (E-W):	407239,45
KAÇ SAHİFE / BU KAÇINCI SAHİFE:	2 / 1	SONDAJ ÇAPI (mm):	76

DERİNLİK (M)	h= Deney Derinliği	NUMUNE TİPİ	STANDARD PENETRASYON DENEYİ (SPT) DARBE SAYISI 0-15	15-30	30-45	N_{30}	GRAFİK 10 20 30 40 50	AYRIŞMA	DAYANIMLILIK	TCR % si	SCR % si	RQD %	Litoloji	JEOTEKNİK TANIMLAMA	FORMASYON	Y S S
0 ↓																
0,50														YAPAY DOLGU: BETON-KİREMİT PARÇALARI, KİREÇTAŞI ÇAKILLARI		
1,00																
1,50														1,50 m		
2,00	1,50 1,59	SPT1	50/9			>50								KİREÇTAŞI; KİRLİ BEYAZ RENKLİ, SIK SÜREKSİZLİKLİ, SÜREKSİZLİK ARALARI KİL DOLGULU, MAKTRA FOSİLLİ, Y6ER YER KALSİT KRİTALLİ, YER YER MANGANLI	BAKIRKÖY	
2,50								II-III	III-IV	40	16	16				
3,00																
3,50	3,00 3,03	SPT2	50/3			>50										
4,00								II	IV	30	14					
4,50																
5,00																
5,50								II-III	IV	37	24	8				
6,00																
6,50																
7,00								II--III	III	14	3					
7,50																
8,00																
8,50								II--III	III	16	8					
9,00																
9,50																
10,00								II	IV	68	54	30				
10,50																
11,00																
11,50								II--III	III	22	7					
12,00																
12,50																
13,00								II--III	III	12	4			13,00 m		
13,50																
14,00	13,50 13,95	SPT9	7	8	12	20								KİL; GRİMSİ YEŞİL , AÇIK YEŞİL RENKLİ, KUMLU, YER YER BOL KUMLUKUMLU KISIMLAR MUSKOVİTLİ	AVCILAR	
14,50																
15,00																

	YÜKLENİCİ ADINA	İDARE ADINA
	SONDAJDAN SORUMLU MÜHENDİS / MÜHENDİSLER	SONDAJI KONTROL EDEN MÜHENDİS / MÜHENDİSLER
	TARİH: 13.01.2007	TARİH: 13.01.2007
	AD-SOYAD / İMZA	AD- SOYAD / İMZA

SPT= Standard Penetrasyon Deneyi.
D= Örselenmiş Numune
U D= Örselenmemiş Numune
TCR = Toplam Karot % si

K= Karot Numunesi
SCR= Çapını Koruyan Karot % si

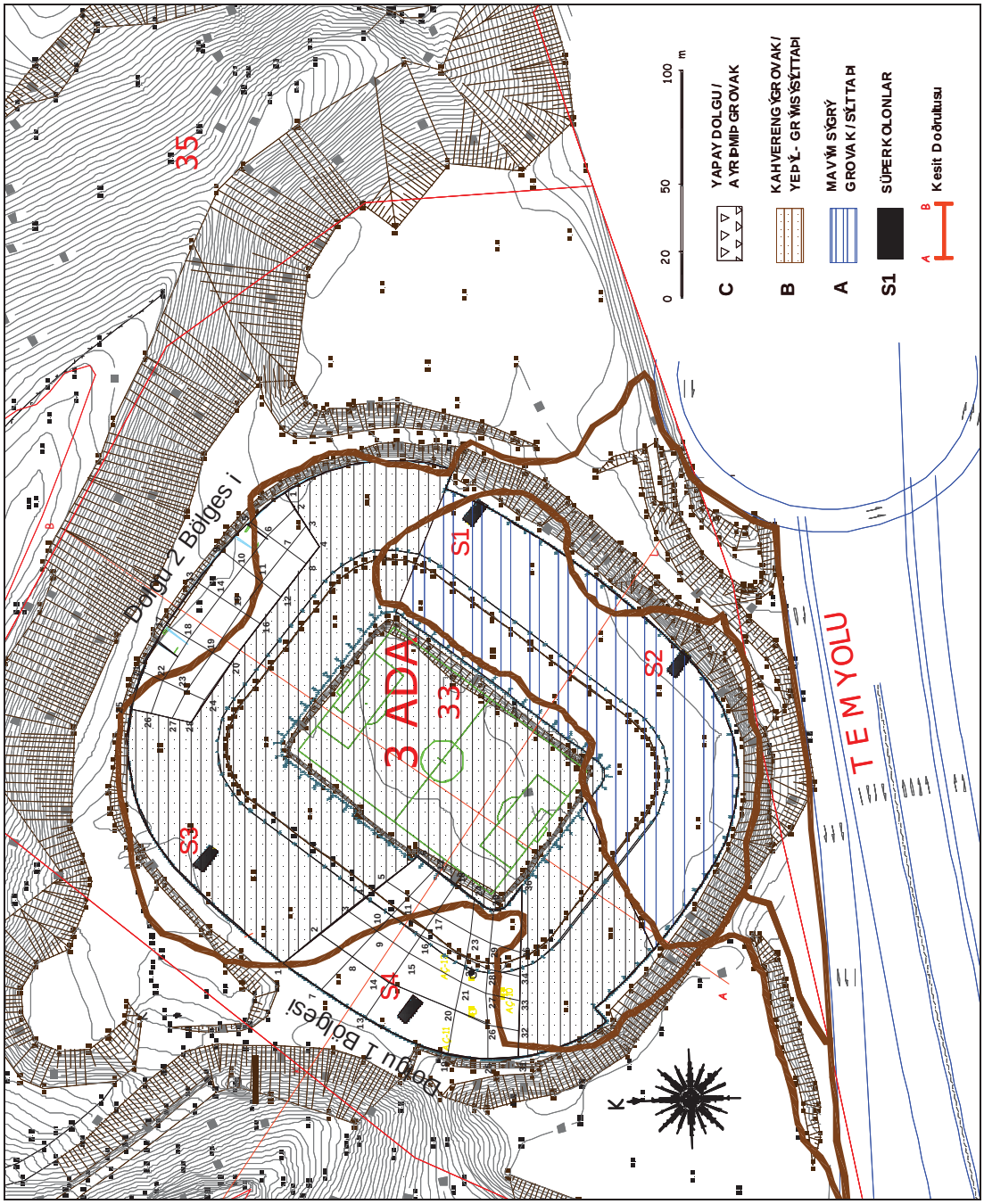
10.10.5. Zemin Etüt Sondajında, Yapay Dolgu-Ana Kaya-Zemini Kesen Sondaj Logu Örneği ve Formasyon Adlaması (Yıldırım, vd., 2010).

10.10.6. Sondaj, Ayrışma ve Süreksizliklerin Değerlendirilmesi ve Yorumlanmasında "Türk Telekom Arena Stadyumu" Örneği:

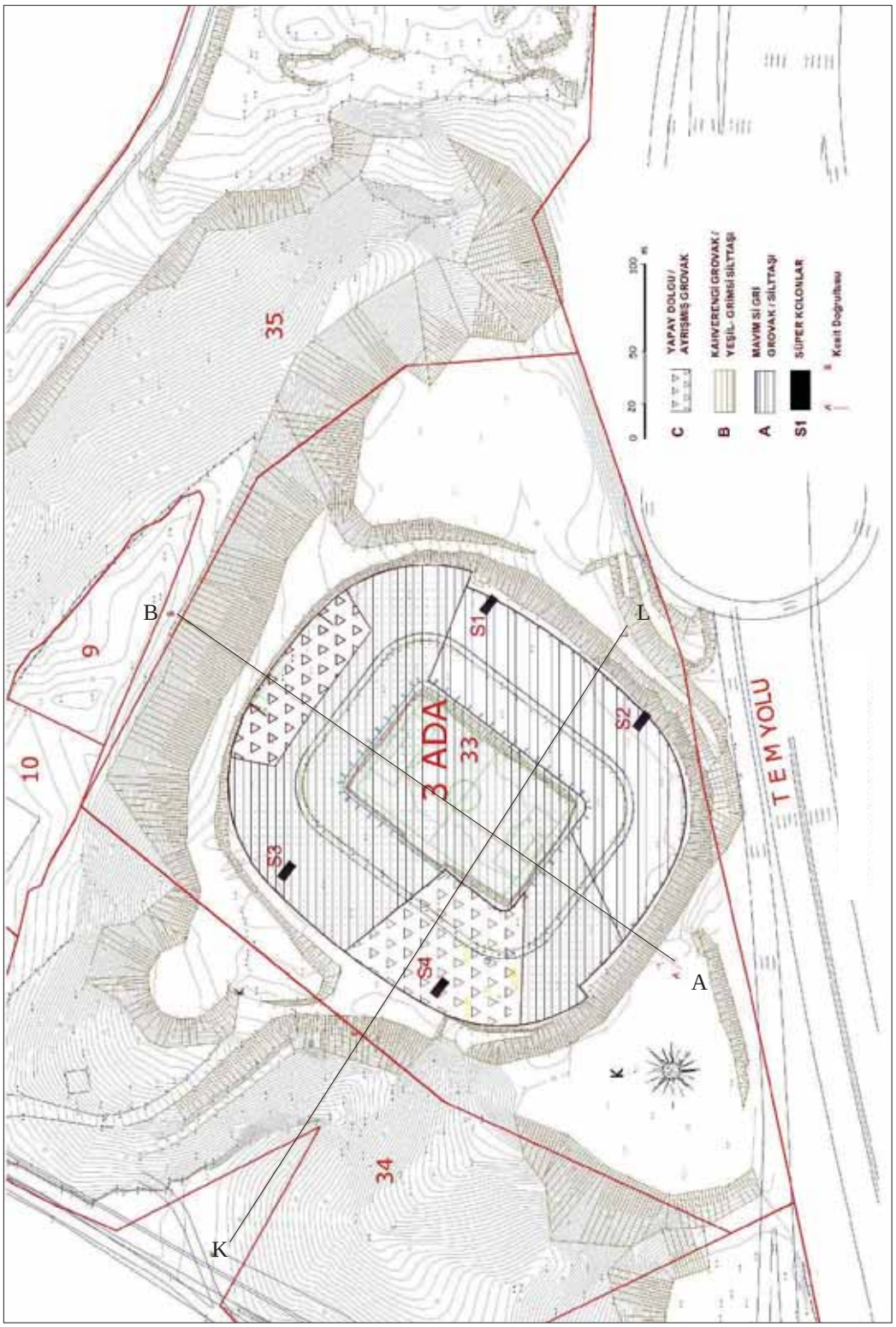
İstanbul İli, Şişli İlçesi, Ayazağa Mahallesi, Seyrantepe Mevkii'de yer alan ve Toplu Konut İdaresi Başkanlığınca (TOKİ) yaptırılan 52.650 kişi kapasiteli "Türk Telekom Arena Stadyumu" 13 Aralık 2007 yılında temeli atılmış ve 15 Ocak 2011 tarihinde açılışı yapılmıştır. Daha önce Seyrantepe Stadyumu olarak adlandırılan "Türk Telekom Arena Stadyumu" alanında, 2004, 2006, 2007 ve Mart 2008 tarihleri arasında resmî makamlarca onaylanmış 4 adet imar plânına esas jeolojik-geoteknik etüt raporu hazırlanmıştır. Bu raporlarda arazide, jeolojik, jeofizik, mühendislik jeolojisi çalışmaları ve haritaları, sismik ve zemin etüt sondajları, presiyometre deneyleri ile laboratuarda kayaların mekanik özellikleri, kayaların kütle sınıflamaları, geoteknik mühendislik parametrelerini içeren mühendislik analizleri, değerlendirmeler, sonuç ve öneriler ile birlikte kapsamlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan değerlendirmelerde kuzeye eğimli bir yamaçta yer alan stadyumun temellerinin oturacağı alanda dolgu, zemin, geçiş kayacı ve sağlam kaya niteliklerinin daha detaylı belirlenmesi ve mühendislik çalışmalarında karşılaşılan büyük problemlerden biri olan "Jeolojik Model"in tam anlamıyla ortaya konması amacıyla, daha önce yapılan çalışmalara ilâveten stadyum ve çevresinde oluşan ve devam eden jeolojik sorunların çözümü için, kitabın birinci yazarı tarafından Mayıs/Haziran 2008'de stadyum ve yakın çevresinde gerekli jeolojik ve mühendislik jeolojisi çalışmaları, harita ve kesitleri yapılmış; kontrolsuz yapay dolgu, ayrık, az ayrık ve sağlam kaya yerleri, sınırları, ayrışma derinlikleri, ezik zonlar, süreksizlikler ve mühendislik özellikleri ayrıntılı olarak belirlenmiştir. Temel altı zeminini belirlemek için en uygun yerlerde yaptırılan ilâve sondaj ve araştırma çukurları ile farklı değerlendirmeler ve yorumlara açıklık getirilmiş, gerek fore kazık çalışmaları başlatılmadan yapılacak kontrol amaçlı sondaj ve araştırma çukurları değerlendirmeleri ile öngörülen jeolojik model denetlenmiş, gerekse oluşturulan geoteknik çözümler somut yer altı verileri değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, yapı temellerinin kısmen radye temel *(raft foundation)*, kısmen kazıklı radye temel olarak tasarlanması gerektiğine karar verilmiştir. Bu çalışmalar sırasında; meselâ süper kolon olarak adlandırılan 4 adet ana taşıyıcı kolonun bir tanesinin (S4 No'lu süper kolon), önceki çalışmalarda öngörüldüğü üzere ana kaya üzerinde değil, ana kaya görünümüyle yanıltıcı değerlendirmelere neden olan iri grovak çakıl ve bloklarından oluşan kontrolsuz yapay dolgu içinde; S3 No'lu süper kolonun ise dayanımı düşük, az ayrık kahverengi grovak içinde kaldığı görülmüş ve her iki süper kolonun kazıklı radye temel olarak tasarlanması, kazıkların daha derinde yer alan mavi grovak, silttaşı olarak adlandırılan, az çatlaklı, som, orta sağlam, ayrışmamış ana kayaya oturtulması tavsiye edilmiş ve uygulanmıştır. Orta sağlam/sağlam kayaya oturacak diğer iki süper kolon için ise (S1 ve S2), yüzeysel temel (sığ temel, *shallow foundation*) kullanımının, izin verilebilir gerilmelerin aşılmaması koşulu ile mümkün olabileceği belirtilmiş, ancak bu duruma üst yapı ile birlikte modellemenin yapıldığı analizler sonucunda karar verilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

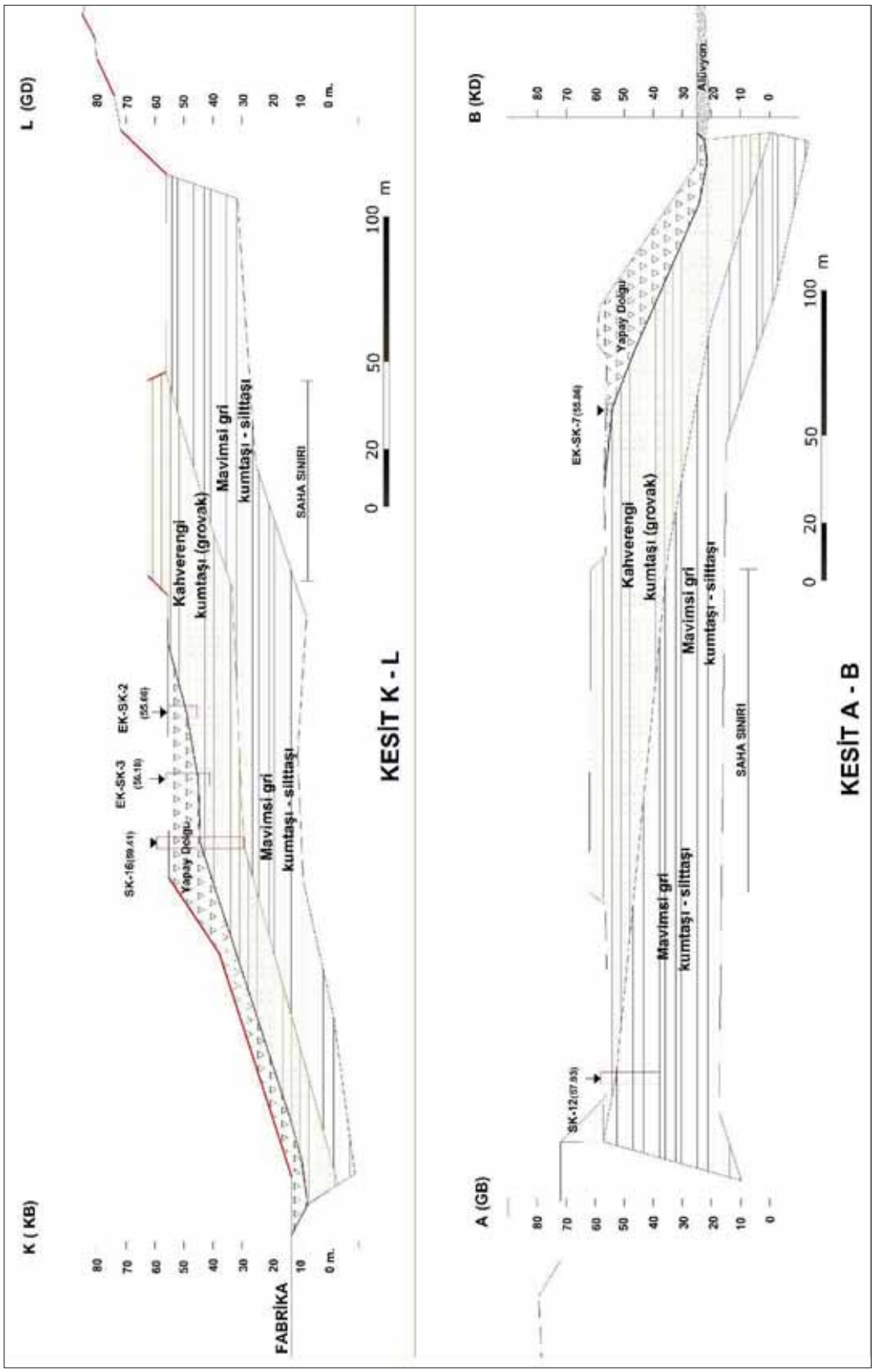
Bu çalışmalar ve tavsiyeler doğrultusunda Haziran - Temmuz 2008 tarihleri arasında YTÜ Geoteknik Anabilim Dalı tarafından hazırlanan raporun uygulanmaya başlanmasıyla 52.650 kişi kapasiteli stadyumun zemin ile ilgili olan emniyeti tamamen sağlanmıştır. Aşağıda, Şekil 10.10.6.A ilâ Şekil R arasında yer alan harita, kesit ve fotoğraflarda Türk Telekom Arena Stadyumunda yapılan çalışmalar görülmektedir.



10.10.6.A) Türk Telekom (TT) Arena Stadyumu Mühendislik Jeolojisi Haritası. Yapay dolgu sınırları ve kalınlıkları gözetilerek karelaj yapılan yerler ile orta ayrışmış grovak silttaşları üzerinde yer alacak S3 süper kolonu ve kontrolsuz yapay dolgu üzerine rastlayan S4 süper kolon yerlerini oluşturan kesimlerde, radye temeller sağlam ana kayaya kadar ulaşan ve kayaya soketlenmiş fore kazıklar üzerine oturtulmuştur. Kahverengi kalın çizgiler; yapay dolgu-ana kaya sınırlarını (dokanak) göstermektedir (Yıldırım, Mayıs/Haziran 2008).



10.10.6.B) TT Arena Stadyumu ana taşıyıcı süper kolon yerleri (S1, S2, S3 ve S4) ve zemin kesit doğrultuları A-B ve K-L
(Yıldırım, Mayıs/Haziran 2008).



10.10.6.C) TT Arena Stadyumu zemin kesitleri (Yıldırım, Mayıs/Haziran 2008).



10.10.6.D) TT Arena Stadyumu geoteknik etüt çalışmaları (29.05.2008).



10.10.6.E) Sağlam mavi grovak ve silttaşları üzerinde yer alan **S1** ve **S2** süper kolon temel yerleri (29.05.2008).



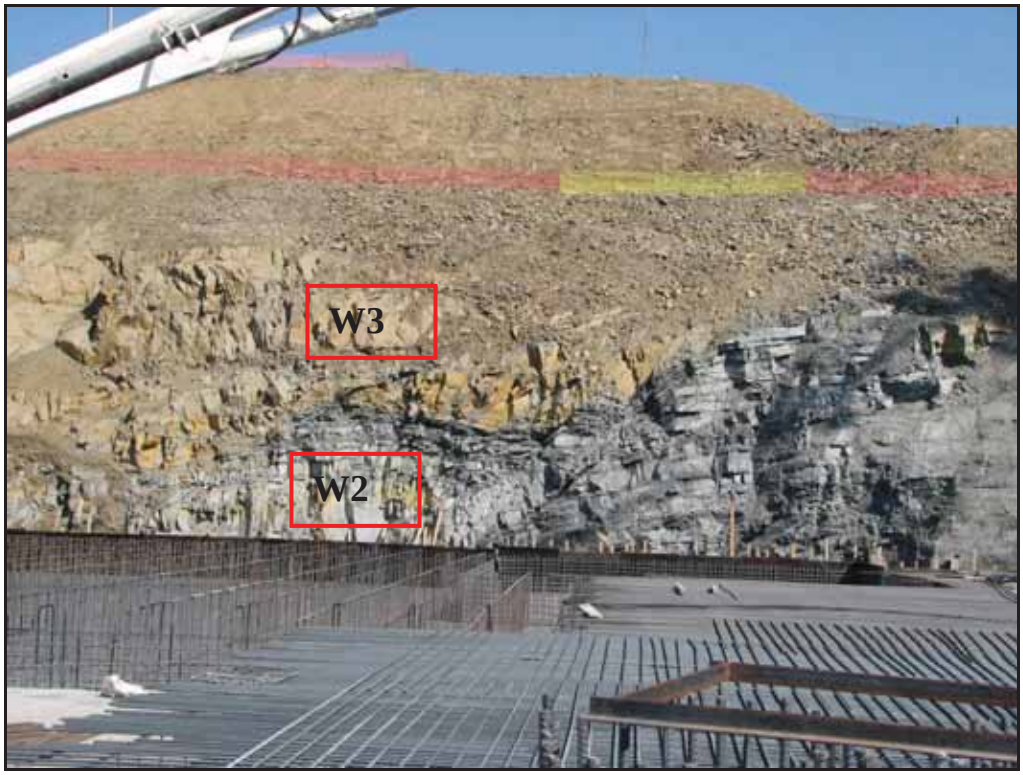
10.10.6.F) TT Arena Stadyum sahası. Ortada görülen henüz kazılmamış kahverengi grovaklar ve üzerinde yer alan sunî tepecik; futbol sahası için ayrılan alan olup bu kesim geçici olarak hafriyat deposu olarak kullanılmıştır (29.05.2008).



10.10.6.G) TT Arena Stadyumu temeli. Mavi grovaklar üzerinde yer alan **S2** süper kolon yeri ve temel taban kotunda (kot: +56 m) yapılan radye temel çalışmaları (04.06.2008).



10.10.6.H) TT Arena Stadyumu inşaat çalışmaları (27.06.2008).



10.10.6.İ) Mavi grovak-silttaşı üzerinde yer alan radye temel *(raft foundation)* ve kayada ayrışma ile oluşan renk farklılıkları. Mavi renkli orta sağlam/sağlam, az ayrışmış (W2) grovaklar üst kesime doğru orta ayrışmış (W3) kahverengi grovak ve silttaşlarına geçmekte (04.06.2008).



10.10.6.J) 1 No'lu süper kolon (S1) yeri. Kolon, az ayrışmış mavi grovak ve silttaşları üzerinde yer almakta (04.06.2008).



10.10.6.K) Yapay dolgu. 4 No'lu süper kolonun (S4) oturacağı kesimde, temel taban kotundan (+56 m kotu) itibaren açtırılan araştırma çukurunda görülen çakıl ve bloklardan oluşan kontrolsuz yapay grovak dolgu (04.06.2008).



10.10.6.L) Stadyum kuzey sınırında yer alan şevin, kontrolsuz yapay dolguyu oluşturan kesimlerinde görülen yersel kaymalar (10.06.2008).



10.10.6.M) Fore kazıklar. Stadyum kuzey sınırında yer alan şevde, S3 süper kolon ve çevresinde yapay dolgudan oluşan alan tavsiye edilen ve ana kayaya soketlenen fore kazık çalışmaları (30.06.2008).



10.10.6.N) Süper kolon yeri. Havuzumsu dikdörtgen boşluk, S1 süper kolon temel yeridir (07.07.2008).



10.10.6.O) Stadyum içi inşaat çalışmaları.
YTÜ, Yapı ve Gelişim Kulübü (Beyaz Baretliler) Teknik Gezisi (28.02.2009).



10.10.6.P) 2 No'lu (S2) süper kolon imâlat çalışmaları.
YTÜ, Yapı ve Gelişim Kulübü (Beyaz Baretliler) Teknik Gezisi (28.02.2009).



10.10.6.R) Türk Telekom Arena Stadyumu (08.06.2011).

10.10.7. YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark Alanı Geoteknik Etüt Örneğinde, Kontrolsuz Yapay Dolgu Zeminlerin İyileştirilmesine Yönelik "Taş Kolon" Uygulaması ve "Tac Mahal" Örneği:

Ekonomik, sosyal ve politik alandaki gelişmelerin sağlanabilmesi teknolojik gelişmelerle mümkündür. Teknolojik gelişmenin temelinde ise bilim ve teknoloji alanında yapılan buluşların ve sağlanan gelişmelerin uygulanabilir olması yatmaktadır. Bilimsel bilginin üretildiği yerler olan üniversitelerde temel araştırmalar yanında uygulamalı araştırma geliştirme çalışmaları da yapılması büyük önem taşımaktadır. Üniversite-sanayi ilişkilerinin somut işbirliğine dönüşmesini sağlayacak bir köprü olan Teknopark Projesi aracılığı ile akademisyenler ve öğrencilerin sektörlere dâhil olması, üniversite-sanayi işbirliği kavramına yeni bir boyut kazandırmaktadır (Özaydın, 2012). Bu amaçla, Yıldız Teknik Üniversitesi'nin yaklaşık, 1,3 km^2 lik bir alanda kurulu Davutpaşa Kampüsünde, üniversite-sanayi işbirliği içinde mevcut kaynakların daha verimli kullanılması veya yeni kaynaklar yaratılması amacıyla günümüz teknolojisine ışık tutan ve en önemli yol gösterici olan araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri için, 104 dönümlük bir "Teknopark" alanı tesis edilmiştir (10.10.7). "Ar-Ge" birimleri; bilgisayar yazılımları geliştirme (yazılımpark), inovasyon (=yenileşim), endüstriyel robot-otomasyon geliştirme (robopark), bio-teknoloji geliştirme (biopark) olarak tanımlanmıştır. YTÜ'nün gelişecek eğitim programı içinde hedef alınan Ar-Ge konuları ise temiz enerji (hidrojen, güneş, rüzgâr, dalga vb.); yeşil tasarım/uygulama (çevre ile uyumlu projeler, yeni yapı malzemeleri, çağdaş ahşap yapılar vb.); Türkiye'nin stratejik madenleri (bor, toryum, krom vb.); nano teknoloji uygulamaları gibi temalar da proje kapsamına katılabilecek potansiyeller olarak hedeflenmiştir.



10.10.7. YTÜ Davutpaşa Kışlası, Teknopark alanı (2009).

10.10.7.1) Arazi Çalışmaları: YTÜ Davutpaşa Kampüsü'nün güneybatı köşesinde, zemin yüzü kotları +66 m ilâ +79 m kotları arasında değişen yatay bir topoğrafyada yer alan Teknopark alanına inşa edilecek yapılar için YTÜ, İnşaat Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerince inceleme alanının zemin durumu hakkında genel bir değerlendirilme yapılabilmesi amacı ile zemin etüt çalışmaları yapılmıştır. Davutpaşa Kampüsünde daha önce İBB tarafından 2007 yılında yaptırılan 4 adet zemin etüt sondaj verileri de dikkate alınarak, Mart 2008'de bina temellerinin oturacağı yerlerde ve yakın çevresinde jeolojik, jeofizik çalışma ve ölçümler yanında, derinlikleri 8,5 m ilâ 20 m arasında değişen 18 adet zemin etüt sondajı yaptırılmıştır.

Teknopark alanı içerisinde 4 serim mikrotremörlü sismik kırılma *(MASW-refraction)* ölçümü yapılmış ve kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Sondaj bulguları ile de uyumlu çıkan sonuçlara göre, zemin yüzünden 3 m ilâ 9,5 m arası derinliklere kadar kayma dalgası hızı (V_s) < 200 m/s olan bir zayıf tabaka (dolgu) yer aldığı, onun altında kayma dalgası hızı 268 m/s ile 388 m/s olan bir tabaka bulunduğu, en alt tabakada ise 445 m/s ilâ 582 m/s kayma dalgası hızına sahip bir formasyon yer aldığı tespit edilmiştir.

Arazi incelemeleri ve sondaj verileri ışığında, inşaat alanının mühendislik jeolojisi haritası yapılmış ve zemin kesitleri çıkarılarak (10.10.7.1.A, B ve C), inşaat alanı (site) ve teknopark alanında yapılacak binaların temel sistemlerine ilişkin bir geoteknik rapor hazırlanmıştır (Özaydın ve Yıldırım, 2009). Teknopark alanında yapılan çalışmalar ve zemin etüt sondajları değerlendirildiğinde; bu alanda zemin yüzeyinde oldukça geniş bir alan kaplayan ve çok eski bir taşocağından arta kalan kontrolsuz bir yapay dolgu tabakasının yer aldığı görülmüştür. Zemin yüzeyindeki kontrolsuz yapay dolgu kalınlıkları Teknopark alanı doğu kesimlerinde 1 m ilâ 3 m arasında kaldığı, batı kesimlerine doğru ise 6 m 1 ilâ 2 m arasında değişen kalınlıklara ulaştığı gözlenmiştir.

Kontrolsuz yapay dolgunun altında ana zemini oluşturan killi kum ara katmanlı kireçtaşı ve marn düzeylerine (Bakırköy formasyonu) girilmiştir. Sondajlarda Bakırköy formasyonuna ait kireçtaşlarında karot yüzdelerinin TCR = % 10 - % 70, çapını koruyan karot yüzdelerinin SCR = % 4 - % 12, kaya kalite göstergesinin RQD= % 0 - % 9 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Daha alt seviyelere doğru kireçtaşı-marn düzeyleri dereceli azalarak, yerlerini düzenli bir geçişle kum ara katmanlı Avcılar formasyonuna (Yıldırım vd., 2010) ait koyu grimsi yeşil renkli orta katı-katı ve sert aşırı konsolide killere bıraktığı belirlenmiştir. Bu tabakalar içinde yapılan standart penetrasyon deneylerinde (*Standard Penetration Test*, SPT) darbe sayılarının; N = 30 - ***Refü** arasında değiştiği gözlenmiştir.

***[Refü değeri** (ret değerleri; *refusal values*)**:** SPT deneyinin herhangi bir aşamasında 15 cm ilerleme sırasında deneyin durdurulmasına neden olacak darbe sayısı. Bu değer genellikle ≥50 olarak kullanılmaktadır**]**.

İnceleme alanı çevresinde yapılan sondajlarda yapay dolgu tabakası altında rastlanılan killi zeminler ile ara katkılı Bakırköy formasyonu marn ve kireçtaşı bantlarından alınan karot parçaları üzerinde yapılan bir seri deney ile temel tabakalarının

mekanik özellikleri araştırılmıştır. Killi tabakalardan alınan örnekler üzerinde yapılan sınıflandırma deneylerinde Likit Limit = % 39 - % 65; Plâstik Limit = % 18 - % 26; Plâstisite İndisi = % 19 - % 44 arasında değerler elde edilmiştir. S5 sondajından 12,50 m derinlikten alınan bir örselenmemiş örnek üzerinde yapılan üç eksenli basınç (UU) deneyinde ϕ = 33° ve c = 42 kPa değerleri, S15 sondajından 17 m derinlikten alınan bir örselenmemiş örnek üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyinde ise q_u = 220 kPa değeri ölçülmüştür. Kil ve kumlarla da ardalanan Bakırköy kireçtaşı taş numuneleri üzerinde yapılan nokta yükleme deneyi ile bulunan serbest basınç dirençlerinin farklı fasiyes özellikleri sunan killi, kavkılı ve som yapılı olmalarına bağlı olarak 90 kg/cm^2 ilâ 680 kg/cm^2 arasında değiştikleri gözlenmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre, Bakırköy formasyonu marn-kireçtaşları ara katmanlarında yer alan killer ve daha alta derinlere doğru karbonat oranı azalıp kil oranı artarak devam eden kil/kiltaşlarına (Avcılar formasyonu, Yıldırım vd., 2010) dereceli olarak geçmekte, bölgede yaygınca görülen bu düzeyler, çoğunlukla çok katı-sert yüksek plâstisiteli kil (CH) sınıfına girmektedirler. Sert killer arasında, yer yer ara katmanlar hâlinde görülen orta katı siyahımsı organik kil mercekleri de görülmektedir.

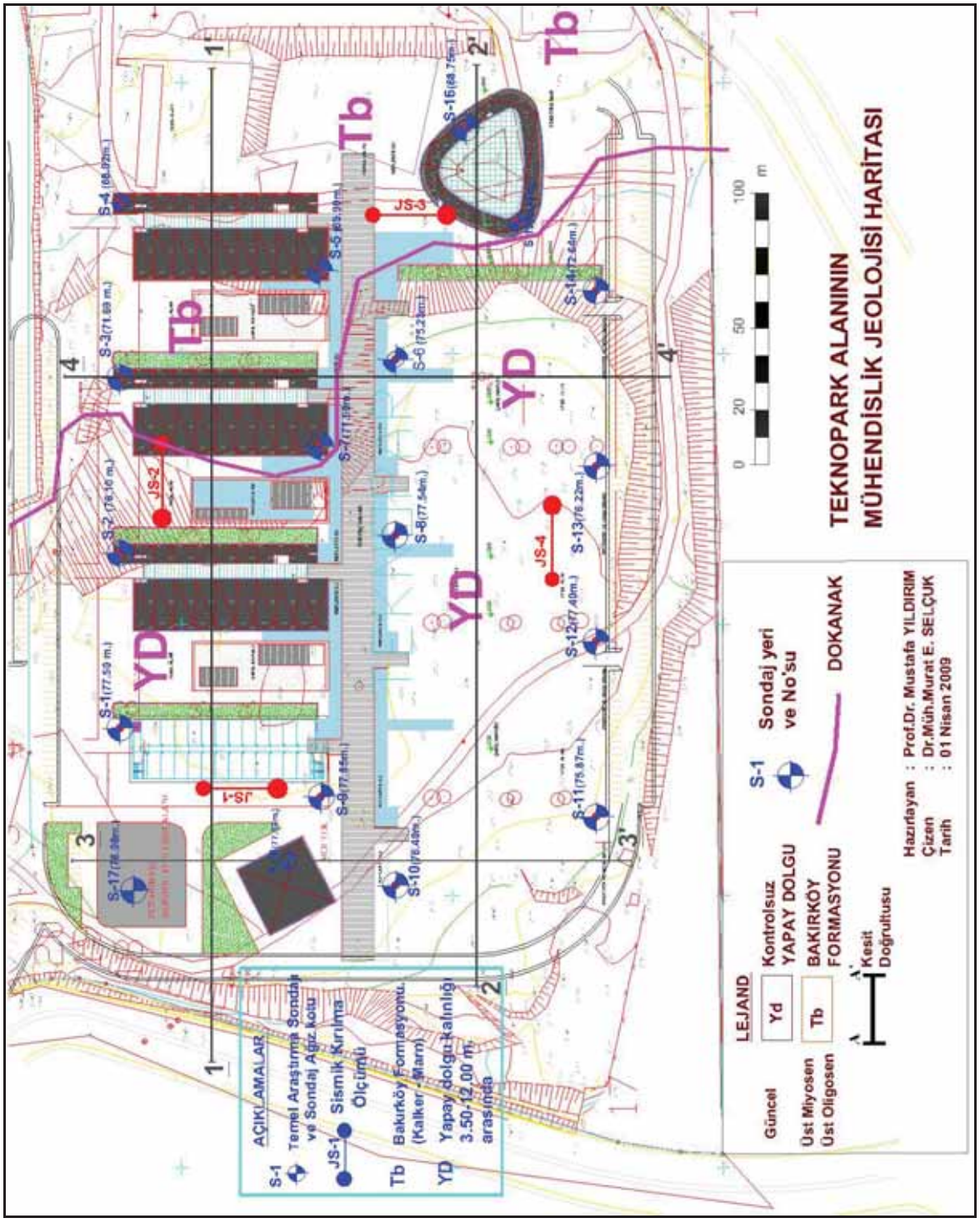
Sondajlar sırasında yeraltı suyu ile karşılaşılmamıştır. Tepe düzlüğünde yer alan inceleme alanında akifer niteliğinde bir yeraltı suyu, ya da yeraltı su seviyesine bulunmamaktadır. Ancak yüzeydeki dolgu tabanında ya da ana zeminin yüzeylendiği kesimlerde kil ara katkılı kireçtaşlarının arasında geçici su birikintileri olabilecektir. Teknopark binaları inşa edileceği alan geniş bir düzlükte yer aldığından, heyelân türü herhangi bir kütle hareketi söz konusu değildir.

Yapıların tasarımında inceleme alanının 1. Derecede Deprem Bölgesi içinde yer aldığının kabul edilmesi önerilmiştir.

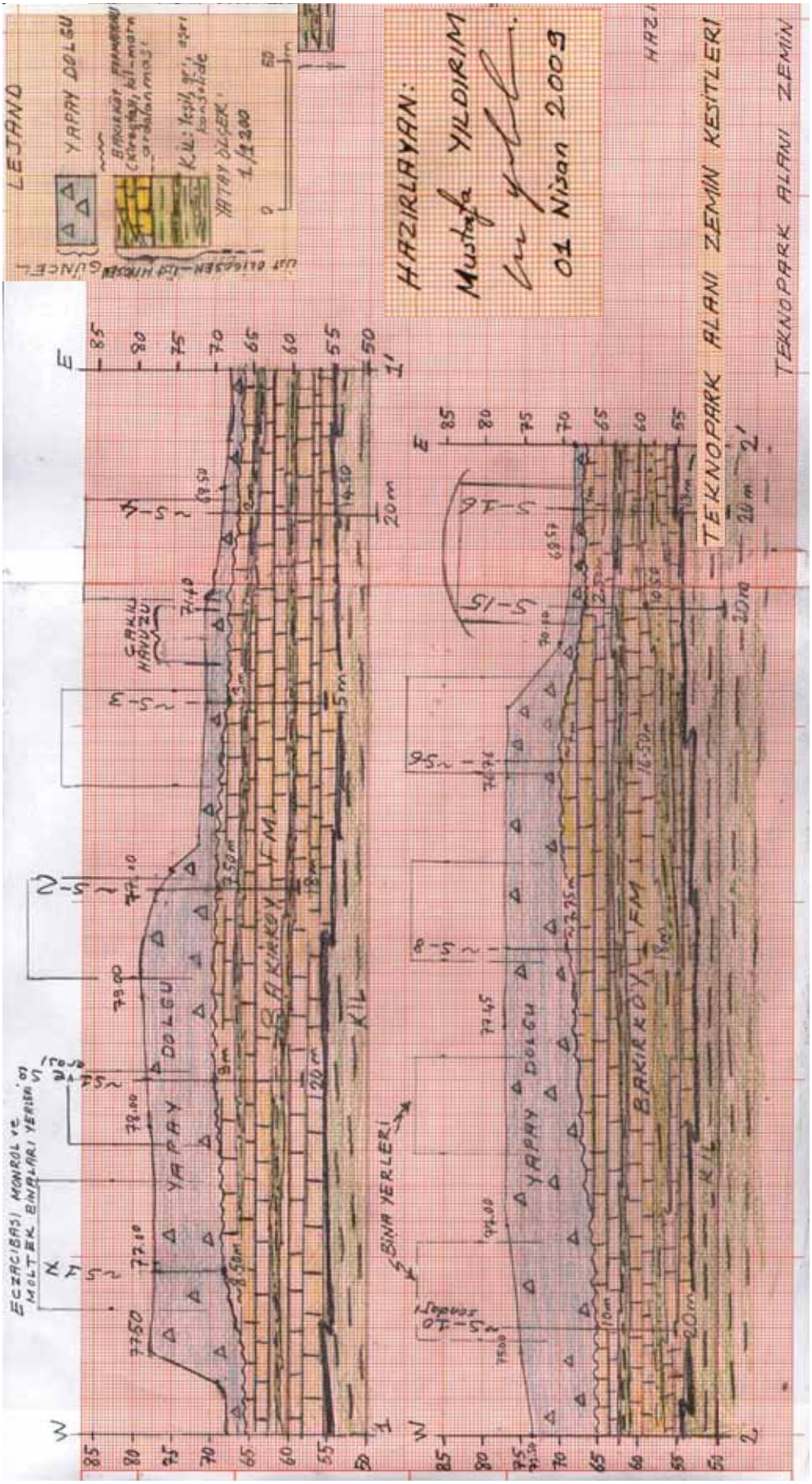
10.10.7.2) Temel Zemini ve Ana Zemine Oturacak Yapı Temellerine İlişkin Değerlendirmeler:

Sondaj verileri dikkate alındığında, Teknopark binalarının yapımının tasarlandığı inşaat alanının batı tarafındaki büyük bir kesiminde, zemin yüzünden itibaren 6 m - 12 m kalınlığa ulaşan kontrolsuz yapay dolgu yer almaktadır. Bu yapay dolgu tabakası kil, kum, çakıl vb. zeminler yanında yer yer atıklar ve molozlar içeren heterojen bir kontrolsuz dolgu niteliğindedir. Dolgu içinde yapılan SPT deneylerinde büyük çoğunlukla N≥8 darbe sayıları elde edilmesi, killi seviyelerin genel olarak yumuşak cepler oluşturmadığını göstermektedir.

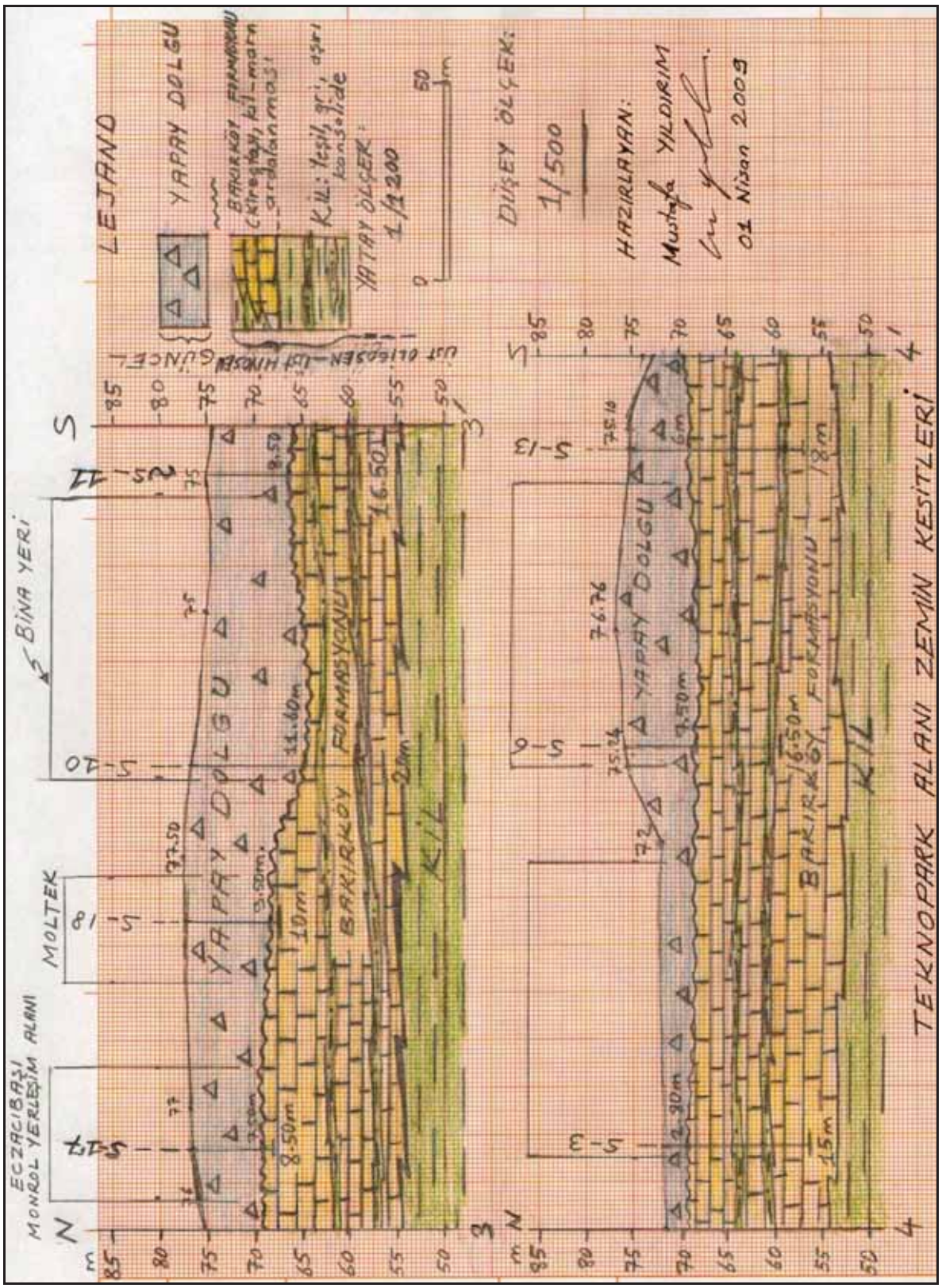
İnceleme alanında zemin yüzeyinde farklı kalınlıklarda yer alan kontrolsuz yapay dolgu tabakası, yapımı plânlanan Teknopark binaları için elverişli temel zemini niteliğine sahip değildir. Sınırları mühendislik jeolojisi haritasında gösterilen yapay dolgu tabakası dışında kalan kesimlerde, yüzeylenen tabiî zemin tabakaları ise elverişli temel zemini niteliğine sahiptirler. Bu tabiî zemin tabakaları Bakırköy formasyonu olarak adlandırılan kil-kum ardalanmalı marn/kireçtaşlarıdır.



10.10.7.1.A) Davutpaşa Kampüsü Teknopark alanı mühendislik jeolojisi haritası (Yıldırım, 2009).



10.10.7.1.B) Davutpaşa Kampüsü teknopark alanı 1-1′ ve 2-2′ zemin kesitleri (01.04.2009).



10.10.7.1.C) Davutpaşa Kampüsü teknopark alanı 3-3′ ve 4-4′ zemin kesitleri (01.04.2009).

Bu saha, tabiî zemin tabakası üzerine oturtulacak radye temeller için güvenli taşıma gücü olarak q_a = 250 kPa değeri alınabileceği ve bu değerin deprem yükleri etkisi altında 1/3 oranında artırılabileceği önerilmiştir. Temellerin tasarımında düşey yatak katsayısı olarak k_v = 30 MN/m^3, Afet Bölgeleri'nde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (Türkiye Deprem Yönetmeliği) hükümleri uyarınca, yerel zemin sınıfı olarak Z2 ve karakteristik periyot değerleri olarak T_A = 0,15 s ve T_B = 0,40 s alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

10.10.7.3) Dolgu Zemine Oturacak Yapı Temelleri için Önerilen "Darbeli Kırmataş Kolon" Uygulaması:

Yapılması plânlanan blokların bazılarında; seçilecek temel taban kotuna göre, temel tabanı ile tabiî zemin kotu arasında kalınlığı 5 m - 7 m'ye varan yapay dolgu tabakası kalması söz konusu olması üzerine, yapı temelleri ile tabiî zemin arasında kalan dolgu tabakasının yerinde iyileştirilmesi yoluna başvurulması en uygun çözüm olarak görülmüştür. Mevcut arazi ve zemin koşullarında en elverişli ve ekonomik çözümün, tabiî zemine kadar inen taş kolonlar ile zemin iyileştirilmesi yapılması ve yapıların bunun üzerine oturtulması tavsiye edilmiştir.

Taş kolonların zemine yer değiştirten türde tokmaklanmış taş kazık şeklinde imal edilmesi ile kazıklar arası zeminde de iyileştirme sağlanmış olacağı öngörülmüş, taş kolonların her iki doğrultuda bina sınırları dışına en az birer sıra taşması tavsiye edilmiştir.

Sıkıştırılmamış çapı 0,5 m olacak (tokmaklanma sonucu 0,6 m civarında olması beklenilebilir) taş kazıkların merkezden merkeze 1,5 m aralıklı teşkil edilmesi ve taş kolonlar ile temel arasında 0,3 m kalınlıkta bir sıkıştırılmış kum-çakıl yastık tabakası oluşturulması durumunda güvenli taşıma gücü olarak q_a = 100 kPa değeri alınması ve düşey yatak katsayısı olarak k_v = 20 MN/m^3 değeri kullanılabileceği belirtilmiştir. Yapıların zemine daha büyük taban gerilmeleri aktarılacak olması durumunda, taş kolon aralıklarının sıklaştırılması ile bu karşılanabileceği; örneğin, taş kolon aralıklarının 1,1 m ilâ 1,2 m arasında olması durumunda 200 kPa mertebelerinde güvenli taşıma gücü sağlanabileceği, yapılar altına meydana gelebilecek oturmaların da izin verilebilir sınırlar altında kalmasının beklenebileceği öngörülmüştür. **"Darbeli Kırmataş Kolon İmalâtı"**na ilişkin fotoğraflar aşağıda yer alan şekillerde gösterilmektedir (10.10.7.3.A/J arası).



10.10.7.3.A) Yapay dolgu. YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı. 6 m ilâ 12 m arasında değişen kontrolsuz yapay dolgu görülmekte (21.07.2009).



10.10.7.3.B) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı ve bu alanda yapılan darbeli kırmataş kolon imalâtı (11.06.2009).

Kontrolsuz yapay dolguda; zemin yüzünden itibaren yapay dolgu derinliği boyunca ve 50 cm iç çaplı, bir çelik boru düşey yönde, ağzı 10.10.7.3.B'de görülen dairesel ince çelik plâka üzerine bastırılarak, zemin içine gereken derinliğe darbeli olarak birkaç dakika gibi kısa bir süre içinde düşey yönde çakılarak (Şekilde 8 m çakılmış durumda), zemin içinde silindirik bir sütun boşluğu oluşturulmaktadır. Çelik boru, yukarı doğru çekilirken, kendisine bağlı olmayan ince dairesel çelik plâka, çakma tabanı derinliğinde dipte kalmaktadır. Çelik boru zemin yüzüne doğru belli aralıklarla darbeli-titreşimli çekme-sıkıştırma işlemi yapılırken, yukarı çekme sırasında oluşan boşluğa, boru içinden

aralıksız olarak dolan granüler malzeme ile darbeli titreşimler sonucu zemin yüzeyine kadar sıkıştırılmış bir taş kolon sütunu oluşturur.



10.10.7.3.C) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanında çalışan bir darbeli kırmataş makinası (11.06.2009).



10.10.7.3.D) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı taş kolon yükleme deneyi (11.06.2009).



10.10.7.3.E) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı, yapay dolguda sıkıştırılmış taş kolonlar üzerine yerleştirilen tekil ve mütemadi temeller (şerit temel, *strip footing-foundation*, 18.06.2009).



10.10.7.3.F) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanında yapay dolguda oluşturulmuş ve kenar kesimlerde yer alan **taş kolon** dizisi sütun kesitleri. Bina temeli, bu taş kolon dizileri üzerinde yer alacaktır (08.07.2009).



10.10.7.3.G) Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanında yapay dolguda temel kazısı kenarlarında görülen taş kolon sütunları. Bu sütunların bazıları darbeli kırmataş kolon imalâtı *(Impact* Sistemi*)* uygulaması sırasında, zeminin yumuşak kesimlerinde sıkıştırma işlemi sonucunda baloncuk benzeri, yersel taş kolon çap büyümesi oluşturmakta (08.07.2009).



10.10.7.3.H) Sıkıştırılmış taş kolonun, zemin içindeki kesitinin yakından görünüşü. Taş kolon imalâtında kullanılan mıcırın cinsi, mavi grovak (kumtaşı) ve silttaşlarıdır (08.07.2009).



10.10.7.3.İ) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Teknopark alanı. Teknopark alanında çevre düzenlemesi ve inşaası tamamlanmış, Ekim 2012 tarihi itibarıyla, 105 firmanın 2.300 Ar-Ge mühendisiyle çalıştığı Teknopark binaları. (06.10.2012).



10.10.7.3.J) YTÜ, Davutpaşa Kampüsü. Kampüs içinde ön cephede yer alan Teknopark binalarının Haziran 2012 tarihli görünümü.

Bu örnekte görüldüğü üzere mevcut arazi ve zemin koşullarında en elverişli ve ekonomik çözüm olarak yapı temelleri ile tabiî zemin arasında kalan dolgu tabakasının kaldırılması yerine, yerinde iyileştirilmesi yoluna başvurulmuş, tabiî zemine kadar inen taş kolonlar ile zemin iyileştirilmesi yapılarak, yapılar bunların üzerine oturtulmuştur.

10.10.7.4. TAC MAHAL:

Taş kolonlar ile zemin iyileştirmelerinin mühendislikte bilinen ilk uygulamaları günümüzden yaklaşık 50 yıl önce yapılmaya başlandığı bilimsel çevrelerce bilinmektedir. Ancak taş kolon ile zemin iyileştirmesi uygulamaları; Babür İmparatorluğu'nun [Hindistan Türk İmparatorluğu (1526-1858)] altıncı hükümdarı Şah Cihan'ın (1593-1666) çağrısı üzerine; Mimar Sinan'ın talebelerinden (kalfaları), İstanbul'dan Hindistan'a giden Mehmet İsa, Mehmet İsmail ve yapıdaki yazıları yazan Hattat Serdar efendi tarafından 1632 yılında temeli atılıp, 20 yıl sonra 1652'de tamamlanan ve Türk-İslâm Mimarîsinin en önemli yapıtları arasında yer alan "TAC MAHAL"in (*Taj Mahal*) yapımında gerçekleştirilmiştir. Tac Mahal, Şah Cihan'ın çok sevdiği eşi Mümtaz Mahal'in (Banu Begüm) ölümü üzerine onun anısına yaptırdığı aşkı temsil eden bir anıt mezardır (10.10.7.4.A, B, C).



10.10.7.4.A) TAC MAHAL: Hindistan'ın kuzeyinde *Agra* Şehri'nde Himalaya Dağları'ndan doğup Ganj Nehri'ne birleşen Yamuna (*Jumna*) Irmağı kıyısında alüvyal bataklık üstüne, günümüzden yaklaşık 360 yıl önce; bataklık içinde taş kolonlar imal edilerek, üzerine Tac Mahal anıt yapısı inşa edilmiş ve inşaası 1652'de tamamlanmıştır.



10.10.7.4.B) TAC MAHAL (=Saray Tacı, *crown of palaces*) mermerleri: 305 m x 580 m ölçülerinde dikdörtgen bir avluda 100 m x 100 m'lik beyaz mermer bir platform üzerinde yer alan Tac Mahal, 1983'den itibaren UNESCO-Dünya (Kültür) Miras Listesinde yer almaktadır. Anıt inşaasında, "tutkuyu" temsil eden beyaz mermerler kullanılmıştır. Anıtın 4 minaresi vardır.



10.10.7.4.C) TAC MAHAL anıtı ve (mozole) dört cephesinde yazılı **"**Yasin Suresi**"**.

10.10.8. Zemin Araştırmalarına Yönelik Bir Teknik Şartname Örneği ve Jeofizik Ölçüm Uygulaması:

ZEMİN İNCELEME SONDAJLARI ve SİSMİK ETÜT TEKNİK ŞARTNAMESİNE BİR ÖRNEK (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü)

10.10.8.1. Araştırma Programı

Sondaj yapılacak yer, bölge, ilçe, il. Aşağıda belirtilen zemin araştırma sondajları ile arazi deneyleri ve jeofizik çalışmalar yapılacaktır. Yapılacak işler aşağıdaki gibi sıralanmış olup bütün çalışmalarda, TS, ASTM, BS, ISO veya kabul görecek diğer uluslararası standartlara uyulacaktır:

(Sayı) adet (derinlik) m derinliğinde zemin araştırma sondajı,
(Sayı) adet kuyu içi sismik,
(Sayı) adet *Menard* presiyometre,
(Sayı) adet sismik kırılma,
(Sayı) adet mikrotremor,
(Sayı) adet Re-Mi (Kırılma-Mikrotremor = *Refraction Microtremor*) ölçümü
Sondaj yerleri sahada (ilgili kurum ve/veya kişiler) işaretlenecektir.
Sondajlarda aşağıda ayrıntıları verilen numune alımları ve deneyler uygulanacaktır.

10.10.8.2. Zemin İnceleme (etüt) Sondajları:

10.10.8.2.1. Sondaj Makina ve Ekipmanı

Sondaj yüklenicisinin kullanacağı sondaj makina ve ekipmanı iyi durumda, hidrolik baskılı *rotari tipte olacaktır. Makina ve **ataşmanları en az 50 m derinliğe kadar sondaj yapmaya uygun olacaktır. Sondaj dizisinde 50 mm çaplı veya daha kalın, standart uzunluklarda sondaj tijleri kullanılacaktır.

***[Rotari:** Delicisi dönerek çalışan sondaj makinası**]**.

****[Ataşman:** Uygulama gereği yapılan değişikliklerin zamanında ölçümü, saptama, tutanaklar, proje dışı yapılan işlerin belirtilmesi, (makinada: ilâve teçhizat)**]**.

Sahada iyi durumda Standart Penetrasyon Test ekipmanı, örselenmemiş numune alımı için, şelbi *(shelby)* tüpleri ve başlığı, kaya formasyonlardan sürekli karot almak için çift tüplü T-76, NWM veya daha geniş çaplı karotiyer bulundurulacaktır.

10.10.8.2.2. Zemin Sondajları

Zemin inceleme sondajlarında ilerleme, rotari yöntemle, su dolaşımı (sirkülasyon) ile zemine uygun matkaplar kullanılarak gerçekleştirilecektir. Kuyuda yıkıntı olmaması için gereken derinliğe kadar muhafaza borusu sürülecektir. Sondaj deliği çapı, varsa muhafaza borusu iç çapı, en az 76 mm dış çaplı numune alıcıların içinden rahatça geçebileceği genişlikte olacaktır.

Sondaj sırasında, su kaçakları, takım düşmeleri, sondajın ilerleme hızındaki ve dolaşım suyunun rengindeki değişimler, artezyen durumu ve dikkat çeken bütün ayrıntılar kaydedilecektir.

Zeminlerde her 1,5 m de bir Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılacaktır. Deneyde kullanılacak yarık tüplü SPT numune alıcısının iyi durumda olmasına, özellikle çarığının aşınmış olmamasına ve temiz kumlarda numune alınıyor ise numune tutucusu takılı olmasına dikkat edilecektir. Numune alınacak seviyeye inilip kuyu temizlendikten sonra tijlerin ucuna takılı SPT numune alıcısı kuyu dibine indirilecek, eğer tam yerine kadar inmezse, çıkartılıp kuyu tekrar temizlenecektir. Kuyu ağzının yukarısında, muhafaza borusunun tepesi referans alınarak, tijin üzerine 3 adet 150 mm ara ile belirgin işaret konacaktır. 63,5 kg ağırlığındaki tokmağın 760 mm yükseklikten serbest düşme ile darbe yapmasını sağlayacak SPT düzeneği hazırlandıktan sonra deneye başlanacaktır. Numunenin her 150 mm ilerlemesi için gerekli darbe sayıları kaydedilecek ve sondaj karnesine işlenecektir. İkinci ve üçüncü 150 mm'lik aralık için gerekli darbe sayılarının toplamı, SPT N değeridir. Eğer her hangi bir aralıkta 50 darbedeki ilerleme 150 mm'den az ise ilerlenebilen uzunluk, x (cm), 50 / x şeklinde, Refü Değeri olarak kaydedilecektir.

Deneyin tamamlanmasını takiben, numune alıcı kuyudan çıkartılarak açılacak ve varsa kırıntılar atıldıktan sonra zemin numunesinin boyu ölçülecek, tanımlanacak, daha sonra da hava almayacak şekilde cam kavanoz veya çift kat naylon torba içine yerleştirilerek etiketlenip muhafaza edilecektir.

Kohezyonlu zeminlerde (kil) SPT N değerinin 15 veya daha küçük olduğu seviyelerde, yaklaşık 3.0 m ara ile ve ayrıca tabaka değişimlerinde, örselenmemiş numune alınacaktır. Örselenmemiş numune alımında, en az 76 mm dış çaplı, ince çeperli *Shelby* tüpleri kullanılacaktır. Tüpün boyu 450 mm'den az olmayacak, pürüzsüz ve düzgün yüzeyli olacaktır. Numune, hidrolik baskı ile ve numune alıcı temizlenmiş kuyu tabanına indirilip zemin içine kesintisiz bir şekilde itilerek alınacaktır. Numune yeterli derinliğe indirildikten sonra birkaç dakika beklenecek, daha sonra sondaj dizisinin boru anahtarı ile iki tam tur döndürülmesini takiben kuyudan çıkartılacaktır. Kuyudan çıkartılan *Shelby* tüpünün alt ucu 25 mm kadar tıraşlandıktan sonra hava almaması için, her iki ucu da en az 20 mm kalınlıkta erimiş balmumu ve reçine karışımı ile kaplanacaktır. Tüpün ucundan tıraşlanan zemin, tanımlamada kullanılacaktır. *Shelby* tüpü etiketlenecek ve özenle muhafaza edilecektir.

Herhangi bir nedenle (çok sert, çakıllı, akıcı zemine rastlanması gibi) örselenmemiş numune alınamazsa, bu durum kaydedilecektir.

10.10.8.2.3. Kaya Sondajları

Sondajın ilerleme hızı ve/veya SPT deney sonuçlarından refü değerine ulaşılıp kaya formasyona girildiği anlaşıldığında veya kontrol mühendisinin tâlimatı üzerine, en az 76 mm dış çaplı çift tüplü karotiyer ile karotlu sondaj *(drill core)* yapılacaktır.

Yüksek karot yüzdesi sağlamak için zemine uygun delme işlemini yapan kron (emprenye elmas, taneli elmas, vidye) kullanılacak, karot yüzdesi düşük olduğunda uzun karot manevralarından kaçınılacaktır. Karot yüzdesinin düşük olduğu yerlerde, sondaj suyunun rengi, su kaçakları, sondaj hızı, takım düşmeleri gibi faktörler özenle takip edilecektir. Ayrışmış kiltaşı/marn, zayıf çimentolu kumtaşı, konglomera gibi kayalarda, karot manevraları arasında SPT deneyleri yapılarak, sondaj sırasında yıkanan zayıf malzemeden örnek alınması yoluna gidilecektir. Yıkıntı yapan kuyularda, ya muhafaza borusu sürülecek ya da çimento şerbeti enjeksiyonu gibi yöntemler kullanılabilecektir.

Her manevrada karotiyer kuyudan çıkartıldığında, karot yüzdesi (TCR), silindirik karot yüzdesi (SCR) ve kaya kalite göstergesi (RQD) değerleri, karotlar, henüz karotiyerden çıkartılmadan önce saptanacaktır. Karotlar, hafif, dayanımlı (boyutları; 100cmx30cmx7cm, 4 bölmeli olan standart karot sandıkları; bk. Bölüm 10, Şekil 10.6) plâstik malzemeden yapılmış, menteşeli veya kapaklı, karot bölmeli sandıklara yerleştirilecektir. Her manevranın sonunda, manevra boyunca alınan karotların başlangıç ve bitiş derinlikleri özel bloklar üzerine (ara takoz) yazılarak sondaj sandığında ilgili yerlere konacaktır. Karot sandıkları, kapağının iç kısmına sondaj No'su, derinlik aralığı gibi bilgiler yazıldıktan sonra fotoğraflanacaktır. Karot sandıkları, sahada yağmur vb. güneş etkilerinden korunması için naylon örtüler altında tutulacaktır. İleri derecede ayrışmış ve/veya su içeriğini kaybedince özelliği önemli ölçüde değişebilecek karotların bir kısmı, çift kat naylon torba içine konarak korunacaktır.

10.10.8.2.4. Yeraltı Suyu Gözlemleri

Bütün sondajlarda yeraltı suyu gözlemi yapılacaktır. Yeraltı suyuna ilk rastlanan seviye ve bu seviyenin sonradan yükselip yükselmediği kontrol edilecek ve kaydedilecektir. Sondaj bitiminden sonra sondaj su dolaşımlı olarak yapıldı ise özel bir kova *(bailer)* ile kuyudaki su boşaltılacak ve 12 ve 24 saat sonra seviye ölçümü gerçekleştirilecektir.

10.10.8.3. Presiyometre Deneyleri

Her sondajda önceden belirlenen 4 ayrı seviyede *Menard* presiyometre deneyi yapılacaktır (örn. deneyler, Akgüner vd., 2012).

Deney seviyesinde sondaj delgisi zemini en az örseleyecek şekilde ve uygun çapta yapılacaktır. 74 mm çaplı sonda kullanıldığında delgi çapı 76 mm olacaktır. Deneyde kullanılacak sondanın basınç ve hacim kalibrasyonu yapılmış olacaktır.

Deney sırasında basınç, kademeler hâlinde arttırılacak ve her kademede sıfır, 30 ve 60 saniyede hacim okumaları alınacaktır. Kademelerin, yaklaşık eşit aralıklarla ve maksimum basınca kadar, düzgün bir eğri çizmeye yeterli sayıda olacak şekilde ayarlanması hedeflenecektir. Deneye, zemin tamamen yenilene (kırılma) ya da sonda hacim limitine yaklaşılana kadar devam edilecektir.

Elde edilecek basınç–hacim okumalarından gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi elde edilecek ve buradan da *Menard* Presiyometre modülü, akma *(creep)* basıncı ve limit basınç değerleri hesaplanacaktır (10.10.8.3.A-B).



10.10.8.3.A) *Menard* Presiyometre Ölçüm Cihazı. YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Geoteknik-KAP-Proje, Akgüner vd., 2012. (04.05.2012).



10.10.8.3.B) *Menard* Presiyometre Probu. YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Geoteknik-KAP-Proje, Akgüner vd., 2012. (24.05.2012).

10.10.8.4. Sismik Kırılma ve Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) Çalışmaları

Kayaçların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde jeofizik yöntemlerinin önemli bir yeri vardır. Aşağıda belirtilen bu çalışmaların başında sismik kırılma ve yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yöntemi gelmektedir.

Zemin incelemelerinde sismik kırılma etüdünde kullanılacak ekipman, sismik kayıtçı, düşey bileşenli jeofonlar (**Jeofon**: Titreşim ölçer), jeofon kablosu ve şok kaynağı ile diğer aksesuarlardan oluşmaktadır. Sismik verinin en az 24 kanallı bir sistemle toplanmasında yarar öngörülmüştür. Bu durumda **atış uzaklığı** (atış uzaklığı: jeofon seriminin her iki ucundan atış noktasına olan uzaklık) ve jeofon aralığı 2 m alınarak toplam 50 m uzunluğunda bir hat oluşmaktadır ki, bu da sığ zemin incelemelerinde çoğu yerde yeterli kabul edilebilmektedir. Kullanılan jeofonların 4,5 Hz doğal frekanslı olması gerekmektedir. Sismik enerji, ağır bir balyozun metal bir levhaya düşey doğrultuda sertçe vurulması ya da yer içine doğru bir patlama düzeneği ile sağlanabilir. Atışlar hat başı ve hat sonu haricinde hat içinde ve dışında ek noktalarda da yapılabilir. Kayıtlarda örnekleme aralığının 0,25 ms (milisaniye) ve kayıt uzunluğunun en az 1 s (saniye) olması tercih edilmelidir.

Veri analizi iki aşamalı olarak yapılmaktadır. Birinci aşamada saha kayıtları üzerinden ilk varış zamanı okumaları yapılır. Tercihen tomografik bir yöntemle P-tipi hızların yanal ve düşey değişimleri modellenebilir. İkinci aşamada kayıtlarda mevcut yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yapılır *(MASW – Multi Channel Analysis of Surface Waves)*. Bu analiz sonucunda 30 m'ye kadar S-tipi hızların düşey değişimi belirlenmektedir.

10.10.8.5. Kırılma-Mikrotremor (Re-Mi) Çalışmaları

Re-Mi *(Refraction Microtremor)* yönteminde kullanılan ekipman, sismik kayıtçı, 4,5 Hz doğal frekanslı düşey bileşenli jeofonlar, jeofon kablosu ve diğer aksesuarlardan oluşmaktadır. Re-Mi pasif kaynaklı bir yöntem olup herhangi bir sismik enerji kaynağı kullanılmamakta, sadece yerdeki doğal titreşimler kaydedilmektedir. 5 m jeofon aralıklı 24 kanallı bir sistemle 100 m'ye kadar S-tipi hızların değişimi hesaplanabilmektedir (Yılmaz ve Eser 2002, 2003).

Aşağıda yer alan örnek şekillerden 10.10.8.5'de; sismik kırılma, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi **(MASW)** ve **Re-Mi** çalışmaları için veri toplama düzeneği görülmektedir. Bu arazi deneyleri ile **P** tipi sismik hızların yanal ve düşey değişimi (15 m - 20 m arası derinliğe kadar), **S** tipi sismik hızların da 30 m'ye kadar düşey değişimi belirlenmektedir.



10.10.8.5) Sismik kırılma, MASW ve Re-Mi saha çalışmaları. Jeofon aralıkları ve atış ilk alıcı uzaklıkları 2'şer metre, toplam kanal sayısı 24, toplam hat uzunluğu ise 50 metredir (Yer: YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, Otağ-ı Hümayun batısı; 16.07.2012).

10.10.8. 6. Kuyu İçi Sismik Çalışmaları

Kuyu içi sismik çalışmalarında kullanılan donanım, sismik kayıtçı, üç ya da beş bileşenli bir kuyu içi jeofonu, şok kaynağı ve aksesuarlarından ibarettir. Kuyu içi jeofonları, üreticilerin farklı düzeneklerdeki sistemleri ile kuyu içinde istenilen seviyede sabitlenebilmektedir. Sondaj kuyusu *(drill hole)* bir PVC boru ile koruma altına alınır ve kuyu cidarı (zemin) ile boru arasındaki boşluk çimento enjeksiyonu ile doldurularak boru sabitlenir. Kuyu içi jeofonunun bileşenlerinden biri düşey, diğerleri birbirine 90 derece açılı olmak üzere yataydır. Jeofon kuyu içinde istenilen bir derinlikte sabitlenir. Kuyu başına belli bir uzaklıkta düşey vuruş yapılarak P tipi kayıt alınır. S tipi kayıt için ise üzerine araç tekerlekleri ile baskı yapılan uzun bir kalasın (=kalın biçilmiş uzun tahta) her iki yanından yatay vuruşlar yapılarak kayıtlar alınır. Belirli bir aralıkla (örn. 1 m) kuyu taranarak ölçümler tamamlanır. Analizler sonucunda kuyu derinliği boyunca P ve S tipi sismik hızlar hesaplanır (10.10.8.6.A, B ve C).



10.10.8.6.A) Bir sondaj kuyusuna yerleştirilen SARA SS-BH 5 bileşenli kuyu içi jeofonu (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, 14.06.2012).



10.10.8.6.B) Sondaj kuyusunda S-tipi sismik enerji üretimi hazırlığı (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, 14.06.2012).



10.10.8.6.C) Sondaj kuyusunda S-tipi sismik enerji üretimi (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, 14.06.2012).

10.10.8.7. Mikrotremor Çalışmaları

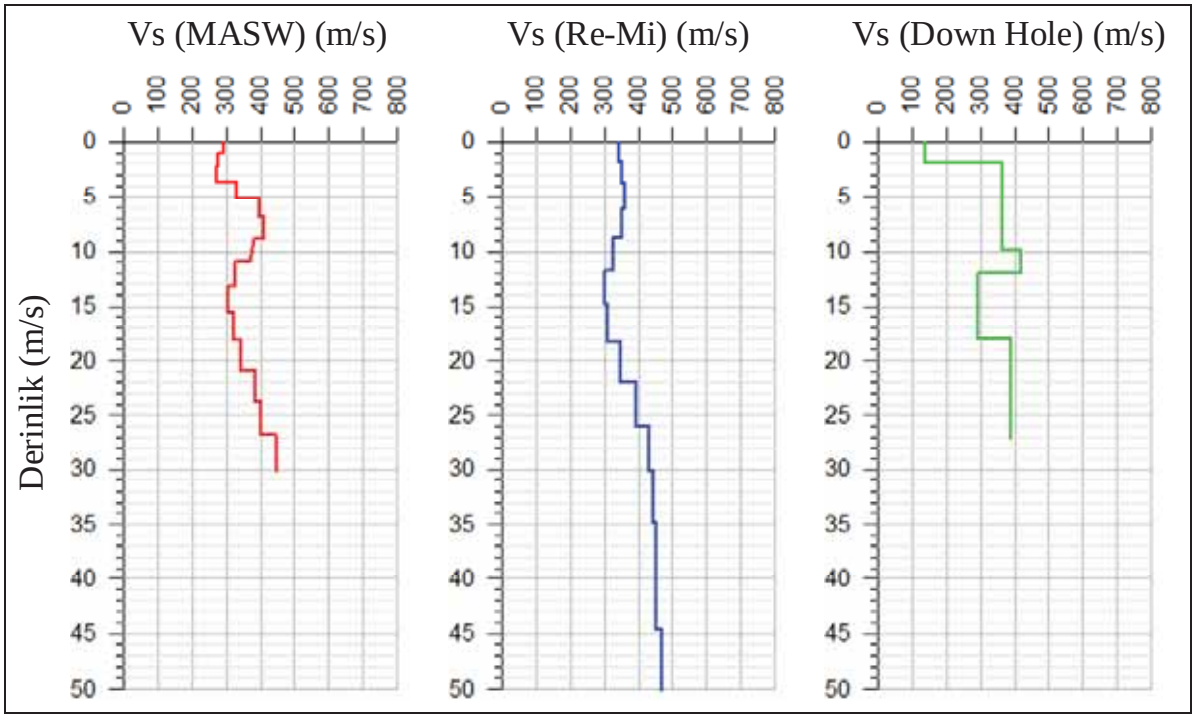
Zeminlerin hâkim titreşim periyotlarını belirlemek amacıyla mikrotremor ölçümleri yapılmaktadır. Mikrotremor yöntemi tek bir noktada, ivme kaydı yapabilen bir sismometre yardımı ile yer içerisindeki titreşimlerin kayıt edilmesi esasına dayanmaktadır (Örnek Şekil 10.10.8.7 ve 8). Sismometrenin içinde 1 ya da 2 Hz doğal frekansa sahip biri düşey, ikisi yatay üç jeofon bulunmaktadır. Titreşimler her ölçüm noktasında en az 20 dakika kaydedilir. Analizlerde, spektral ortamda yatay bileşenlerin ortalamasının düşey bileşene oranı hesaplanarak hâkim periyot değeri belirlenir. Şekil 10.10.8.9. A ve B'de de yapılan çalışmalara ait; MASW, Re-Mi ve *Downhole* yöntemleri ile belirlenen S-tipi sismik hızların düşey değişimi verilmektedir.



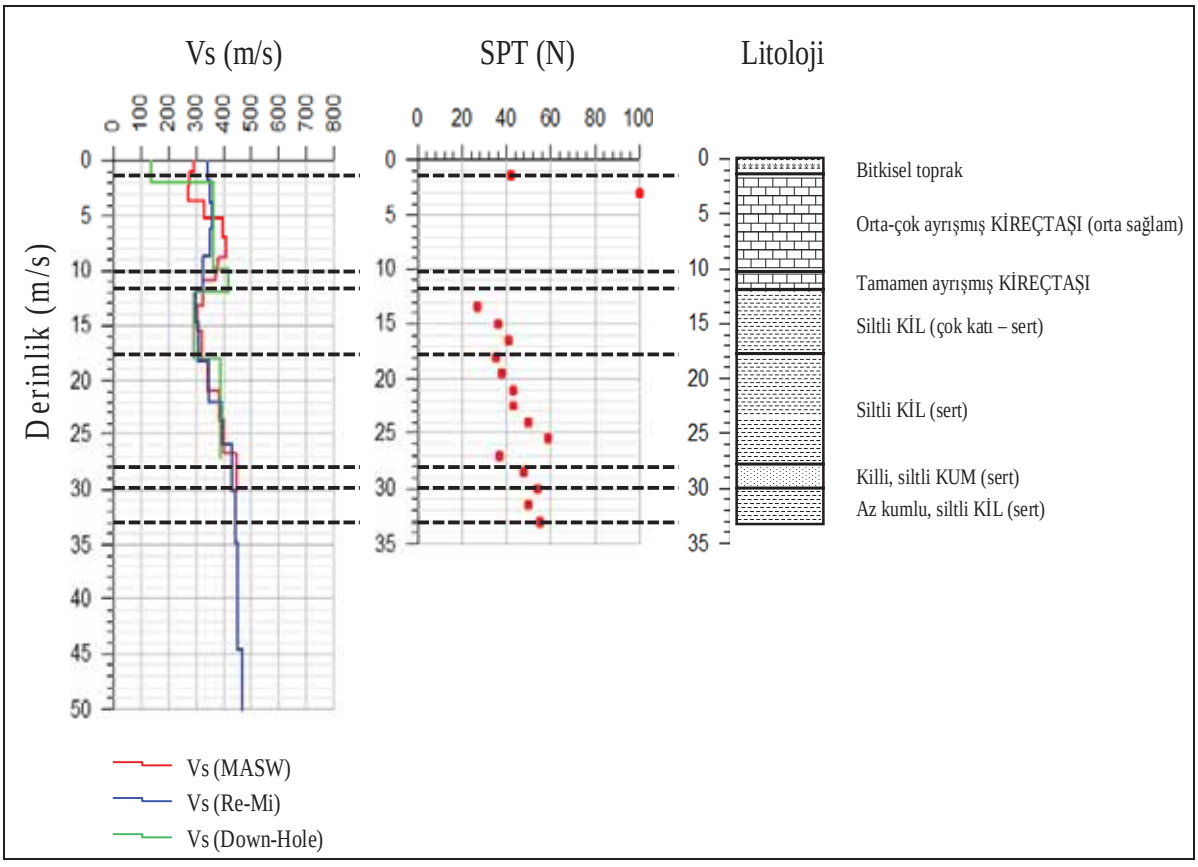
10.10.8.7) Güralp Systems CMG-6TD sismometre ile sondaj lokasyonunda mikrotremor ölçümü (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, 11.06.2012).



10.10.8.8) Mikrotremor ölçümünde kullanılan 1 Hz'lik (0,1-1 Hz arası) Sismometre. Sismometre içinde; kuzey-güney; doğu-batı ve zemin içine doğru derinliği belirleyen "z" bileşeni olmak üzere titreşimleri tespit eden üç bileşenli bir jeofon sistemi vardır (YTÜ, Davutpaşa Kampüsü, 11.06.2012).



A



B

10.10.8.9. **A** ve **B**; MASW, Re-Mi ve *Downhole* yöntemleri ile belirlenen *S-tipi sismik hızların düşey değişimi.

***[**Davutpaşa Kampüsü'nde, İnşaat Fakültesi ile Yabancı Diller Yüksek Okulu arası asfalt yol kenarında çamlık tabiî arazide yapılan bu zemin etüt sondajında (Geoteknik KAP-YT-2 sondajı) bitkisel toprağın altında tabiî zemini oluşturan Bakırköy kireçtaşları ve daha alt seviyelerde ise Avcılar formasyonuna ait kil-kum ardalanmaları kesilmiştir. Bu lokasyondaki geoteknik sondaj logu ve SPT değerleri, V_s hızları ilişkilendirilerek formasyona ait değişimlerin irdelenebilmesi sağlanmıştır. Yaklaşık 12 m – 18 m derinlik aralığındaki çok katı–sert siltli kil birimlere ait düşük hız zonu dikkat çekicidir ve 3 yöntemde de kendini göstermektedir**]** (12.10.2012).

10. Bölümün Özeti

Kayaçların ve zayıflık düzlemleri olarak adlandırılan süreksizliklerin özellikleri, mühendislik uygulamalarında son derece önemlidir. Bu özellikleri, kayaçların litolojisi, yapı ve dokusu, bünyelerindeki sular gibi ana başlıklar altında toplamak mümkündür. Bunlardan, birim hacim ağırlığı, porozite, permeabilite, boşluk oranı ve tane boyu gibi fiziksel özellikleri ile kayacın dokusu, çimentolanması, kenetlenme derecesi, anizotropi ve homojenliği, ayrışma derecesi ile bünyesinde yer alan süreksizlikler gibi mekanik özellikleri, inşaat mühendisliğinde kaya kalitesinin belirlenmesine yardımcı olan faktörlerdir. Kayaç; mühendislikte kullanılan kaya ve zemin kavramlarının her ikisini de kapsamaktadır. Ancak özellikle inşaat mühendisliği çalışmalarında kaya ve zemin birbirinden önemli farklara sahip kavramları temsil ederler. Kaya, taşlaşma işlemi geçirmiş olan ve tek eksenli basınç dayanımı genel olarak 10 kg/cm^2 yi geçen kayaçlardır. Zemin; doğada, yerinde ayrışmış veya taşınıp biriktirilmiş, ancak herhangi bir taşlaşma işlemi geçirmemiş olan kırıntılı çökellerin oluşturduğu katılaşmamış ya da kolayca dağılabilen kayaçlardır. Bu kayaçların tek eksenli basınç dirençleri çoğunlukla 10 kg/cm^2 den azdır. Taş ise arazide yer alan kaya içerisinden alınmış makro süreksizlik içermeyen numunedir. Genelde laboratuar ortamlarında üzerinde deney yapılan kayadan alınmış taş örnekler, yüzeylendikleri (mostra) kayada yer alan süreksizlikleri içermediklerinden, dirençleri arazideki kaya ortamından yüksek çıkmaktadır. Bu direnç sadece birim kaya elemanını oluşturan taşa ait özelliklerdir. Sonuçta, laboratuar deneyleri kayanın değil, kayadan alınan taşın özelliklerini yansıtır. Bu nedenle kaya kalitesinin belirlenmesinde araziden alınan taş örneklerin yanı sıra, arazide yapılan deneyler (yerinde = *in situ*) büyük önem

taşımaktadır. Yer altında bulunan jeolojik formasyonlar ve yer altı zenginlikleri hakkında bilgi toplamak ve işletmelerde üretime geçmek amacıyla, yerin derinliklerine doğru, küçük çaplı kuyuları açmak için yapılan işlemlerin tümüne "sondaj", tijlerin alt ucuna takılan, sondaj esnasında devir ve baskıyı matkaba (kesici uç) nakleden, devir dâim suyunu ileten, karot parçalarını alıp muhafaza eden ve yeryüzüne getiren tek ya da çift tüplü cinsleri olan alete (tüp parçaya) "karotiyer", karotiyerin ucuna takılan ve delme işlemini yapan kesici alete "matkap", içi boş ve birbirine takılan, kuyuda takımı askıda tutan, içinden su geçebilen iki uç tarafına diş açılmış olan çeşitli boy ve çaplardaki çelik borulara "tij", sondaj kayıtlarının tutulduğu çizelgeye ise "sondaj logu" denmektedir. Zemin etüt sondaj loglarında, sondaj veri ve bilgileri eksiksiz yer almalıdır. Loglarda; kayaçların litolojik özellikleri ve zemin kaya profili, yeraltı su seviyesi ve ayrıca zeminlerde sondaj sırasında tabakalardan örselenmemiş numuneler alınmış ise alındığı derinlikler ve arazi deneyleri de yapılmışsa, bu deneyler sondaj loglarında belirtilmelidir. Kayalarda; sondaj sırasında elde edilen karotlardan belirlenen, toplam karot verimi (TCR), sağlam karot verimi (SCR), kaya kalite göstergesi (RQD), eklem sıklığı (FF) ve ayrışma (bozunma, *weathering*) gibi sayısal veriler loglarda gösterilmelidir. Zeminler için arazide uygulanan deneylerden en yaygın ve pratik olan yöntem standart penetrasyon testidir (*Standard Penetration Test,* SPT). Ayrıca zemin deneyleri içerisinde yer alan diğer önemli deneyler; koni penetrasyon testi (CPT), cep veyn ve cep penetrometre testleri, arazi veyn testi, presiyometre testi, plâka yükleme testi ve sondaj kuyusu kesme testi yöntemleridir.

Kaya şevlerinde stabiliteyi denetleyen başlıca unsur faylar ve süreksizliklerdir. Eğer yamaçlar, sadece kaya ortamından oluşmuşlarsa, bu durumda, kayalarda kaymayı süreksizlikler kontrol ederler. Süreksizliklerin eğim yönleri, pürüzlülüklerinin durumu, dolgu malzemesi içeren süreksizliklerde kohezyon (c) veya süreksizlikler arasında su olup olmaması (boşluk suyu basıncı=u), yamaç stabilitesini etkileyen en önemli unsurlardır.

Bir süreksizlik yüzeyinin, düzlemsellikten küçük ölçekte zikzak yaparak sapmasının ölçüsüne "pürüzlülük" büyük ölçekte (örn. cm veya metre mertebelerinde) eğrisel sapmasının ölçüsünü ise "dalgalılık" denir. Kayada bulunan süreksizliklerin yüzeylerindeki pürüzlülüğün artması, kayanın şevde kayma direncini arttırmaktadır. Kaya şevlerinde görülen süreksizliklerde,

kohezyon ve boşluk suyu basıncının olmadığı durumlardaki şev stabilitesi; şev eğimi ile şeve doğru uzanan süreksizliklerin eğim açıları ve yönleri ile yakından ilişkilidir. Kohezyonsuz yani boydan boya çatlak olan ve herhangi bir dolgu malzemesi içermeyen kaya süreksizliklerinde, pürüzlülük ve dalgalılık arttıkça, kayma mukavemeti parametrelerinden biri olan içsel sürtünme açısı da (Φ) artmaktadır.

Süreksizlikler bazen dolgu malzemesi içerirler. Süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını, süreksizliğin oluşumundan sonra dolduran ve çoğunlukla ana kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemeye “dolgu malzemesi” denir. Dolgulu bir süreksizlikte, süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki uzaklık ise “dolgu kalınlığı” olarak tanımlanır. Kuvars, kalsit, pirit vb. dayanımlı dolgular hariç tutulduğunda genellikle kil içeren süreksizlikler dolgusuz veya pürüzlü yüzeylere oranla daha düşük makaslama dayanımına sahiptirler ve bu sebeple kaya kütlesinin dayanımında ya da şev stabilitesini olumsuz yönde etkilerler.

Pürüzlülük ve dalgalılık ölçümleri; pusula ve disk şeklindeki klinometreler ve mekanik profilometre düzeneği ya da günümüzde; temassız lazer profilometresi gibi optik metotlarla bilgisayarda ölçülebilmekte, erişilmesi güç süreksizlik yüzeylerinde ise fotoğrametri ve GPS tekniğinden yararlanılarak yapılmaktadır.

Sismik kırılma ve yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW), kırılma-mikrotremor (Re-Mi), kuyu içi sismik ve mikrotremor çalışmaları, zemin/kaya ortamlarının P ve S hızları, zemin hâkim titreşim periyodu ve elâstik parametreler (elâstisite modülü, kayma modülü, *poisson* oranı vb.) kayaçların mühendislik özelliklerinin sayısal olarak belirlenmesinde, arazide uygulanan başlıca jeofizik deneylerini oluşturmaktadır. Bu deneyler sonucunda, P ve S tipi sismik hızlardan elde edilen sismik kesitler ve hız fonksiyonları ile farklı zemin katmanları, ana kaya derinliği ve jeolojik yapıyı oluşturan kayaç geometrisi belirlenebilmektedir.

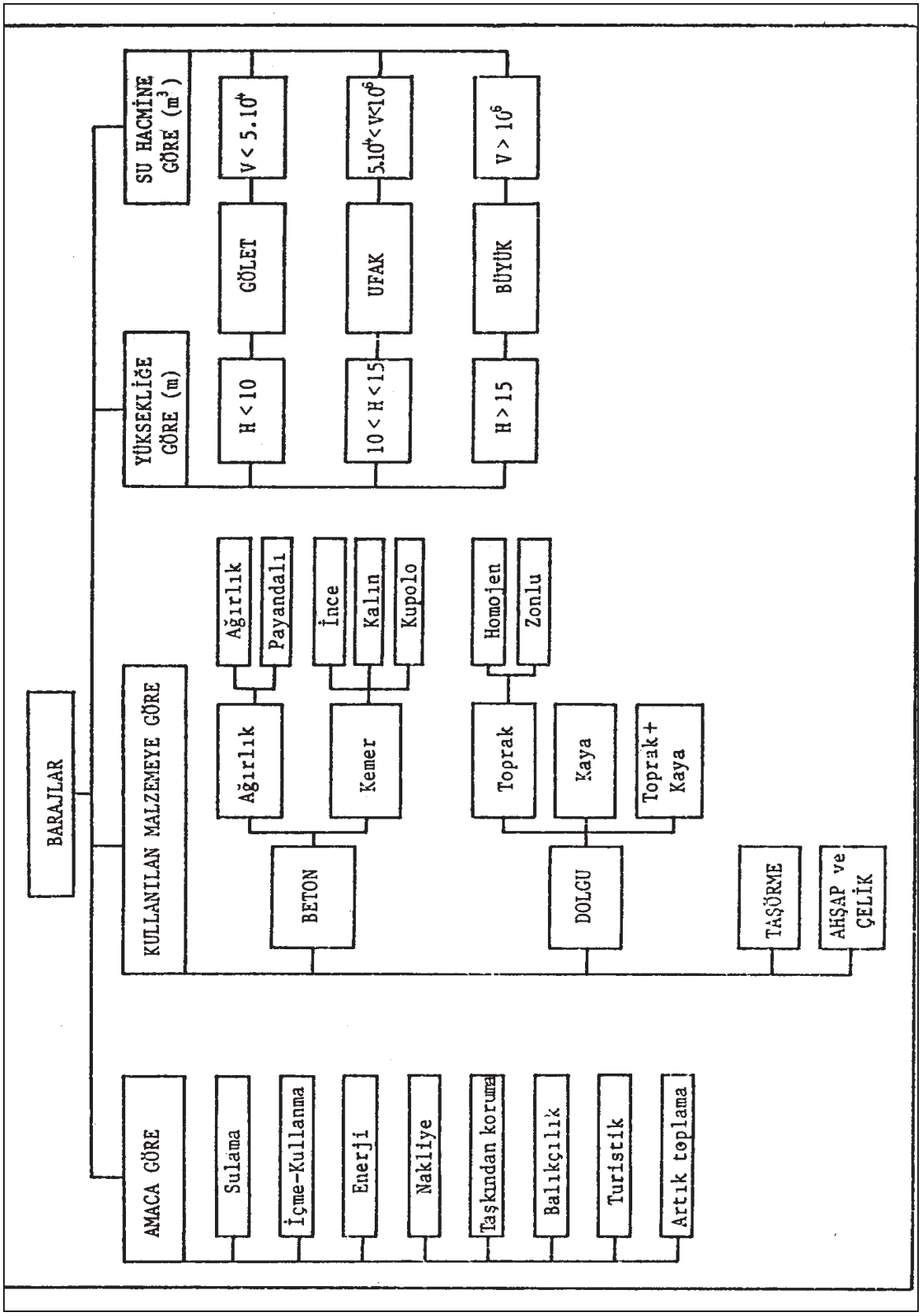
11. BÖLÜM: BARAJLAR ve BARAJ İNŞAATLARINDA JEOLOJİK KRİTERLER

11.1. Giriş

Mühendislik uygulamaları içerisinde, jeolojik kriterlere yeterince önem verilmesi, söz konusu uygulamanın başarıyla gerçekleştirilmesinin yanı sıra, onun ekonomik ömrü süresince mâruz kalacağı doğa olaylarına karşı da başarıyla direnmesini sağlar. Bu bölümde, barajlar sınıflandırılacak ve baraj yapılarındaki yerbilimsel faktörlerin etkilerine değinilecektir. Barajlara bu kitapta yer verilmiş olmasının nedeni mühendislikteki proje büyüklüğü ve önemi açısından en önde gelen uygulamalardan olması yanı sıra, tünel gibi baraj inşaatlarının da bölgenin jeolojik özelliklerinden üst düzeyde etkileniyor olmasından kaynaklanmaktadır. Baraj yapımı ve inşaatı ile ilgili diğer bilgilere inşaat mühendisliği bölümlerinden ulaşmak mümkündür. Başta DSİ kaynakları olmak üzere, ayrıca bu konulara yerbilimleri açısından bir bakış yapan, Erguvanlı (1994), Tarhan (2002) ve Ertunç (2003) gibi yayınlar da söz konusu olgulara mühendislik jeolojisi açısından yaklaşan kaynaklar arasında yer almaktadır.

11.2. Barajlar ve Türleri

Barajlar *(dams)*; enerji üretimi, içme suyu sağlanması, sulama ve taşkın önlemeye yönelik su kaynakları oluşturmak amacıyla akarsu vâdileri üzerinde yapay göller oluşturmak için yapılan büyük su setleridir. Bu su tutma tesislerinin temel amacı, önündeki yüzey suyunu geçirimsiz bir set (bariyer, *barrier, barrage*) oluşturacak şekilde tasarlanan bir baraj gövdesi ile tutmaktır. Barajlar, amaçlarına (enerji, sulama, atık toplama gibi) ya da yapımlarında kullanılan malzemeye göre beton; dolgu; taş örme (kâgir); ahşap ve çelik olarak sınıflandırılırlar (Şekil 11.1).



Şekil 11.1. Barajların değişik açılardan sınıflandırılması (Tarhan, 2002).

Beton ve Dolgu Barajların Kısımları'nın tariflenmesinde ortak terimler kullanılır (Tarhan, 2002): Şekil 11.2'de görüldüğü gibi bunlar:

1- Abatman *(abutment*) : Sanat yapısının yatay ya da düşey yüklerini taşıyan ayak, ya da barajın üzerine inşa edildiği vâdinin her iki tarafındaki destek, vâdi yamaç ve duvarları.

2- Vâdi kesiti *(river-channel section)*: Baraj gövdesinin akarsu yatağında oturduğu kesimin enine kesiti.

3- Baraj memba eteği *(heel of the dam)*: Barajın memba yüzünün temel kayasına oturduğu kısım.
Memba *(upstream)*: Suyun baraja, ya da sanat yapısına geldiği taraf, kısım.

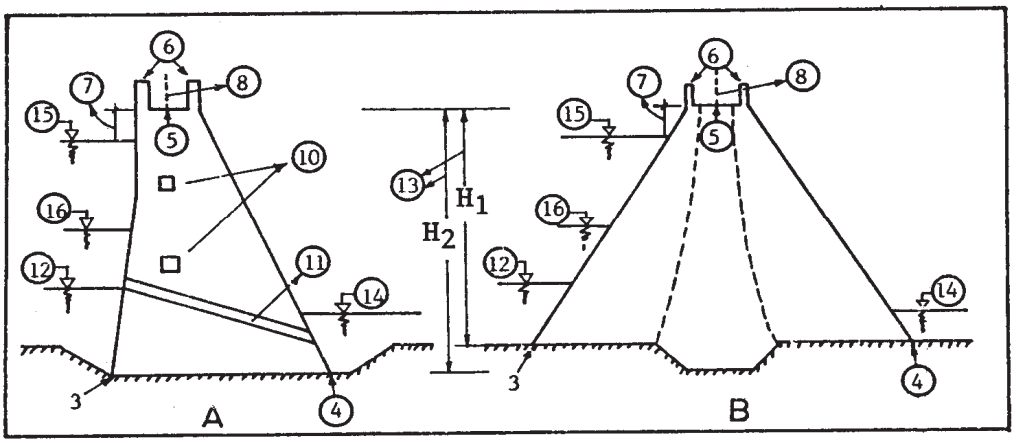
4- Baraj topuğu *(toe of the dam)*: Barajın mansap yüzünün temel kayasına oturduğu kısım.
Mansap *(downstream)*: Akış aşağı, suyun barajdan, ya da diğer sanat yapılarından çıktığı taraf.

5- Baraj tepesi (kret; *crest*): Barajın en üst kısmı.

6- Kenar duvarı *(parapet)*: Baraj tepesinin her iki kısmında dalga veya trafik emniyeti için yapılan duvarlar. Bu duvarlar baraj tepesinin yol olarak kullanılması hâlinde emniyetli trafiği sağlamaktadır.

7- Serbest kısım *(freeboard)*: Baraj tepesi ile barajın taşkındaki maksimum su seviyesi arasında kalan kısım, mesafe. Bu kısma dalga payı ya da emniyet payı denir.

8- Baraj ekseni *(axis of the dam)*: Baraj tepesi yüzeyinin tam ortasından veya barajın memba yüzü tarafından yamaçlara doğru geçirilen hayalî çizgi.



Şekil 11.2. Barajlarda kullanılan terimlerin şematik kesitlerde gösterilmesi.
Beton Baraj (A), Dolgu Barajı (B) (Tarhan, 2002).

9- Baraj kesiti *(dam cross section)*: Barajın eksenine dik kesiti.

10- Galeriler *(galleries)*: Gözlem yapmayı sağlamak için baraj gövdesi içinde, baraj eksenine paralel, dik ve eğik olarak yapılmış açıklıklar (tek ucu açık tünel). Yapılma amaçları, baraj gövdesi yüzeyinden veya temelden çıkacak sızıntı suları drene edip toplamak ve sızıntı fazla olursa önlemek için enjeksiyon *(grout)* yapmak.

11- Dip savak *(outlet conduit)*: Ölü hacminin üstündeki suyu boşaltmaya yarayan tünel. Dip savak, gerekli hâllerde bir kısım suyu ve taşkın sırasında gelen tortuyu (silt) atmak amacıyla kullanılabilir.

12- Ölü hacim yüzeyi *(dead-storage water surface)*: Barajın içinde daimî kalan, boşaltılamayan/atılamayan suyun üst seviyesi. Bu hacim, barajlarda toplanacak silti depolamaya yarar. Ölü hacim: Su yüzeyi altında kalan işe yaramaz hacim.

13- Baraj yüksekliği, tepe yüksekliği *(dam height)*: Talvegten (H_1) ya da temelden (H_2) baraj tepesine kadar olan mesafe, yükseklik (Talveg/*thalweg*: Vâdinin veya akarsuyun en derin noktası).

14- Kuyruk suyu yüzeyi *(tailwater surface)*: Barajın dolu savak, dip savak ya da türbinlerden çıkan suyun mansaptaki yüzeyi.

15- Maksimum su yüzeyi *(maximum water surface)*: Baraj göl alanında (rezervuar) su seviyesinin en yüksek olduğu (dolu savaktan akmadan) seviye.

16- Minimum su yüzeyi *(minimum water surface)*: Baraj gölünde, faydalı şekilde kullanılabilecek en düşük su yüzeyi.

17- Dolu savak *(spillway)*: Baraja maksimum su seviyesinin üstünde gelen taşkın sularını baraj gövdesine ve göl alanının yamaçlarına zarar vermeden boşaltmaya yarayan kanal. Dolu savaklar baraj gövdesinin üstünde, yanında, tabanda, yamaç içinde veya rezervuarda olabilir. Dolgu barajlarda gövdede az veya çok oturmalar olabileceği için bu tür barajlarda hiçbir zaman dolu savak gövde üzerinden geçirilmez. Dolgu barajlarda topoğrafik koşulların uygun olması hâlinde dolu savak baraj gölünden ya da baraj gövdesinin oturduğu yamaçlar kazılarak yapılır. Bu tür dolu savaklara yandan çevirmeli dolu savak ismi verilir. Beton barajlarda en basit dolu savak, suyu barajın üstünden aşıran tiptir. Buna üstten akan

dolu savak denir ve baraj tepesi su altında kalır. Üstten kapaklı tipte ise dolu savak barajın üstünde bir köprü, bir açıklık şeklinde olur. Bunlar elle veya otomatik olarak açılır, kapatılır ve su kontrollü olarak boşaltılır. Buna normal dolu savak da denir. Beton+toprak kısımlı barajlarda ise (örn. Keban Barajı) dolu savak, beton kısım üzerine inşa edilir (Şekil, 11.9). Topoğrafik koşulların uygun olmaması, yanda çevirmeli dolu savak yapma imkânı olmayan ya da çok dar vâdilerde üstten dolu savak yapmanın mahzurlu olduğu durumlarda kuyu tipi dolu savak yapılır. Bu tip dolu savak, baraj gölü maksimum seviyesinde huni şeklinde girişi olan düşey ve düşeye yakın betondan yapılmış kuyu (şaft) ve bu kuyunun bağlandığı yine betondan yapılmış, mansap tarafa meyilli tünelden ibarettir. Yatay tünel baraj gövdesi altında olabileceği gibi baraj inşaatı için önceden açılmış olan çevirme tünelinden de yararlanılabilir.

18- Çevirme tüneli, derivasyon tüneli *(diversion tunnel*): Barajın gövde inşaatı sırasında akarsuyun yönünü değiştirmeye yarayan tünel. Derivasyon: Çalışma alanını kuruya almak için suyun yönlendirilmesi işlemi.

19- Batardo *(cofferdam*): Barajın inşaası esnasında akarsuyu çevirme tüneline girmesine yardımcı olan ve akarsuyun inşaat sahasını *(building site)* basmasını engelleyen ufak barajlar. Bu ufak barajlar, memba ve mansapta olmak üzere iki adet bulunur (Tarhan, 2002).

Bölüm başlangıcında da bahsedildiği üzere kullanılan malzemeye göre, “beton” ve “dolgu barajları” olarak kısımlara ayrılıp incelenen barajlardan beton barajlara ait **Ağırlık Barajları**: “Ağırlık” ve “Payandalı Ağırlık”; **Dolgu Barajları** *(fill dams)* ise “Toprak”, “Kaya”, “Toprak+Kaya” barajlar olarak sınıflandırılmaktadır.

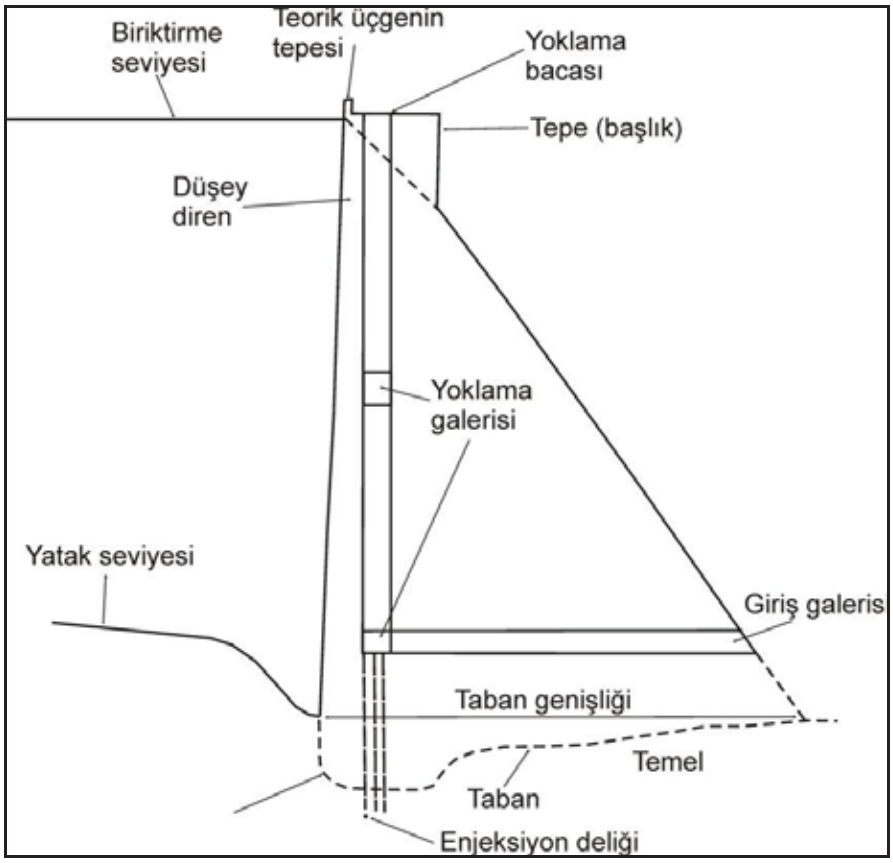
Ağırlık barajları *(gravity dams)***:** Suyun kaldırma ve döndürme kuvvetine karşı kendi ağırlıklarıyla duran masif yapılardır. Eskiden taşla, bugün ise betonla yapılan ağırlık barajlarının (**beton ağırlık barajı**, *concrete gravity dam*) eksenleri doğru şeklinde ya da Diyarbakır’da Fırat Nehri üzerinde Karakaya ve Adana’da Ceyhan Nehri üzerinde kurulu Berke Barajlarında olduğu gibi, akış yukarı doğru hafifçe kavisli, yani beton kemer-ağırlık barajı *(concrete arch-*

gravity dam) tipinde olabilir. Ağırlık barajlarının inşa edileceği temel kayasının sağlam olması yanında, tepe uzunluğu-yükseklik oranı “5” ve daha az, taban genişliğinin ise yüksekliğin 2/3’ü kadar olması istenir. Geniş kanyon tipi vâdiler, ağırlık barajları yapımı için en ekonomik ve uygun olanlardır. Vâdi yamaçları az eğimli, geniş ve “V” şekilli olabilirler.

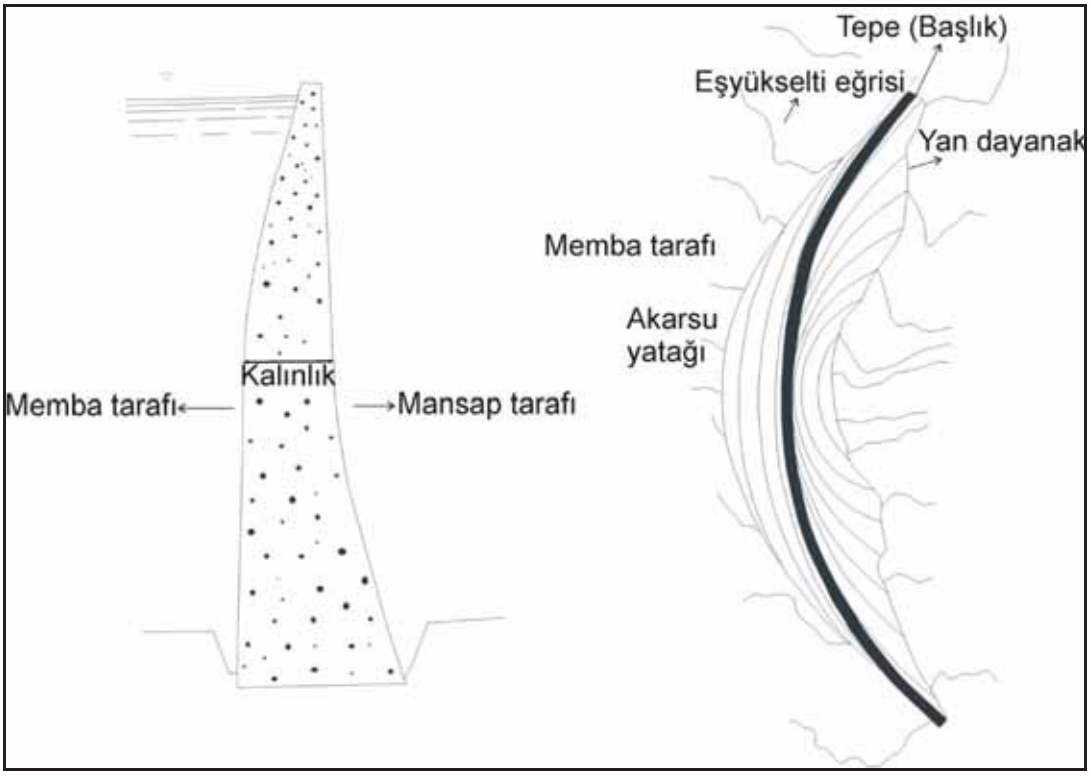
Payandalı (destekli) **ağırlık barajları** *(buttress gravity dams)***:** Su basıncına karşı koymada düz ya da hafif eğimli bir duvar ve duvarı takviye eden desteklerden ibarettir ve su basıncı, payanda (destek, *buttress*) vasıtasıyla temele aktarılır (Şekil 11.6.B ve C). Bu tip barajlarda daha az malzeme ve beton kullanılmakta, daha az kazı yapılmakta olup geniş kanyon şekilli vâdiler için uygun ve ekonomiktirler. Zira payandalı ağırlık barajlarında, ağırlık barajlarına oranla daha az beton gider. Ancak bu barajlarda kaliteli beton dökme ve kalıp işçiliği önemlidir. Payandalı barajlarda yükler, payandalar yardımıyla temele aktarıldığından, payandaların altına gelen kesimlerdeki kayaların mukavemetinin yüksek olması istenir. Payandalar dışındaki temel kayaçlarına fazla yük binmeyeceğinden, barajın bu kısımları zayıf, ancak güvenli taşıyabilme özelliğine sahip temel kayaçları olması tercih edilir.

Kemer barajlar *(arch dams;* Alm.: Bogenstaumauer): Membaya doğru (rezervuar) kavisli olan tek bir beton duvardan oluşan su tutma tesisidir. Beton kemer *(concrete arch)* türünde inşa edilen barajlara, Oymapınar Barajı örnek olarak verilebilir. Kemer barajlarda suyun basıncı, barajın kavisli geometrisi nedeniyle kemerlenerek vâdinin yamaçlarına iletilir. Yükün büyük bir kısmı kemer etkisiyle yamaçlara iletilebiliyor ise buraya ince kemer baraj; basınç, temele ve yamaçlara eşit dağılıyorsa, baraj kemer-ağırlık veya ağırlık-kemer olarak yapılabilir. Kemer barajda, kemerin kenetleneceği yamaçtaki kayaçların çok sağlam ve süreksizlik yüzeyleri ise kemerden gelecek yüklere dik olmalıdır.

Ağırlık ve kemer tiplerinde inşa edilen beton barajlarda geçirimsizlik, suyun önüne bir beton duvar örülerek sağlanmaktadır (Şekil 11.3, 11.4, 11.5, 11.6.A/B/C).



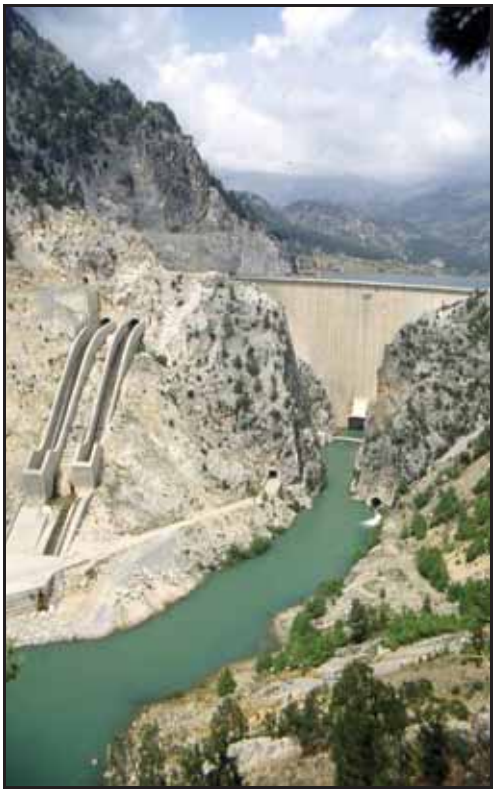
Şekil 11.3. Bir beton ağırlık barajı kesiti (Ertunç, 2003).



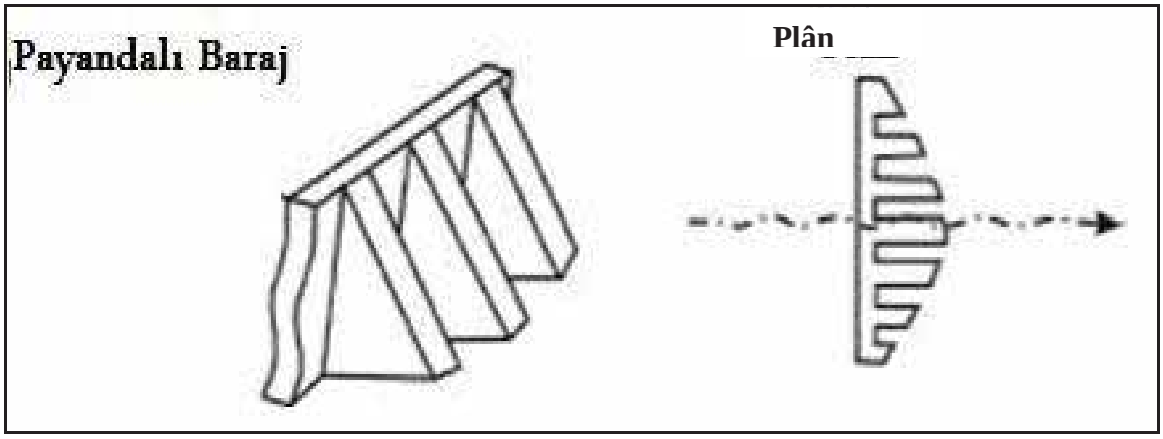
Şekil 11.4. Bir kemer baraj ve kesiti (Ertunç, 2003).



Şekil 11.5. Beton kemer-ağırlık türü barajlara örnek; Fırat Nehri üzerinde inşa edilmiş Karakaya Barajı (Ertunç, 2003).



Şekil 11.6.A) Antalya-Manavgat Çayı üzerinde, beton kemer türünde inşa edilen Oymapınar Barajına, akış aşağıdan bakış. Yeraltı santrali, dolu savaklar (önce tünel, sonra kanal şeklinde) sağ yamaçtadır. Dip savak, barajın mansap topuğuna yakındır.
Bir barajın sağ ve sol yanları ya da yakaları ifâdesi; baraj gölünden baraja doğru veya barajdan suyun aktığı mansap tarafına bakıldığındaki yan yamaçlardır.



Şekil 11.6.B) Bir payandalı ağırlık barajının şematik görünüşü.

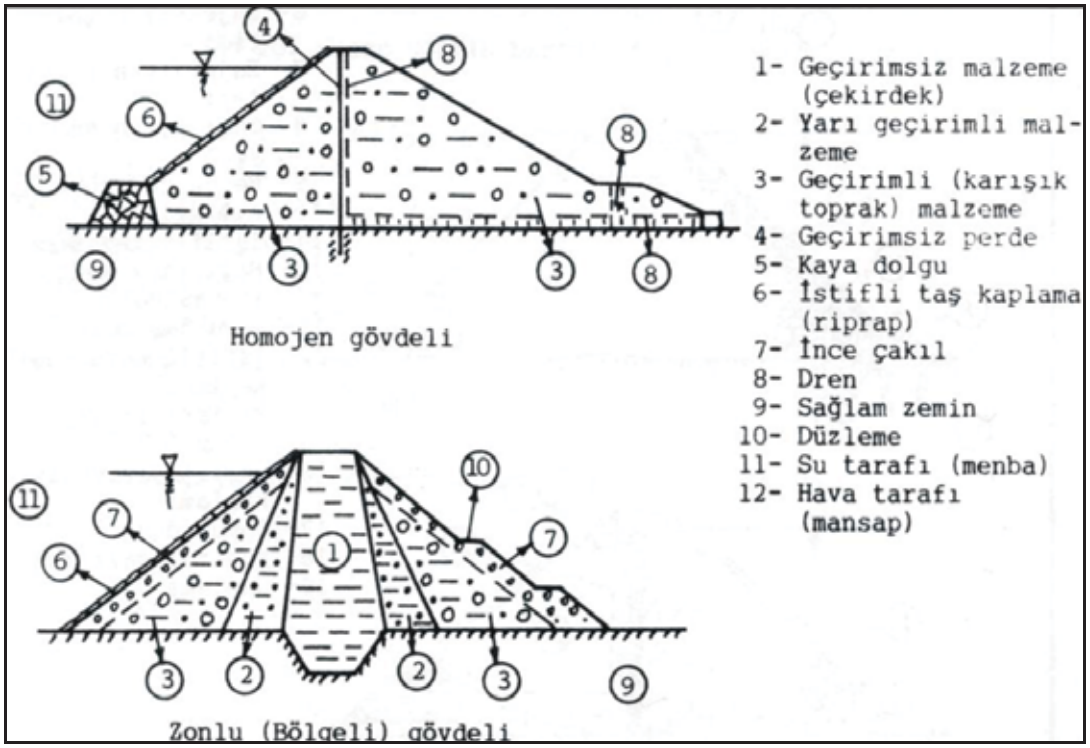


Şekil 11.6.C) Elmalı II Barajı. Payandalı ağırlık barajı olup İstanbul Çavuşbaşı akarsuyu üzerinde içme-kullanma suyu amaçlı inşa edilmiş ve temelden yüksekliği 49 m olan baraj, 1955 yılında kullanıma açılmıştır.

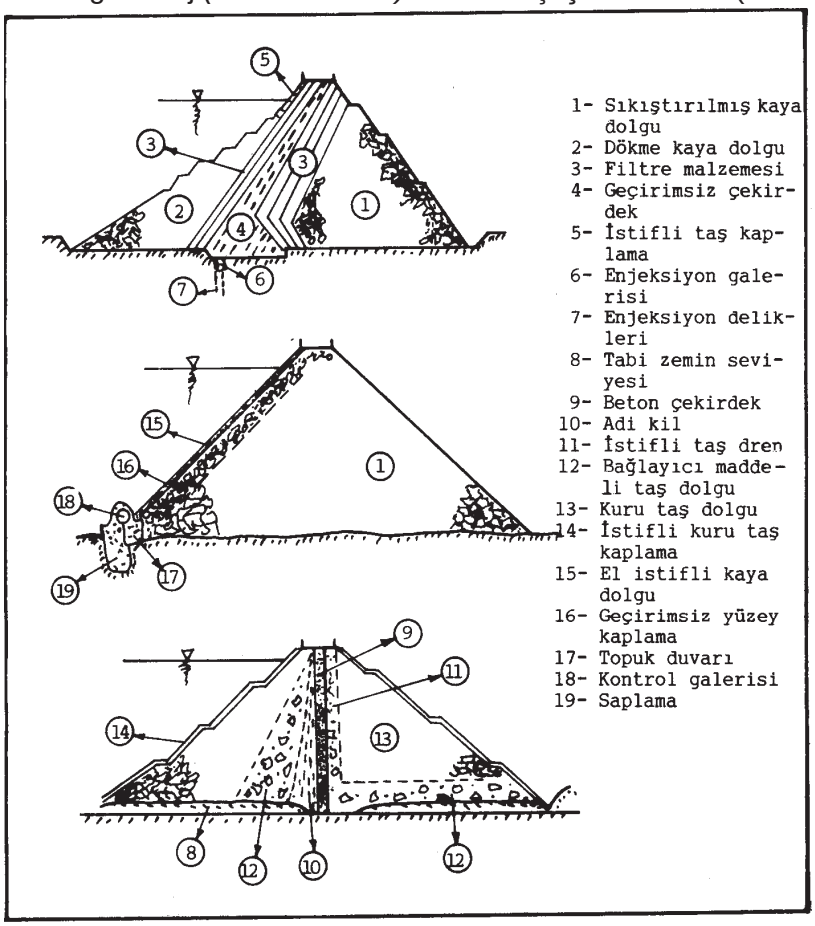
Dolgu barajlar *(fill dams)*: Bloktan kil boyutuna kadar ayrık (zemin) malzemelerden yararlanılarak yapılan su tutma yapılarına '**dolgu baraj**'lar denir. Dolgu barajlar; **a)** Kil çekirdekli ve sıkıştırılmış topraktan oluşan homojen ya da zonlu **toprak barajlar** (*earth dam*, Şekil 11.7) ve **b)** Geçirimsiz bir zon ile sıkıştırılmış ve kaya dolgu yüzdesinin hâkim olduğu granüler malzeme ile inşa

edilmiş olan **kaya dolgu barajlar** *(rockfill -embankment- dams)* olarak sınıflandırılırlar (Şekil 11.8). Suyun tutulma işlemi, genellikle barajın orta ekseninde bulunan ve geçirimsiz malzemeden oluşan bir perde veya dolgu zonu tarafından sağlanır. Bu tür barajların engelledikleri suyu tutabilmeleri ise barajın sahip olduğu geniş tabanlı büyük dolgu kütlesinin sağladığı direnç ile mümkün olur. Bu tip barajlar, zeminin yeterince sağlam ve homojen olmaması hâlinde veya geniş ve yayvan vâdilerde tercih edilir. Kayaç ortamlarında da görülebildiği gibi, dolgu baraj gövdelerinde de sızıntı erozyonunun oluşmamasına dikkat edilmelidir. Sızıntı erozyonu olarak adlandırılan erozyon sürecinde, sızma kuvvetleri zemin içindeki ince tanelileri ve bağlayıcı çimentoyu yerinde ayırıp taşıyarak boşluk gelişimine neden olur. İçsel erozyon biçimi ya da yeraltı suyu erozyonu olarak adlandırılan mekanizma dolgu barajlarda "borulanma" (pınarlaşma) olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir ifâde ile sızan suyun devamlı olarak zemin partiküllerini yıkayarak veya aşındırarak geride tüpümsü büyük boşluklar (borular) bırakmasına **borulanma** *(piping)* denir. Sızma nedeniyle oluşan borulanma, farklı hidrolik yüksekliğe sahip iki nokta arasındaki hidrolik eğim farkından dolayı meydana gelir. Erozyon, zemin içinde de mevcut bir boşluk veya yüksek geçirimli bir bölgede başlar, akış yukarı genişleme ile zemin içinde boşluklar yaratır. Devam eden süreçte oluşan duraysızlıklar nedeniyle boşluklar gelişir. Bu boşluklar hızla büyür ve yapı kısa sürede göçer. Barajlar için borulanmada kritik bölge çoğunlukla baraj topuğunun köşesidir. Bu bakımdan borulanmaya karşı güvenlik katsayısı *(safety factor,* Sicherheitsfaktor*)* yüksek seçilmeli, dren malzemesinin de dolgu barajda iyi bir filtre ile donatılması gerekmektedir.

Geçirgenlikleri düşük ve likit limitleri yüksek olan killi malzemeler; gerek boşluk suyu basıncı doğurabildiklerinden ve gerekse işlenmeleri güç olduğundan ve de büyük hacim değişiklikleri gösterdiklerinden kullanılmaları tavsiye edilmez. Bu yüzden $k=10^{-8}$ cm/sn'den düşük geçirgenlikli zeminlerle, likit limiti *(liquid limit)* % 50'nin üzerinde olan malzemeler genellikle toprak dolguların ana geçirimsiz çekirdeklerinde kullanılmamaktadır.



Şekil 11.7. Toprak dolgu baraj *(earth fill dams)* türleri ve çeşitli kısımları (Tarhan, 2002).



Şekil 11.8. Kaya dolgu baraj *(rockfill -embankment- dams)* türleri ve çeşitli kısımları (Tarhan, 2002).

Barajlara oranla daha az su tutan (en fazla $5x10^4$ m^3) değişik amaçlarla inşa edilen su yapıları da vardır. Bunlar; çoğunlukla ufak akarsular ve kuru dere yatakları üzerinde ya da yer altında yapılırlar. Bu tür yapılar başta göletler olmak üzere, sel kapanları, regülâtörler, vâdi dışı depolama ve yeraltı barajlarıdır.

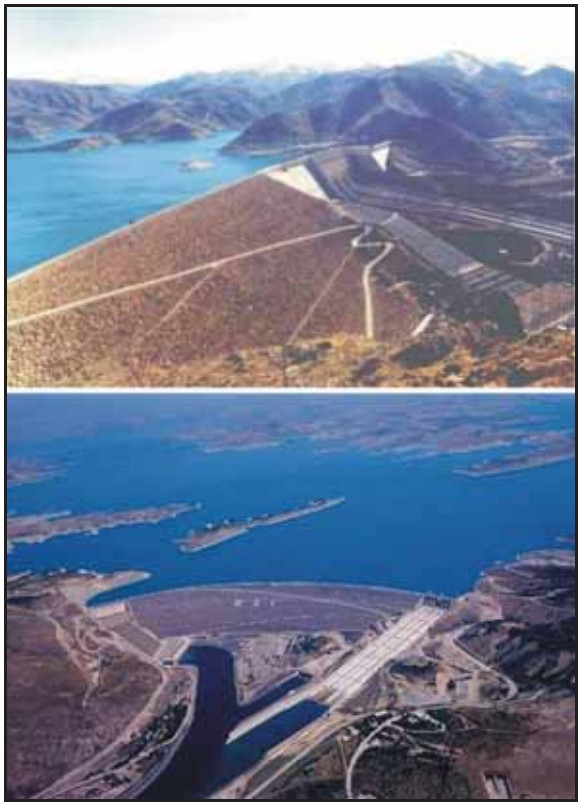
Gölet; yükseklikleri 10 m - 15 m ve daha küçük ya da topladıkları su hacmi $5x10^4$ m^3 ve daha az olan, çoğunlukla homojen gövdeli toprak dolgu türünde yapılan su tutma yapısıdır. Göletler, kurak-yarı kurak bölgelerde, susuz ya da çok az sulu vâdilerde, sulama, taşkın önleme amacıyla inşa edilir.

Sel kapanları; sağanak şeklinde olan yağış sularını tutarak, yerleşim alanlarını ve ovaları taşkın sularından koruyan su tutma yapılarıdır. Tutulan su daha sonra dip savaklarla kontrollü olarak boşaltılır.

Regülâtörler; akarsu yatağında, akarsuların yolunu çevirmede kullanılan su yapılarıdır. Taş örme ya da betondan yapılan bu yapılar, akarsuyu sulama kanalına, hidroelektrik santralleri, tünel ya da kanallarına akıtılmasında kullanılır.

Yeraltı barajları; daha çok kumlu-çakıllı alüvyonlarla dolu vâdilerin uygun yerlerinde yer altında geçirimsiz bir perde inşaasıyla oluşturulan ve buharlaşmanın fazla olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde yüzeyde oluşan yağış sularının yer altında toplanabilmesi amacıyla yapılan su tutma yapılarıdır (örn. ASKİ, Ankara-Elmadağ Yeraltı Barajı, 2012).

Bir bölgede hangi baraj tipinin seçileceğine karar verilmesindeki en önemli faktörlerin başında, barajın yapılacağı akarsu vâdisinin topoğrafik kesiti ve vâdinin çevresindeki kayaçların jeolojik özellikleri gelmektedir. Meselâ, Oymapınar Barajı, üzerinde kurulduğu Manavgat Çayı vâdisinin kireçtaşları içerisinde gelişmiş dar bir vâdi profiline sahip olması ve bölgedeki kayaçların mukavemetli olması nedeniyle beton kemer tipi bir baraj olarak inşa edilmişken, daha geniş bir vâdi profiline sahip olan Fırat Nehri üzerindeki Keban Barajı, jeolojik yapı göz önüne alınarak beton ağırlık ve kaya dolgu türü bir baraj olarak gerçekleştirilmiştir. Fırat Nehri üzerinde yer alan diğer bir baraj ise ülkemizin en büyük barajı olan Atatürk Barajı olup kaya dolgu tipinde bir yapı olarak inşa edilmiştir (Şekil 11.9).



Şekil 11.9. Üst resim: Keban Barajı ve hidroelektrik santrali (beton ağırlık/kaya dolgu tipi). Alt resim: Atatürk Barajı ve hidroelektrik santrali (kaya dolgu tipi).

11.2.1. Baraj yapımında mühendislik jeolojisi çalışmaları, baraj tipi ve yeri seçimine etki eden faktörler

Bir akarsu üzerine baraj yapılmak istendiğinde, barajın yeri kesin olarak belirlenmeden önce havzanın jeoloji, mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılarak o yöreye barajın yapılıp, yapılamayacağına karar verilir. Barajın yeri, yüksekliği, teorik olarak akarsudan en fazla faydayı sağlayacak bir plânlama çalışmasıyla tespit edilir. Baraj çalışmalarında projenin esasını, önce keşif ve soruşturma amaçlı jeoloji, jeofizik ve inşaat/geoteknik mühendisleri tarafından birlikte yönetilen **ön çalışmalar** = ön etüt = araştırma = istikşaf, (*reconnaissance investigation)* oluşturur. Baraj yerini oluşturan proje sahasında önceden üniversitelerce, karayolları ve jeoloji kurumlarınca (MTA, DSİ, EİE, TJK, TPAO vb.) yapılmış tüm raporlar, bölgenin genellikle küçük ölçekte bulunan topoğrafik, orman, toprak, jeoloji, mühendislik jeolojisi haritaları, meteorolojik veriler, jeofizik çalışmalar, mevcut sondajlar ve depremsellik bilgileri, baraj yeri, tipi yüksekliği çalışma yöntemlerinin saptanmasını

sağlayacak gibi veriler toplanır (not: barajlar ile ilgili bu tür detaylı bilgiler ve yöntemler, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün "DSİ" Teknik Bültenleri'nde yer almaktadır). Bu verilere ilâveten yapılan ön jeolojik saha çalışmaları sonuçlarına göre, jeoloji mühendislerince baraj yeri, tipi veya yüksekliğinin belirlenmeye çalışılması yanında, ön çalışmalarda ayrıca göl alanının su geçirgenliği, muhtemel siltlenme, baraj yapımında kullanılacak malzeme, tarihî eserler, kıymetli mineral ve maden yerleri, drenaj problemleri üzerinde durulur ve bu bilgilerin toplanmasına ek olarak hava fotoğraflarından da yararlanılır (Tarhan, 2002).

Ön çalışma verileri tamamlandıktan sonra uygun görülen yerlerde **ilk plânlama çalışmaları** *(preliminary)*, yapılabilirlik, yani fizibilite çalışmaları gerçekleştirilir (**Fizibilite,** *feasibility*: Bir yatırım projesi uygunluğu için yapılan araştırmalar). Baraj yerinde ayrıntılı ilk çalışmalar, 1/5.000 ve 1/1.000 ölçekli topoğrafik haritaların yapılmasıyla başlar. Proje mühendisi ile jeoloji mühendisi, ilk plânlama çalışmaları için baraj yeri (aks) ve çevresinde araştırma programı hazırlarlar.

İlk plânlama çalışmaları içinde uygun görülen yerlerde; baraj yeri, baraj gölü (rezervuar), baraj yerinin su tutma derecesi, yağış alanı *(catchment area)* çalışmaları, baraj gövdesi, santral binası, dolu savak, çevirme tüneli gibi baraj ve barajla ilgili yapıların yerleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılır. Yüzey ve yeraltı jeolojik durum, jeomorfolojik ve topoğrafik özellikler, depremsellik, malzeme özellikleri ayrışma, çatlak fay ve fay zonları, yüzey ve yeraltı suları ve kimyasal özellikleri, yapılara zarar verip vermeyeceği, baraj yapımında kullanılacak malzeme türleri ve bunların inşaat sahasına uzaklığı ve yakınlığı, emniyet, maliyet ve zaman göz önünde tutularak detaylı bir rapor hâline getirilir.

'Ayrıntılı jeoloji çalışmalar'da; jeoloji mühendisinin hazırladığı rapora göre, baraj yeri, tipi yüksekliği kesin saptanarak daha detaylı araştırmalara başlanılır ve baraj yeri, göl alanı, malzeme, yağış alanı çevre sorunları tek tek ele alınır. İnce detayları gösteren büyük ölçekli topoğrafik haritalar üzerine amaca yönelik 1/5.000 ve 1/1.000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritaları üretilir ve bu haritalar raporda belirtilir. Haritalarda:

-Kayaçların litolojik özellikleri (türleri, yayılışları, sınırları),

-Yapısal özellikleri (tabaka, fay, çatlak, kıvrım bindirme vb.),

-Yamaçlarda stabiliteye ilişkin heyelânların işaretlenmesi,

-Kayaçların geçirgenlikleri, kaynaklar ve debileri,
-Baraj yeri yeraltı su derinliği, akış yönü ve kimyasal bileşimi,
-Kayaçların ayrışma derecesi ve ayrışma derinliği,
-Baraj yerinin depremselliği

gibi özelliklerden bir veya birkaçı gösterilebilir. Haritalarda laboratuar deneyleri için alınan örnek yerleri, sondaj, galeri, tünel, yarma, baraj gövdesi, dolu savak, çevirme tüneli ve santral binası yerleri işaretlenir, sahanın iki ve üç boyutlu görünümünü sağlayan jeolojik kesit ve blok diyagramlar ile bu haritalar yanında jeofizik haritalar (sismik ve rezistivite) hazırlanır. Bu çalışmalar yanında, hidrolojik ve hidrolik durum, malzeme sağlama imkânları, memleketin ekonomik durumu, proje kalitesi, işçilik durumu, iklim ve inşaat mevsimi süresi kesinleştirilir, arazi ve laboratuar deneyleri, sondajlardan elde edilen veriler hazırlanan ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritalarıyla birlikte detaylı geoteknik etütler yapılarak rapor hâline getirilir.

Baraj yeri ve göl alanındaki kayaçların litolojik (cinsleri) ve yapısal özellikleri (tabakalanma, kıvrım, fay, çatlak takımları, yapraklanma) çok önemlidir. Taşıma gücü, su tutma özelliği ve kayaçların suyla temasta olabilecek değişimleri detaylı bilinmelidir. Bunun için baraj yeri ve havzasında topoğrafik ve jeolojik durum öncelikle ele alınmalı, hazırlanmış 1/25.000 ölçekli jeoloji ve mühendislik jeolojisi haritaları daha detaylı olarak göl alanında 1/10.000 ile 1/5.000; baraj gövde çevresinde ise 1/1.000 ile 1/500 arası değişen ölçeklerde yapılmalıdır. Haritalarda litoloji ve yapısal özellikler yanında karstik yapılar, kayaların su sızdırma durumu, ayrışma derecesi, erime, yeraltı suyu tablası haritası, suların kimyasal analizi, komşu havzalara su kaçağı ihtimalî, göl alanının duraylılığı, deprem durumu, su altında kalacak doğal yer altı servetleri ve tarihî eserler ayrıntıda saptanmalıdır.

Barajın yapımından sonra akarsuların blok, çakıl, kum, silt, kil gibi taşıdığı malzeme baraj gölüne gelirken, iriden ufağa doğru çökelmeye ve baraj gölünü yavaş yavaş doldurmaya başlar ve bu durum baraj ömrünü kısaltır. Eğer, bitki örtüsü az ise erozyon daha da fazla olur ve sağanak yağışları izleyen sellenme ile daha çok malzeme gelir. Baraj gölünde toplanan bu malzemeye silt; olaya **siltlenme** denir. Silt ve kil boyutundaki ince taneli kırıntılar, suyun hızının azaldığı baraj gövdesi dolayında çökelerek bir çamur *(mud)* oluştururlar. Zamanla birikerek kalınlığı artan çamur, baraj eksenine

daha fazla basıncın gelmesine neden olur. Siltlenme yanında, baraj ağırlığı, hidrostatik basınç, suyun kaldırma kuvveti *(buoyancy, uplift)*, buz basıncı, deprem etkisi, dalga etkisi bir barajın gövdesine etki yapan diğer kuvvetlerdir.

Baraj yapımında kullanılacak malzeme; yakında, yeterli miktarda, şartnamelerde belirtilen iyi kalitede olmalı, aynı zamanda malzeme sahasının da baraj yerine uzaklığı en çok 8 km olması tercih edilmelidir. Temel kazısından çıkan malzemenin ne kadarının gövdede kullanılacağı bilinmeli, yeterli çimento ve agrega malzemesi yok ise beton barajdan vazgeçilip dolgu baraj yapılmalıdır. Baraj ve havzasının varlığını sürdürebilmesini sağlayacak bu bilgiler, jeoloji-mühendislik jeolojisi haritaları ve bunlardan elde edilecek olan kesitlerinin doğruluğu ile orantılıdır.

Baraj yeri kayaçlarının tüm özelliklerini saha gözlemleri ve sondajlarla açıklığa kavuşturmak her zaman mümkün olmadığından birkaç m genişlik ve derinlikte, 10 m - 20 m uzunlukta **yarmalar**; yaklaşık 1 m – 1,5 m çaplı; 15 m-20 m derinliklere ulaşan **kuyular** (şaft) açılarak incelemeler yapılır. Bunların yanında, baraj yeri araştırmalarında özellikle karstik ve faylı zonları içeren alanlarda galeri ve tünel araştırmaları önem kazanmaktadır. **Galeri ve tüneller** genellikle 2 m x 2 m, uzunlukları ise 10 m – 50 m arasında değişmektedir ve bunlar jeolojik yapıya ve baraj tipine bağlı olarak yamaçlara dik, paralel, verev ve düşey olabilirler. Galeri ve tünellerde, kayaçların litolojik, yapısal ve mühendislik özellikleri ile mekanik özellikleri, kalıcı gerilmelerin *(residual stress)* saptanması gibi yerinde (*in situ*) yapılan deneylerle mümkün olmaktadır. Galeri ve tünellerde ayrıca fay zonları, su sızıntıları, süreksizliklerin özellikleri ayrıntılı olarak belirlenir. Aynı zamanda tünel kayası sınıflamasında kullanılan sınıflama parametrelerinin ve bunlara bağlı olarak destek türü saptanmasına, jeolojik açıdan yer üstünde görülen kayaçlar ile yer altında karşılaşılan kayaçlar arasındaki ilişkinin açıklık kazanmasına yardım eder.

Vâdi Şekli Faktörü: Baraj yerinin seçimindeki önemli faktörlerin başında vâdi şekli gelmektedir. Vâdi tipleri, üzerlerine inşa edilecek olan barajların tiplerinin de belirlenmesindeki önemli bir kriteri oluşturmaktadır. Bir vâdinin şekillenmesi, vâdinin içerisinde açıldığı jeolojik birimlerin özelliklerine, vâdiyi açan faktöre (buzul, akarsu), vâdinin yüksekliğine, akarsu akış sistemine, vâdi oluş evresinin hangi aşamasında oluşuna bağlı olarak değişir.

Vâdiler:

- Boğaz ya da kanyonlar (U şekilli vâdiler),
- Dar V şekilli vâdiler,
- Geniş V şekilli vâdiler,
- U ile V karışığı vâdiler (⇓),
- V, V karışığı (W) vâdiler,
- Geniş ve düz (∪) vâdiler

olarak gruplara ayrılırlar. Vâdi şekli ve genişliğine göre bazı baraj tipleri hiç düşünülmez. Meselâ, çok geniş bir vâdiye beton kemer baraj yapılmaz. Ayrışmamış, az çatlaklı, kaya ortamından oluşan bir vâdiye ise yapısal unsurlar da uygunsa akla önce kemer tipi baraj ya da ağırlık barajı yapılması düşünülür.

Vâdilerde vâdi genişliği-vâdi yüksekliği oranı karakteristiktir. Bu oran U şekilli vâdilerde 3'den küçük, dar vâdilerde 3-6 arası, geniş vâdilerde 6 veya 7, düz vâdilerde ise 7'den büyüktür. Baraj tipi seçiminde bu orandan yararlanılır ve vâdi şekli faktörü (K) deyimiyle belirtilen sayısal değerler kriter olarak alınır. Bir baraj yapılması düşünülen yerde, baraj tepe uzunluğunun maksimum baraj yüksekliğine olan oranına "**vâdi şekli faktörü**" denir ve "K" ile gösterilir (Şekil 11.10). Vâdi şekli faktörü; vâdinin "V" şekilli olması, yani vâdi taban genişliğinin olmaması (b=0) hâlinde;

$$K = \frac{\text{Tepe Uzunluğu}}{\text{Baraj Yüksekliği}} = \frac{B}{H}$$

veya

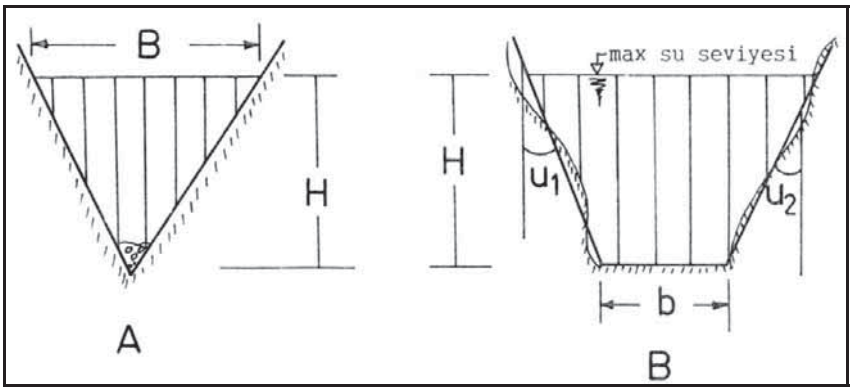
$$K = \tan U_1 + \tan U_2,$$

formülü ile vâdi tabanında bir genişlik olması durumunda ise

$$K = \frac{b + H(\tan U_1 + \tan U_2)}{H} = \frac{b}{H} + (\tan U_1 + \tan U_2)$$

formülü ile hesaplanır. Vâdi şekli faktörü, emniyet, maliyet, baraj yapılacak yerin jeoloji ve tektonik yapısı vb. nedenlere göre farklı ülkelerde değişik değerlerle kabul edilmektedir. ABD'de, kemer baraj için vâdi şekli faktörü K=

5’den, İtalya’da K= 7’den küçük olması istenir. “V” tipi vâdilerin dışında “U” tipi vâdilerde de kemer baraj uygulamaları başarıyla gerçekleştirilmektedir. Akarsuyun memba tarafına *(upstream)* doğru kavisli tek bir beton duvardan oluşan kemer barajlarda, baraj gölünde toplanan suyun yükü, beton duvarın kavisinden dolayı vâdi yamaçlarına (abatmanlara) aktarılmaktadır. Bundan dolayı yamaçları oluşturan kayaçların çok sağlam olması ve kret uzunluğu-yükseklik oranı (K), 5’den küçük olması istenir. Meselâ, kalın kemer barajlarda 3-5, ince kemer ve dom (kupola) tipinde 3’den küçük olması önerilir. Kemer tipi barajlar emniyet bakımından diğer tiplere oranla en iyi olmakla birlikte, kemer baraj için uygun olan bir vâdi, şayet bir aktif fay zonu yakınında yer alıyorsa, barajların emniyet ve stabilitesi açısından kemer ve ağırlık tipi beton barajlara nazaran daha sünek bir yapıya sahip olan geniş ve yayvan şekilli vâdilerde önerilen dolgu tipi barajların yapılması tercih edilmelidir. Geniş tabanlı vâdiler için gelişmiş ülkelerde baraj tipi seçiminde kabul edilen vâdi şekli faktörü $K \leq 4.5$ ise kemer, $K \leq 5$ ise ağırlık, $K > 5$ ise dolgu baraj yapılması önerilmektedir. Geniş U şekilli vâdilerde beton ağırlık; çok geniş (yayvan) vâdilerde ise dolgu barajlar inşa edilmektedir.

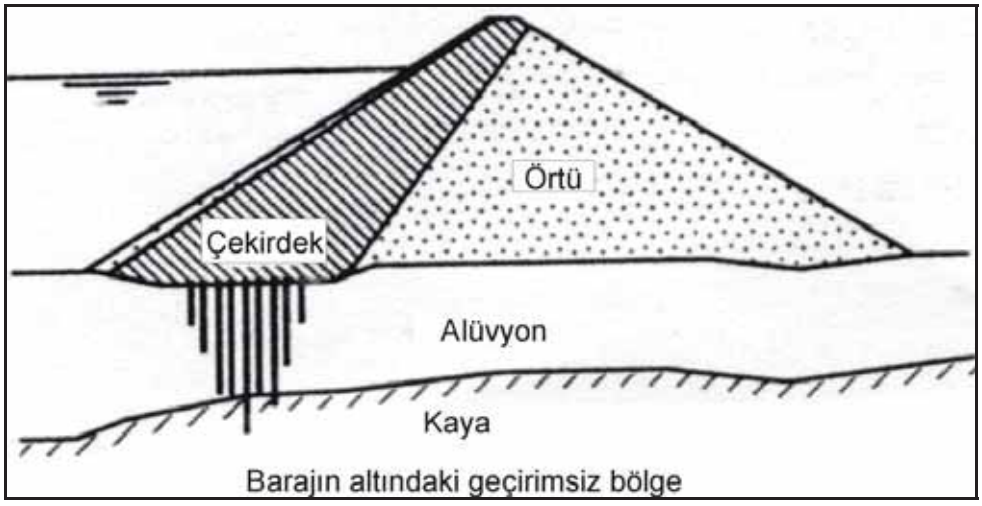


Şekil 11.10. Vâdi şekli ve kısımları (Tarhan, 2002). B=Barajın tepe uzunluğu; b=Vâdinin taban genişliği; H=Baraj yüksekliği; U_1 ve U_2 = Yamaç ortalamalarının düşeyle yaptığı açılar.

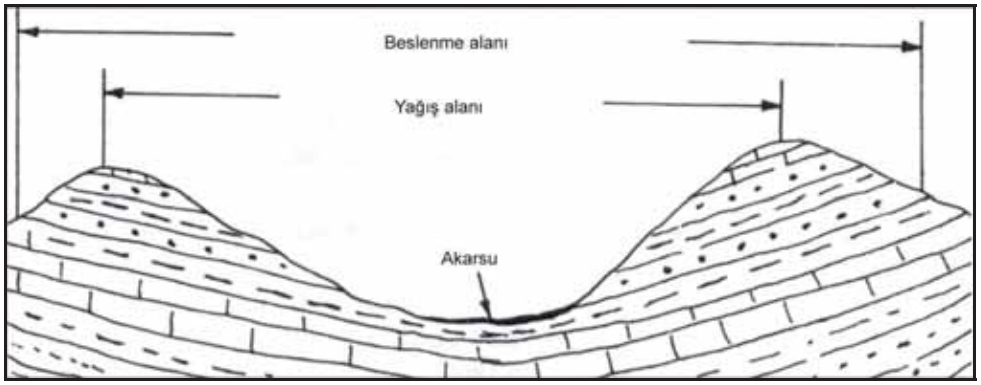
Barajlar, yüzeyde görülen yapıları itibarıyla sadece yüzey sularının akışını engelliyor gibi görünseler bile aslında yüzey altında da devam eden ve yeraltı sularının geçişini engellemek için yapılan bir geçirimsiz perdeye de sahiptirler (Şekil 11.11). Geçirimsiz bir perdenin oluşturulmasının nedeni, barajların önünde oluşan baraj göllerinin suyunun sadece yüzeyden değil, yüzey altından da yeraltı suyu olarak kaçabileceği ve baraj gövdesine zarar verebileceği olgusu, geçirimsizliğin sağlanması ve sızan suyun akım yolunun

uzatılmasıdır. Yeraltı suyu kaçakları, eğer yeterli yüzeysel beslenme yoksa zaman içerisinde baraj gölündeki suyun azalmasına veya tamamen yok olmasına neden olurlar. Baraj göl alanında, vâdi yamaçlarındaki su tablası, barajın maksimum su düzeyinden yüksek ise göl alanından başka havzalara su kaçmaz. Az ise kaçar ve bu nedenle baraj yapımı sırasında bir vâdinin sadece yağış alanı değil, aynı zamanda yeraltı su havzasını da kapsayan beslenme alanı da dikkate alınır. Beslenme alanı içerisinde mümkün olduğunca az su kaçağının olduğu bölgeler baraj yeri olarak tercih edilir. Bu durumda baraj yeri seçiminde, o bölgedeki jeolojik birimlerin porozitesi ve permeabilitesi ile bu birimlere ait tabakaların doğrultu ve eğimleri, süreksizliklerin hâkim eğim yönleri birinci derecede öneme sahip bilgiler arasında yer alır.

Hidrolik ve hidrolojik açıdan baraj havzası detaylı incelenmelidir. Baraj beslenme alanına düşen yağış miktarı ve süresi, göl alanına gelen akarsuları ve kaynakların sıcaklık ve kimyasal özellikleri, akarsuların taşkın debileri ve dalga etkileri, araştırma ve enjeksiyon kuyularında basınçlı su deneyleri, baraj yapılmadan önce başlayan ölçülerle saptanmalıdır. Nehrin maksimum taşkın suyunu boşaltacak uygun bir yere yerleştirilmiş savak yapmak gereklidir. Sıcak bölgelerde buharlaşma da önemli bir faktördür. Yapılan hesaplamalarda yağış alanı ile beslenme alanı birbirine eşit kabul edilir. Hâlbuki bir yağış alanına düşen suyun bir bölümü, jeolojik nedenlerle başka bir havzaya sızabilir ya da tersine, başka bir alandan da su gelebilir (Şekil 11.12).

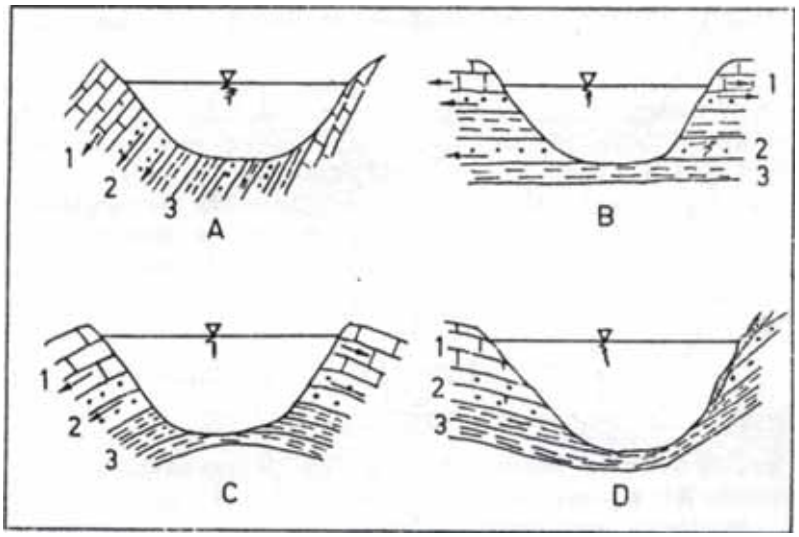


Şekil 11.11. Barajların temelindeki su kaçaklarını önlemek için geçirimli bölgelere yapılan geçirimsiz perde enjeksiyonu (Çatal, 1993).



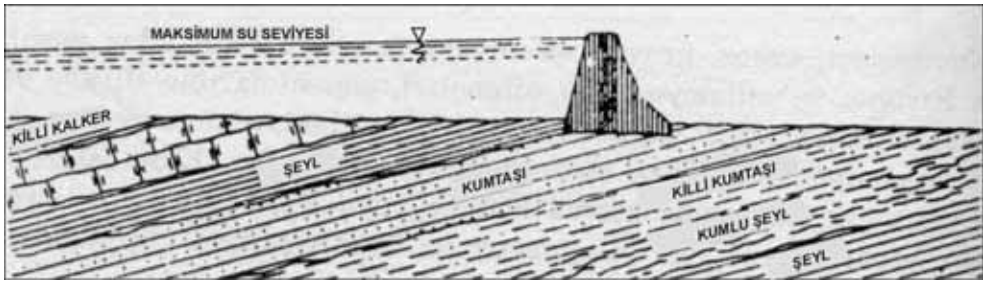
Şekil 11.12. Baraj yapılacak bir havzanın jeolojik yapı ve özelliklerine bağlı olarak değişen beslenme ve yağış alanları (Tarhan, 2002).

Süreksizliklerin (tabaka, çatlak vb.) doğrultusu baraj eksenine dik olduğu durumlarda, baraj gölündeki su geçirimli kayaçlar boyunca baraj gölü dışına kaçacaktır. Şekil 11.13'de görüldüğü üzere; sırasıyla eğik, yatay ve antiklinal yapıları oluşturan "A", "B" ve "C" örneklerindeki tabakalarda değişen mertebelerde su kaçakları oluşacak, eğer bu birimlerin geçirgenliği (permeabilite) yüksek ise baraj gölünde su toplanması mümkün olmayacak veya toplanan su kısa bir süre sonunda barajın iki yanına doğru kaçarak baraj gölü boşalacaktır. "D" kesitindeki geçirimsiz birim tarafından alttan sınırlandırılmış olan örnekteki senklinal yapısı, yeraltı suyunun yanlara doğru kaçmasını engelleyecektir. Ancak baraj mansabına doğru (baraj eksenine dik) uzanan tabakalardan kaçaklar olacaktır.



Şekil 11.13. Tortul kayaçların süreksizlik yüzeyleri doğrultusunun baraj eksenine dik olması durumu; 1: Yarı geçirimli, 2: Geçirimli, 3: Geçirimsiz tabakalar (*Zaruba* ve *Mencl*, 1976; Tarhan, 2002).

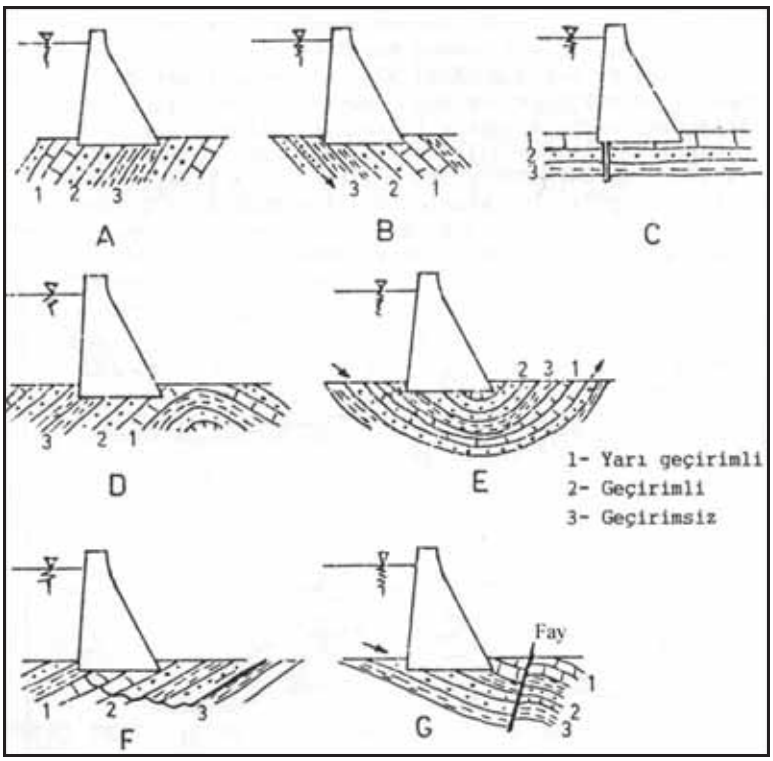
Doğru jeoloji ve mühendislik jeolojisi incelemeleri ile yer seçimi yapılmadan gerçekleştirilen baraj inşaatlarında, barajın üzerine oturtulduğu tabakaların yapısı, baraj gölü suyunun kaçmasına neden olabilir. Baraj gölündeki suyun, barajın altından kaçmasını engellemek için seçilecek baraj yerindeki en uygun tabakalanma, baraj gölüne (memba) doğru eğimli tabakalardan oluşan ve aralarında geçirimsiz katmanların da *(impermeable layer)* bulunduğu bir sistemdir. Diğer bir ifâdeyle, baraj gövdesi geçirimsiz tabakalar üzerinde, süreksizliklerin doğrultusu baraj eksenine paralel ve membaya doğru eğimli ise baraj yeri idealdir. Buna uygun olarak su tutması açısından ideal bir baraj yeri seçimi Şekil 11.14'de verilmiştir. Bu durum ideal bir örnek olduğundan, doğada her zaman bu tür bir yer belirleyebilmek mümkün olmayabilir.



Şekil 11.14. Tabaka doğrultularının baraj eksenine paralel, eğimlerinin membaya doğru olduğu ve geçirimsiz katmanlar dikkate alınarak belirlenen ideal bir baraj yeri.

11.15'te süreksizliklerin doğrultularının baraj eksenine paralel olduğu kesitler Şekil 11.15'te görülmektedir. Temeldeki bu tür jeolojik yapıların yaratabilecekleri muhtemel olumlu ya da olumsuz neticeler değerlendirildiğinde; Şekil 11.15 "A" ve "D" kesitlerinde, 3 Numara ile gösterilen geçirimsiz tabakalar ile diğer tabakaların membaya doğru eğimli olmaları, baraj yeri seçiminde en ideal yeri ve zemin profilini oluşturacağından baraj suyunun, barajın altından mansaba geçmesine ve su kaçaklarının oluşmasına izin vermeyeceği görülecektir. Bu durumda geçirimli kayaçlardaki sızmalar baraj gölüne doğru ve membayı besleyici nitelikte olacaktır. "B", "C" "E", "F" ve "G" kesitlerinde ise önlem alınmadığı takdirde barajın altından değişik düzeylerde su kaçakları meydana gelebilecektir. "B" kesitinde baraj gövdesini ve memba eteğinin geçirimsiz kayaçlar üzerinde yer alması ideal görünmekle birlikte; süreksizliklerin mansaba doğru olması, baraj gölü içinde yer alabilecek herhangi bir geçirimli katman su kaçaklarına neden olabilecek

ya da bu alanda, eğer derindeki yapılar suyun kaçmasına neden olacak şekilde geçirgen ve/veya çatlaklı ise baraj gölünden mansaba doğru su kaybı yaşanacaktır. “C” kesitinde su kaçağı olsa bile yatay tabakalanma ve geçirimsiz tabakanın yüzeye yakınlığı nedeniyle geçirimsiz katmana kadar yapılan geçirimsiz perdenin de etkisi ile baraj gölü suyunun baraj gövdesi altından kaçması engellenebilecek, ancak bu durumda su kaçakları baraj gölünden yan taraflara doğru olacaktır. “E” kesitinde, bir senklinalin üzerinde inşa edilen baraj, tabakaların bu tür geometrisi nedeniyle baraj gölünde yükselen su hidrostatik basıncın etkisiyle sifon yaparak, membadan mansaba doğru su kaçaklarına neden olacak ve mansap tarafında yeni pınarlar oluşacaktır. “F” ve “G” kesitlerinde yer alan tabakalar, fay ve süreksizlik yapılarıyla ilintilidirler. Bu tür yapılarda, süreksizlikler boyunca su kaçakları oluşabileceğinden, süreksizliklere çimento enjeksiyonu *(cement injection)* yapılarak geçirimsizliği sağlayıcı ek önlemler alınmalıdır. Bu önlemler, tabakaların mansaba doğru eğimli olduğu “G” kesitinde daha dikkatlice alınmalı, oluşturulacak geçirimsizlik perdesinin geometrisinin jeolojik ve tektonik yapıya uygun olarak imâl edilmesine dikkat edilmelidir (Şekil 11.15).



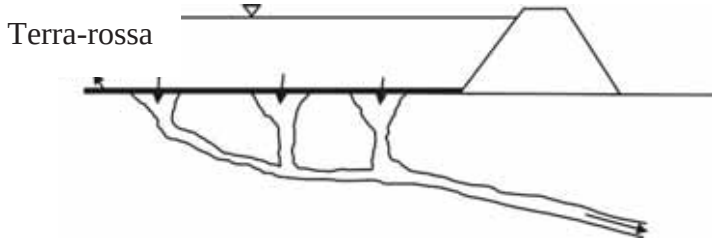
Şekil 11.15. Tortul kayaçların doğrultusunun baraj eksenine paralel ve değişik yönde eğimli olması (*Zaruba* ve *Mencl*, 1976; Tarhan, 2002).

Baraj ve göletlerde, su tutulması açısından tabaka geometrileri ve yapısal faktörler kadar önemli olan bir başka önemli problem ise baraj yapılacak alandaki karstik yapıların varlığı ve bu yapıların yerlerinin tespit edilmesidir. Kireçtaşlarının yeraltı ve yüzey sularının etkisi ile uzun jeolojik dönemler boyunca erimesi (kimyasal ayrışma) sonucu oluşan boşluklar olarak tanımlayabileceğimiz karstlar, yer altında büyük mağaralar oluşturabilecek boyutlara erişebileceğinden baraj göllerindeki suların, çok büyük bir hızla ve yüksek miktarlarda kaybına ve barajın işlevsiz hâle gelmesine neden olurlar. Kayaçların sağlamlaştırılması ve geçirimsizliğin sağlanması amacıyla değişik karışımlı şerbetler enjeksiyonla (zerk etme) kayaçlara gönderilir. Enjeksiyonlar; yapı temeli ile temelin oturduğu kayanın birbirine bağlanması, boşluk ve kırıkların doldurulması, temele gelecek yükün emniyetle taşınması, baraj göl alanı, temeli ve gövdesinden olabilecek su kaçaklarının önlenmesi amacıyla yapılır. Enjeksiyon; konsolidasyon (sağlamlaştırma, pekiştirme) ve geçirimsizliğin sağlanması (perde enjeksiyonu) olarak iki tipe ayrılır.

Anadolu, kireçtaşları ve mermerler bakımından çok geniş alanları kaplayan zengin bir yayılıma sahiptir. Bu bakımdan baraj yeri ve membasında yer alan alanlarda bulunan kireçtaşları ya da mermerler içerisindeki karstik boşluklar nedeniyle barajlarda yaşanan sıkıntılar, ülkemizde sıklıkla gözlenmektedir. Bu örneklerden, May ve Keban barajlarında, May Barajı membanın su tutamaması yüzünden uzun bir süre terk edilirken; Elazığ İli'nin 40 km kuzeybatısında Fırat Nehri üzerinde yer alan Keban Barajı'nda ise temel kayasını oluşturan çok sağlam kayalardan oluşan mermerlerdeki (Permo-Karbonifer) çok önce oluşmuş karstik boşlukların kapatılması için çok büyük masraflar yapılmış, su kaçakları kısmen önlenebilmiş, ancak baraj maliyeti önemli ölçüde artmıştır (Şekil 11.16, 17, 18, 19).



Şekil 11.16. May Barajı. Sulama+taşkın koruma amacıyla yapılan ve talvegden 19 m yüksekliğe sahip Konya, May Çayı üzerinde yer alan May Barajı'nın (toprak baraj) su tutamayan rezervuarı (Ertunç, 2003).



Şekil 11.17. May Barajı'nda kireçtaşının ayrışmasıyla oluşmuş kırmızı renkli toprak (Terra-Rosa) ile örtülü düdenlerden suların kaçması (Ertunç, 2003).



Şekil 11.18. Keban Barajı sol yamaç Petek mağarasında mermerlerde yer alan karstik boşluklardaki su kaçakları (Ertunç, 2003).



Şekil 11.19. Keban Barajı rezervuarından, yer altı karstik boşlukları içinden kaçan suların sifon yaparak Keban Deresi sol yamacından çıkması (Ertunç, 2003).

Barajlarla ilgili su tutma problemleri dışında, baraj yeri jeolojisinden kaynaklanan diğer önemli olumsuzluklar ise aktif fayların üzerindeki veya yakınındaki barajların, fayların hareketi sonucunda hasara uğraması veya yıkılmasıdır. Benzer şekilde baraj yerinin oturduğu taban ve yamaçlardaki geoteknik problemler, bir başka önemli sorunu oluşturur. Önünde biriken büyük su kütlesinin barajda oluşturduğu basıncı (kayma, devrilme, göçme vb.)

karşılayabilmek için ağırlık ve dolgu barajlarda barajın üzerine oturduğu zeminin; kemer barajlar ise kemerlenmenin oluştuğu vâdi yamaçlarının sağlamlığı ve taşıma kapasitesinin yeterli düzeyde olması, değilse; gerekli iyileştirmelerin yapılması, söz konusu barajların duraylılığı ve dayanımı açısından son derece önemlidir.

Barajların karşılaştığı bir diğer önemli mühendislik jeolojisini ilgilendiren problem ise kütle hareketleridir. Baraj göllerinin su tutması sırasında, buna bağlı olarak yükselen yeraltı su düzeyi, baraj gölü yamaçlarındaki zemin içerisindeki boşluk suyu basıncının artmasına, kohezyonun azalmasına ve diğer jeolojik faktörlere bağlı olarak sonuçta yamaçların kütle hareketleri açısından risk altına girmesine neden olabilir. Bu durum, baraj gölünde kütle hareketlerinin oluşmasına ve barajın kayan malzeme ile dolarak ömrünün kısalmasına veya son bulmasına, eğer kayan malzemenin miktarı büyük boyutlarda ise baraj gölünün anîden taşarak mansap tarafında taşkın ve sellenme alanının da oluşmasına (tsunami) yol açmaktadır.

Bu konu ile ilgili olarak baraj inşaat tarihinde karşılaşılan en büyük kazalardan biri, 9 Ekim 1963 tarihinde kuzeydoğu İtalya'da, Venediğin 100 km kuzeyinde yer alan Vayont=Vaiont *(Vajont)* Barajı'nda meydana gelmiştir. Jeolojik incelemeleri 1949 yılında yapılan Vaiont Barajı'nda inşaat çalışmalarına 1956 yılında başlanmış, baraj yapımı devam ederken, eski bir potansiyel paleo-heyelân (eski heyelân) alanında yer alan baraj gölü rezervuar alanı yamaçlarında heyelânlar oluşmaya başlamıştır. Fark edilen ilk aktif heyelân 04 Kasım 1960 tarihinde meydana gelmiş, 700 bin m^3 lük bir malzeme baraj gölüne kaymış, ancak büyük bir zarara neden olmamıştır. Bu tarihten itibaren, heyelânın oluşabilecek ve gelişebilecek olumsuzluklarını incelemek üzere İtalya'nın *Padua* şehrinde yer alan ve 1222 yılında kurulmuş olan Padova (*Padua*) Üniversitesi'nin öğretim üyelerinden oluşan bilimsel ekibi tarafından, baraj ile ilgili olarak heyelân ve önlemlerine yönelik detaylı jeolojik, jeofizik ve geoteknik çalışmalar başlatılmıştır. 1961-1963 yılları arası göl alanı, heyelân riskini ve anîden oluşmasını önlemek için kontrollü olarak birçok defa boşaltılıp tekrar doldurulmuştur. Baraj tamamen doldurulmaya başlandığında 04-10 Eylül 1963 tarihleri arasında, baraj gölünün su seviyesi yükseldikçe, yersel sarsıntılar ve dağ yamaçlarında zaman zaman insanları rahatsız edici boyutta gürültüler oluşmuştur. Bu arada yapılan sondaj ve gözlemlerde,

yamacın önceleri haftada 1 cm, 18 Eylül 1963'de günde 1 cm, büyük heyelânın oluştuğu 09 Ekim 1963'ten birkaç hafta öncesinden de günde 20 cm - 30 cm'ye ulaşan ve giderek artan kayma hareketleri gözlemlenmiştir. Yamaçta çalışma başlangıcında, yeraltı su seviyesindeki değişimleri takip edebilmek ve yapılan hidrostatik basıncı ölçmek için açılan dört adet sondaja piyezometre yerleştirilerek yeraltı su seviyesi ölçümleri alınmıştır. Sondajların sadece bir tanesinde piyezometrik seviyenin göl su seviyesinden daha yüksekte tespit edilmesi ise ölçüm hatası olarak değerlendirildiğinden dikkate alınmamıştır. Heyelândaki kayma hareketinin daha da artarak, dağ boyutunda bir kütleyi hareket ettirebileceği ise uzmanlarca tahmin edilememiştir.

Tepe genişliği 3,4 m, temel genişliği 22,1 m - 27 m arasında, kret uzunluğu 191 m ve 262 m yüksekliği ile yapıldığı 1960 yılında, en büyük beton-kemer barajlardan *(concrete arch)* biri olan 150 milyon m^3 su depolama kapasiteli Vayont Barajı, yapımının ardından baraj gölünde 09 Ekim 1963 tarihinde göl havzası yamacında büyük bir heyelân meydana gelerek baraj gölü toprak ve kaya ile dolmuştur. Su tutma işlemi sırasında da, yeraltı suyunun yükselmesi yanında, o dönemde meydana gelen aşırı yağışların da etkisiyle limit denge durumundaki yamaçta duraysızlık artmıştır. Bunun sonucu, baraj gölünün sol yamacında (=mansaba doğru bakışta soldaki yamaç), 3 km uzunluğundaki bir kesimde, vâdi yamacı güzergâhı heyelân taç bölgesi boyunca vâdiye paralel uzanan eski bir fay zonu ile sınırlanan büyük bir kireçtaşı kütlesi vâdiye eğimli ince bir kil katmanı üzerinde kaymıştır. Kireçtaşı ve kil ara katmanlarının birbirlerine paralel ve baraj göl alanına eğimli olması, diğer bir ifâde ile sağlam kireçtaşlarının birkaç cm kalınlığında simektit, montmorillonit gibi şişme özelliği gösteren kil ara katmanlarını içermesi, bu killerin baraj göl alanının yükselen su seviyesi ile şişip kayma mukavemeti parametrelerinin azalmasına ve boşluk suyu basınçlarının artmasına neden olmuş ve sonuçta heyelânı tetikleyici ana unsurları oluşturmuştur. Jura-Kretase yaşlı kumtaşı, kiltaşı ara katmanlı, kireçtaşlarından oluşan (Alp Dağları) dağ yamacının büyük bir kısmının, kil katmanı üzerinde bir kızak gibi hızla yamaç aşağı kaymasıyla (düzlemsel+dönel kayma) yaklaşık 270 milyon m^3 lük bir zemin+kaya kütlesi baraj gölüne dolmuş, göl hacminin 2/3'ünü doldurmuştur. Yapılan hesaplamalarda, muhtemel bir heyelânda, baraj gölünde maksimum 20 m yüksekliğe ulaşabilecek bir tsunami olacağı hesaplanmış ve baraj gölü

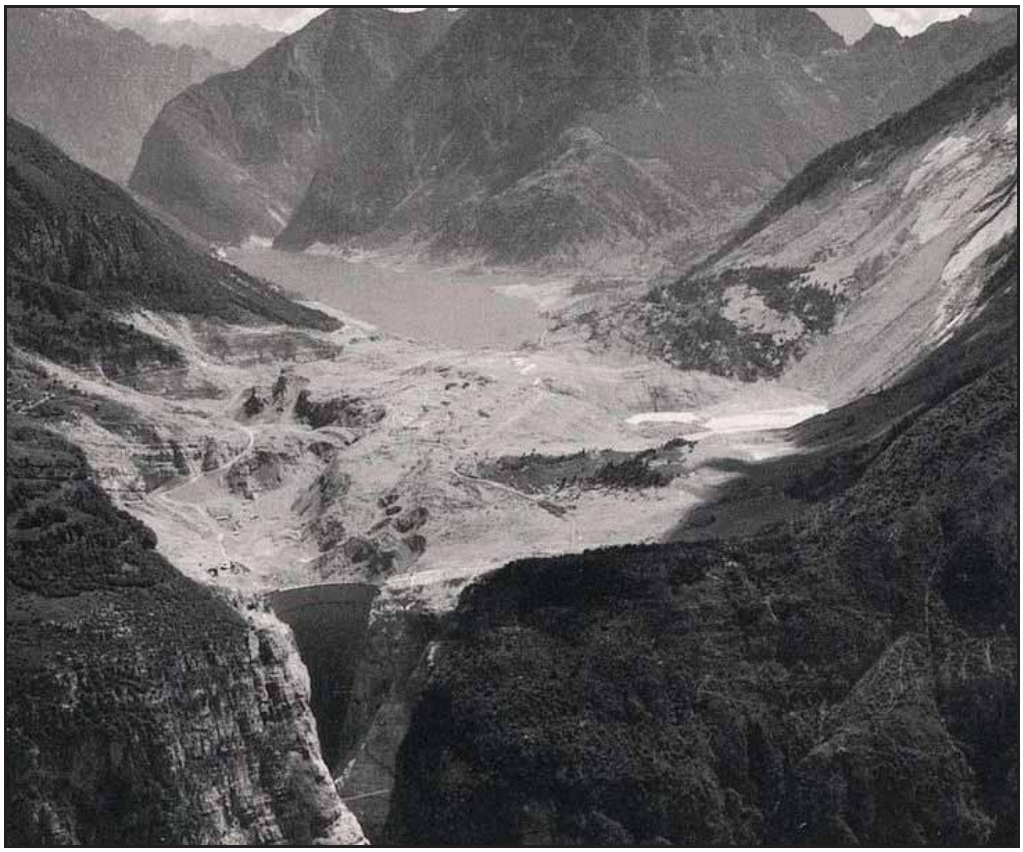
su seviyesi tam doldurulmayarak kret kotundan 20 m aşağısında tutulmuştur. Ancak öngörülenden daha büyük ve daha hızlı, kil üzerinde kayan kireçtaşı heyelân kütlesi saatte 110 km hızla 45 saniye içinde meydana gelmiştir. Kütle hareketinin hemen ardından ise kütle büyüklüğü ve hız nedeniyle baraj gölü suyu hızı da saatte 140 km'ye ulaşarak baraj tepe seviyesinden itibaren 200-250 m arası yükseklikte bir tsunami oluşturmuş, depolama hacmi 150 milyon m^3 olan baraj gölünden 25-50 milyon m^3 arası büyük bir su kütlesi, baraj gövdesinde önemli bir hasara neden olmadan (kret kotu haricinde), baraj gövdesi üzerinden anîden taşmıştır. Tsunami sonucu baraj gövdesi üzerinden taşan su, akış aşağıda 50 m ile 100 m arası kalınlıkta bir su kütlesi oluşturarak su baskını (su taşkını ve sellenme) yaratmış ve barajın mansabında yer alan yerleşim birimlerinde önemli yıkımlar meydana getirerek, 2.000'in üzerinde insanın hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Bu olay, hem büyük hacimli bir heyelânın oluşması açısından hem de barajlarda meydana gelmiş olan felâketler açısından en önemli örneklerden birini oluşturmaktadır. Bugün eski Vayont barajından arta kalan, sadece baraj gövdesi ve gövde arkasında yer yer birikmiş küçük gölcük ve göl içindeki adacıklardır (Şekil 11.20.A, B, C, D, E) .



Şekil 11.20.A) *Vayont (Vajont)* beton-kemer barajı.
(*Emanuele Paolini, 2005. The Vajont Dam Disaster, TeLL-Net Kick-Off Assembly*, *2006, retrieved January 2008)*.



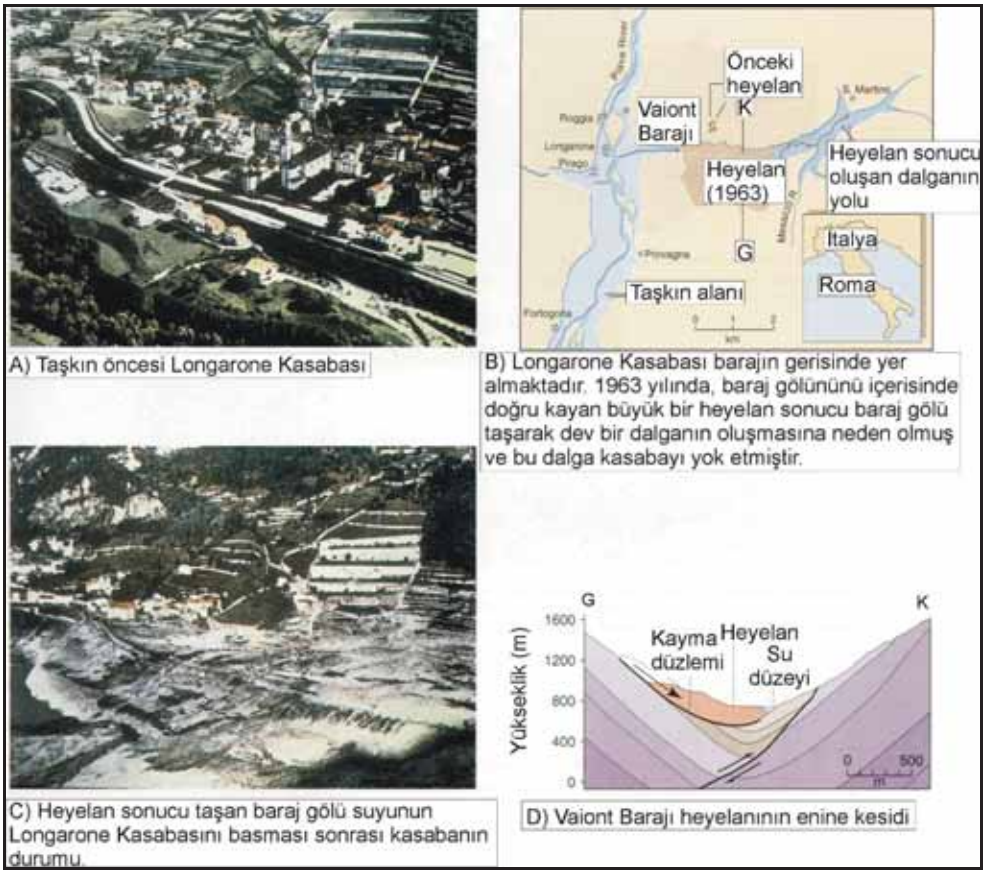
Şekil 11.20.B) *Vayont* Barajı göl havzasında oluşan kütle hareketi ve oklar ile gösterilen kayma yüzeyi. Kayan kütlenin, vâdiye eğimli ve vâdi tabanına yakın anîden dikleşen topoğrafyada, kayma yönünde önü açık süreksizlik üzerinde ve düzlemsel olarak geliştiği görülmektedir (http://de.wikipedia.org/wiki/Vajont-Staumauer, *Casso*, 2005).



Şekil 11.20.C) *Vayont* Barajı'nın 09 Ekim 1963 tarihinde memba (göl alanı) durumu. Heyelândan hemen sonra (http://it.wikipedia.org/wiki/File:Disastro_Vajont.jpg).



Şekil 11.20.D) *Vayont* Barajı, http://www.bellunovirtuale.com/vajont.html, 2005.



Şekil 11.20.E) Vayont Barajı görüntüleri. 09 Ekim 1963 tarihinde, Vayont *(Vaiont)* Baraj Gölü yamacında meydana gelen heyelân sonucu taşan baraj gölü suyunun, barajın mansabında yer alan yerleşim yerlerini basması sonucu, yerleşim yerlerinde meydana gelen can ve mal kaybı ve kullanılmaz hâle gelen *Vayont* Barajı (*Hamblin* ve *Christiansen,* 2004).

Baraj yıkılmalarının % 38'i dolu savak kapasitesinin yetersiz olduğu için suyun baraj üzerinden aşması nedeni ile ya da dolu savağın şiddetli yağışlardan gelen aşırı su karşısında yıkılması yüzünden oluşmaktadır. Yıkılan barajların % 33'ü ise baraj gövdesinde oluşan borulanma ya da sızma nedeniyle yıkılmaktadır. Diğer taraftan barajların % 23'lük gibi bir kısmın yıkılma nedeni; eksik ve yetersiz yapılan jeolojik, jeofizik ve geoteknik araştırmalardan kaynaklanmasıdır. Uzmanlarca yapılması gerekli bu tür araştırmaların eksik ya da yetersizliği; temel problemleri, şev kaymaları, heyelânlar, deprem kaynaklı zemin sıvılaşması ya da rezervuarlarda toprak kaymaları sonucu oluşan tsunami ve taşkın-sel gibi felaketlere neden olmaktadır.

Betonarme Ağırlık tipi barajlarda da yıkılma olabilmektedir. Bu tür barajların gövdesini oluşturan parçalar inşaat sırasında ayrı ayrı kalıbı ve donatısı hazırlanıp, betonu döküldüğü için hatalı işçilik ya da hatalı malzeme vb. yapımlarda, yerinden sökülüp kopabilmektedir. Gedik oluşma zamanı dakikalar mertebesindedir. Betonarme kemer barajlar ise hatalı yapılmaları durumunda, kısa sürede tamamen yıkılma eğiliminde olup birkaç dakikada yıkılırlar.

Sayıları diğer baraj tiplerinden çok daha fazla olan toprak ve kaya dolgu barajlar, anî olarak veya tamamen yıkılma eğilimi göstermezler. Baraj gövdesinde oluşan nihaî gedik genişliği, barajın toplam genişliğinden çok daha kısadır. Ayrıca gedik oluşması çok anî olmayıp, değişik parametrelere bağlı olarak belirli bir süre gerektirmektedir. Bu parametreler arasında baraj yüksekliği, baraj yapımında kullanılan malzemenin cinsi, dâne boyutu, birim ağırlığı, sürtünme açısı, kohezyonu, malzemenin şartnamelere uygun olmayan sıkıştırılma miktarı vardır. Bu tür barajların yıkılması saatlerce sürebilir (Bozkuş, 2004).

11.2.2. Farklı kayaç gruplarının mühendislik özelliklerinin baraj yapımına etkisi

3. Bölümde de tanımlandığı üzere kayaçlar orijinlerine göre, mağmatik, metamorfik ve sedimenter (çökelik, tortul) kayaçlar olarak üç ana grup altında toplanmaktadır. Kayaçlar, litolojilerine, oluştukları ortama, tektonizma etkilerine, ayrışmaya ve zamana bağlı olarak değişik mühendislik özellikleri

gösterirler. Aynı grup içinde yer alan aynı tür mineralden oluşan kayaçlar bile birbirlerine çok yakın bulundukları ortamda da, kendi aralarında mineral dizilimleri, büyüklükleri, kenetlenme dereceleri, ayrışma dereceleri, değişken süreksizlik özellikleri gibi farklılıklar içermeleri nedeniyle farklı davranış ve mukavemet özellikleri sergilerler. Bu sebepten baraj yapımı için en uygun temel özelliklerini gösteren baraj havzasında bile baraj yapılmadan önce jeolojik ve geoteknik açıdan detaylı incelemeler yapılmalı, ayrıntılı incelenmeler sonucu, baraj projesinde gerektiğinde gerekli değişikliklerin uygulamaya konması sağlanabilmelidir. Aynı gruptaki kayaçlar; temel olma, geçirgenlik, suya karşı davranış ve malzeme olma gibi nitelikler açısından ayrışmamış olmaları kaydıyla kısmen benzerlik gösterirler. Mağmatik, metamorfik ya da sedimenter kayaç gruplarının baraj yeri havzası olmaları durumunda karşılaşılabilecek sorunlar aşağıda verilmektedir:

11.2.2.1. Mağmatik kayaçların baraj yapımına etkisi

a) Derinlik kayaçları: Granit, siyenit, gabro gibi kayaçlar, mağmatik kayaçların derinlik kayaçlarını oluştururlar ve bu kayaçlar taze, som, ayrışmamış, çatlaksız kayalar olmaları durumunda en ideal baraj yerlerini oluştururlar. Bu tür çok sağlam kayalar, boşluk ve erime kanalları içermediklerinden geçirimsiz olup tek eksenli basınç dirençleri yüksek, çoğunlukla >1.500 kg/cm^2 dir ve bu değer, betonun dayanımından çok daha yüksektir. Çok sağlam kayalar üzerine, ekonomik olmaları nedeniyle genellikle beton barajlar yapılması istenilir. Bu tür kayaçlarda ayrışmanın fazla, kırık, ezilme, hidrotermal zonlar ve çok çatlaklı veya fay zonları içermeleri durumunda heyelân, su kaçağı gibi önemli sorunlar ortaya çıkacağından, bunların mühendislik jeolojisi harita ve kesitlerinde gösterilmesi, arazi ve laboratuar deneyleriyle de mühendislik jeolojisi ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi ve en uygun önlemlerin alınması gerekmektedir. Derinlik kayaçları üzerine inşa edilecek beton baraj yerinin ayrışma derinliği, derecesi ve geçirgenliğinin saptanması için derin ve büyük çaplı sondaj, şaft, yarma ve galeri araştırma yöntemleri ile detaylı araştırılmalıdır. Galeri ve yarmalarda kayaçların kesme direnci, kayma mukavemeti parametrelerinin (kohezyon ve içsel sürtünme), elâstik özelliklerinin yerinde *(in situ)* yapılan deneylerle (hidrolik

kriko, galerilerde basınçlı su ve sismik yöntemler) saptanması, geçirimsizliğin sağlanması yolları araştırılır. Barajın temelinin oturacağı alanda yüzeyde yer alan ayrık kesimler sıyrılıp, temel sağlam kayaçlar üzerine oturtulmalı, eğer temel kayası çatlaklı ise kayanın karakterine göre, gerekli derinliklerde tüm temel alanında çimento enjeksiyonu yapılmak suretiyle çatlaklar tıkanarak geçirimsizlik sağlanmalıdır. Ayrıca gövde betonunun birinci seviyesinden sonra temel kayası ile gövde betonunun bağlanmasını ve su kaçaklarının olmamasını sağlamak amacı ile çimento enjeksiyonu yapılmalıdır. Gövde ile temel arasında sürtünme direncini arttırmak amacı ile temel kaya yüzeyinin pürüzlendirilmesi ya da basamaklandırılması gerekmektedir (Tarhan, 2002).

b) Volkanik kayaçlar: Bazalt, andezit, riyolit trakit, aglomeralar *(agglomerate)* mağmanın yüzeye çıkmış kayaçlarını oluştururlar. Volkanik ya da yüzey kayacı olarak adlandırılan bazalt, andezit, riyolit trakit türü kayaçlar ayrışmamış, çatlaksız olduklarında baraj yeri için çok elverişlidirler. Dâneler arası boşluklar içeren tüfler ile tüf içeren aglomeralar, bileşim ve ayrışma ve şişme özelliklerinin daha dikkatli incelenmesini gerektiren volkanik kayaçlardandır. Bazalt, andezit gibi volkanik kayaçları oluşturan soğuma çatlaklı ve akma yapılarını içeren lâvlar, çoğu zaman tüf ve aglomeralar ile ardışıklı olarak bulunurlar veya bunların arasında ender de olsa, kireçtaşı kumtaşı gibi sedimenter kayaçlar da yer alabilir. Bu durumda da kayaçlar, yatay ya da düşey yönde farklı geçirgenlik gösterirler. Geçirgenliğin önlenmesi için kayaç türüne bağlı olarak farklı enjeksiyon yapılması gerekir. Kolorado Nehri (Kuzey Amerika'nın güneybatısında ABD ve Meksika'dan geçip Kaliforniya Körfezi'ne akan ve Büyük Kanyon *(grand canyon)* isimli jeolojik yapıyı oluşturan 2.330 km uzunluğundaki nehir) üzerine inşa edilen bir kemer baraj temeli, gevşek andezitik aglomera ve tüfler üzerine oturtulmuş, baraj su ile dolduktan sonra temelde sızmalar başlamıştır. Sızmaları önlemek için, zemin yüzünden 200 m derinliklere ulaşan enjeksiyon perdesi *(grout curtain)* yapılması mecburiyetinde kalınmıştır.

11.2.2.2. Metamorfik kayaçların baraj yapımına etkisi

Metamorfik kayaçlar; fillit, şist, gnays gibi belirgin süreksizlikleri içeren yapraklanma kazanmış metamorfik kayalar ile mermer, kuvarsit ve amfibolit gibi yapraklanma içermeyen, masif, metamorfik kayalardan oluşmaktadırlar. Karstik mermer hariç bu tür kayaçlarda çoğu zaman su kaçağı sorunu yoktur.

Zayıflık düzlemlerini oluşturan yapraklanma içeren kayaçlar, süreksizlik düzlemleri boyunca gelişmiş epidot, klorit, gibi su ile temasları hâlinde şişebilen mineralleri içerirler. Ve bu yüzeyler boyunca ayrışmaya uğrarlar. Ayrıştıkları zaman, taşıma güçleri ve elâstisite modülleri azalır, baraj gölü yamaçlarında heyelân sorunlarına neden olabilirler. Bu bakımdan, yapraklanma gösteren kayaçların süreksizliklerinin doğrultu ve eğimleri, özellikleri çok ayrıntılı olarak incelenmesi gerekir.

Çatlak ve erime boşlukları içermeyen mermerler ile yapraklanma içermeyen kuvarsit gibi kayaçlar, ayrışmadıkları ve süreksizlik ve/veya zonlarını içermedikleri sürece geçirimsiz olup iyi bir temel niteliğindedirler. Bu kayaçlardan; kireçtaşlarının metamorfizmaya uğramasıyla oluşmuş mermerler $CaCO_3$ bileşimli olduklarından, suların etkisiyle ayrışmış ve çok önceden oluşmuş ufak ya da büyük boyutlarda karstik boşlukları içerebilirler. Baraj aksı ve civarında bu tür boşluklar var ise gerek baraj gölünden gerekse baraj gövdesi ve civarından aşırı su kaçakları olacak, bu boşlukların olabildiğince kapatılması gerekecektir (örn. Keban Barajı).

Genel olarak metamorfik kayaçlar, ayrışmadıkları, erime boşlukları içermedikleri, süreksizlik, doğrultularının baraj eksenine paralel ve eğimleri memba yönüne doğru olduklarında, baraj yeri olma yönünden tehlike arz etmezler.

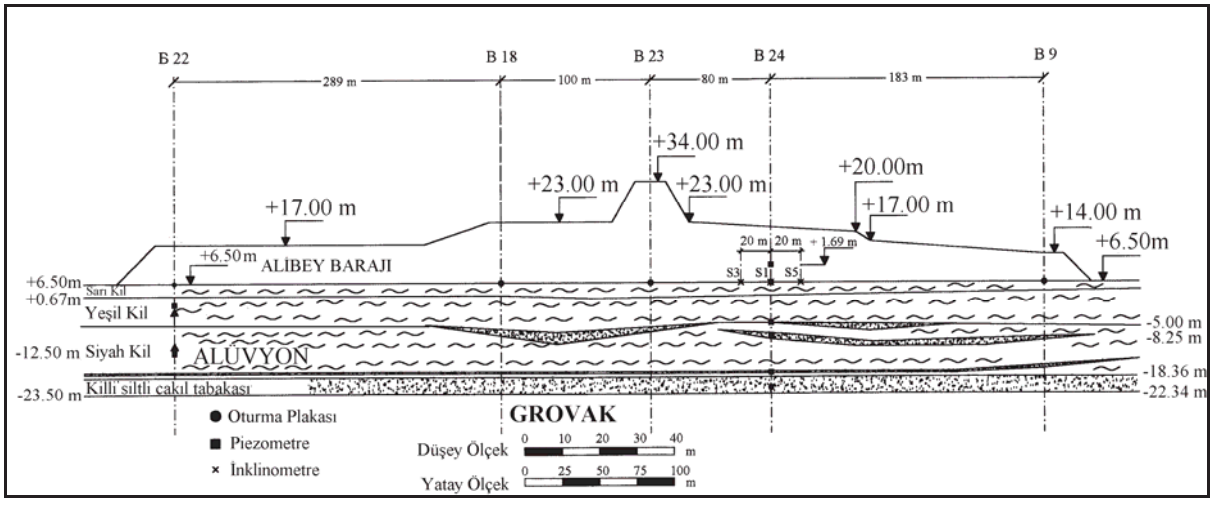
11.2.2.3. Sedimenter kayaçların baraj yapımına etkisi

Tortul ya da çökelik kayaç olarak da adlandırılan sedimenter kayaçlar, litolojik ve yapısal özelliklerine bağlı olarak baraj yeri olma bakımından bazıları çok iyi temel olma özelliği gösterirken, bazıları duraylılık veya geçirgenlik ve taşıma gücü açısından problemlere neden olabilirler. Bu tür kayaçların baraj yeri olabilme nitelikleri çok farklıdır.

a) Ayrık sedimenter kayaçlar: Çakıl, kum, silt gibi tutturulmamış ve zemin olarak adlandırılan ayrık sedimenter kayaçlar çok geçirimli olup buralara baraj yapılması düşünüldüğünde geçirgenlik yanında oturma problemleri ile de sıkça karşılaşılacağı bilinmektedir. Genellikle alüvyonlarda görülen bu durum, geçirimsizliğin sağlanması, baraj yerinin taşıma gücünün artırılması ve boşluk suyu basıncının kaldırılması için duraylı şerbet veya kimyasal maddelerle, zemin iyileştirilebilir. İyileştirme alüvyon kalınlığının fazla olduğu durumlarda da

yapılmaktadır. Güneydoğu Fransa'da, batı Alp Dağlarında 1955 -1961 yılları arası inşa edilen 123 m yüksekliğindeki Serre Ponçon kil çekirdekli toprak barajı *(earth core dam; Lac de Serre-Ponçon)* tabanında yer alan 55 m kalınlığındaki alüvyon, özel enjeksiyon yöntemi ile geçirimsiz hâle getirilmiştir.

Alüvyon üzerine yapılan barajlara diğer bir örnek ise İstanbul'da Haliç'e birleşen Alibey Deresi üzerinde 1968 yılında içme suyu amaçlı inşa edilmeye başlanan toprak dolgu türü Alibey Barajı'dır (Şekil 11.21). Baraj; zemin yüzünden 33 m derinliğe varan kalınlıkta ve yer yer kum bantları içeren yeşil-siyahımsı renkli, orta-katı, plâstik, güncel alüvyal kil tabakası üzerinde yer almaktadır. Alüvyonun taban seviyeleri de, killi-siltli çakıl tabakasından oluşur. Çakıl tabakası altında ise ana kayayı oluşturan Paleozoyik yaşlı sağlam grovak kayaları yer almaktadır. Ortalama 300 m'yi aşan genişlikteki vâdi taban düzlüğünü oluşturan kalın bir alüvyon üzerine inşa edilen ve mansap-memba batardoları bulunan, 550 m uzunluğunda, 30 m yüksekliğindeki Alibey Barajı gövdesi; kil çekirdek yanında çakıllı ve kumlu filtre malzemeleri ve en dışta kaya dolgu [=**Anroşman** *(riprap)***:** İri taşlarla yapılan tahkimat çeşidi, örtü malzemesi)] malzemeden oluşmaktadır. Baraj gevşek tutturulmuş alüvyal zemin üzerinde yer aldığından, arazi davranışı ile uyumlu dolgu inşa programı oluşturulmuş, zeminde konsolidasyonu hızlandırmak için düşey kum drenler yapılmış, baraj güvenli bir şekilde, kademeli olarak inşa edilip, 1983 yılında tamamlanmıştır.



Şekil 11.21. Alibey Barajı zemin kesiti. İstanbul'da, güncel alüvyon üzerine inşa edilen "Alibey Barajı" ve alüvyona ait derinlikle değişen litolojilerin, sondaj logları verilerinden ve sondaj sandıklarında yer alan karotlardan yararlanılarak çizilmiş baraj eksenine dik zemin kesiti (hazırlayan: Yıldırım, M. 1992).

b) Çimentolanmış tortul kayaçlar: Ayrık taneciklerin tabiî bir çimento ile tutturulmuş olduğu ve kaya olarak adlandırılan kumtaşı (örn. feldspat içeren kumtaşları=arkoz/*arkose;* mika içeren kumtaşları=grovak/*greywacke;* kuvarsit/*quartzite* ve konglomera=çakıltaşı/*conglomerate*)] türü tutturulmuş kırıntılı kayalar, baraj yeri olma yönünden elverişlidirler. Bu tür kayaların dirençleri çimento cinsine, tanelerin tür ve boyutlarına şekillerine, dizilişlerine bağlı olarak değişmektedir. Çimento; silisli, kalsiyum karbonatlı veya killi olabilir. Kayanın tanelerini tutturan silisli çimento dayanımı artırıcı, killi çimento ise azaltıcı özelliktedir. Süreksizlik sıklığı, süreksizlik düzlemleri ve konumları, çatlak dolgularının killi olmaları veya sağlam kaya istifinde kil ara tabakaları, dayanımı ve kayma direncini azaltacak, şevlerde de kayma yüzeyleri oluşturacaktır.

Çimentolanmış kayaların sert, kırılgan olmaları, kazılarda yapılan patlatmalardan da büyük ölçüde etkilenebilirler. Bu nedenle baraj gövdesi yeri kazılarının; son 0,5 m'sinde patlayıcı madde kullanılmadan kazılmalı, kış ayları boyunca açıkta kalmaları durumunda, donma erime gibi olaylardan bozulma olmuş ise bu kesimler sıyrılarak uzaklaştırılmalıdır.

Çimentolanmış tortul kayaçlardan, kireçtaşları (*limestones,* $CaCO_3$), dolomit(it)ler [*dolomite rocks*, $CaMg(CO_3)_2$] veya killi kireçtaşları üzerinde baraj yapılmak istendiğinde öncelikle karstik araştırmaların yapılması gereklidir. Jeolojisi iyi araştırılmış kireçtaşları ve dolomitler, büyük su kaçaklarına neden olan irili ufaklı erime boşlukları ve mağaralar içermiyorlar ise taşıma güçleri de yüksek olacaktır. Bu tür kayaların baraj yapıldıktan sonra bünyelerinde oluşacak güncel erimeleri, çok az olacak, baraj ömrü boyunca bir problem yaratmayacaktır. Diğer bir ifâdeyle bu tür kayalar; çok çabuk eriyen jips ve tuzlu çökeller gibi tehlike arz etmezler. Örnek olarak beton; birçok kireçtaşından daha çabuk ve çok eriyebilmektedir. Kireçtaşlarında önemli olan erimeler ve oluşturdukları karstik boşluklar, binlerce yıllar ile ifâde edilebilecek jeolojik zamanlar boyunca gelişmiş olanlardır. Baraj şayet kireçtaşları üzerine oturtulacaksa, ayrışmış seviyeler temizlenmeli, boşluklar doldurulmalıdır. Beton barajlar için temizlenmiş temel kayası yüzeyi ile beton gövde arasına, zayıflık zonları bulunmaması durumunda, herhangi özel bir işlem yapılmasına pek gerek yoktur.

Marn, silt, kil, silttaşı ve kiltaşları temellerde şişme, kabarma ve şev duraysızlığı sorunları oluşturabilirler. **Çamurtaşları** (=laminasız siltli kiltaşı) ve

'**şeyl**'ler (=laminalı siltli kiltaşı) geçirimsizdir, ancak suyla temasta stabilitesi bozulan sedimenter kayaçlardandır. Kil, şeyl ve benzer tür kayaçların taşıma güçleri ve kesme dirençleri düşük olduğundan, beton baraj temellerinden ziyade ekseriyetle dolgu baraj temelleri için uygundurlar. Şeyl ve killi zeminlerde temel kazısından sonra temel tabanı yağmurlardan etkileneceğinden, gövde inşaatı kısa zamanda yapılmalı ya da uzun süre açıkta kalacak kazı yüzeyleri grobeton ile kaplanmalıdır.

11.2.3. Barajların çevreye etkisi

Barajlar; havaya, suya ve karaya olmak üzere üç türlü etki yaparlar. Baraj gölü oluştuktan sonra çevrenin iklimi daha ılımanlaşır. Bu değişim daha çok yağış, buharlaşma ve sıcaklık üzerinde etkili olmaktadır.

Baraj gölünde toplanan su; yeraltı ve yerüstü sularını etkiler. Bilhassa yeraltı sularının yükselmesine, baraja komşu vâdilerde yeni kaynakların oluşmasını sağlar. Ancak baraj gölünde toplanan su, gölü oluşturan akarsuya oranla daha sıcak ve tuzlu olmaktadır.

Baraj gölü havzasında karada mevcut yerleşim yerleri ve tarihî eserler sular altında kalabilir. Bu durumda yerleşim yerleri değiştirilip tarihî eserler göl havzası dışına taşınabilir; şayet taşınamıyorsa üstleri gelecek için muhafazaya alınıp kapatılır.

Baraj gölünde toplanan sular; fayların yer aldığı baraj ve baraj havzası yamaçlarında yeni heyelânların oluşmasına neden olabileceğinden, bu tür kritik yerlerdeki sorunlar, yapılan jeolojik, mühendislik jeolojisi ve geoteknik çalışmalar sonucu alınacak önlemler ile emniyet sağlanabilecektir.

Barajlar ve bu baraj göllerinde biriken suları elektriğe dönüştüren Hidroelektrik Santraller (HES), başta insanlar için içme ve tarım suyu rezervuarları oluşturmak, elektrik üretimini arttırmak açısından son derece yararlıdırlar. Bu bakımdan, dünyamızın birçok yerinde su kıtlığı çeken ülkeler başta olmak üzere, baraj yapımlarının ertelenmesi veya vazgeçilmesi düşünülemez. Genellikle kömür ile çalışan, kirliliğe karşı gerekli önlemler alınmadığı takdirde insan sağlığını bozan, tarımı olumsuz yönde etkileyen ve etrafı kirletebilen termik santrallerin (örn. Afşin-Elbistan A Termik Santrali-bacaları, filtresiz dönem, 1984) aksine; barajlar etrafı kirletmeyen, yenilenebilir enerji üreten

ve çevre dostu mühendislik yapılarıdır. Baraj gölü alanının suyla dolması sonucu sulu tarım yapılabilir, tarım alanlarının sel baskınları altında kalması önlenir, nehirlerde su akışı düzenlenir, enerji üretilir, içme ve kullanma suyu elde edilir, baraj göl havzası yamaçlarında oluşan erozyon azalır, baraj gölünde çevre insanı için balıkçılık, avcılık, piknik ve su sporları gibi etkinlikler artar, göl alanı ulaşım açısından kolaylık sağlar ve baraj yöresine ekonomik canlılık getirir. Ayrıca elektrik üreten bir baraj, maliyetini 6 - 7 yıl gibi kısa bir sürede çıkarır, en ucuz elektrik üretimini sağlar, filtre önlemleri alınmamış termik santraller gibi çevreyi kirletmez ve doğalgaz santrallerinin aksine ekonomik açıdan dışa bağımlılığı azaltır. Barajın fonksiyonunun sona ermesi birçok faktöre bağlı olmakla birlikte, baraj gölüne yağış ve nehirlerle taşınan siltli killi malzemenin (siltasyon, siltlenme, *siltation*), baraj gölüne dolmasıyla son bulur. Bu işlem ise yüzlerce yıl sürebilir.

Günümüzde, Karayolları, MTA, TPAO ve diğer jeoloji-jeofizik kurumları gibi Devlet Su İşleri (DSİ) de baraj yapımında proje, emniyet, kalite, tecrübe ve bilgi düzeyinde dünyada üst seviyeye ulaşmış güvenilir, gurur verici kuruluşlardandır. Örnek olarak DSİ Kurumu üretiminin en güzel örneğini, tamamen Türk mühendis, teknik eleman ve çalışanlarınca inşa edilmiş olan “Atatürk Barajı” oluşturmaktadır.

11. Bölümün Özeti

Barajlar; enerji üretimi, içme suyu sağlanması, sulama ve taşkın önlemeye yönelik su kaynakları oluşturmak amacıyla akarsu vâdileri üzerinde yapay göller oluşturmak için yapılan su setleridir. Bunlar; amaçlarına, yapımlarında kullanılan malzemeye, yükseklik ya da su hacmine göre sınıflandırılırlar. Barajlar, kullanılan malzemeye göre, beton (ağırlık ve kemer); dolgu; taş örme; ahşap ve çelik olmak üzere kısımlara ayrılırlar. Bunlardan beton barajlar sınıfına giren ağırlık barajları; ağırlık ve payandalı ağırlık; dolgu sınıfına giren barajları ise toprak, kaya ya da toprak+kaya barajlar olarak incelenirler. Yapımlarında hem beton hem de dolgu tipinin beraberce kullanıldığı barajlar da vardır.

Baraj çalışmalarında projenin esasını, başlangıçta yapılabilirlik ve jeolojik ön çalışmalar ile ardından ayrıntılı mühendislik jeolojisi-jeofizik, inşaat

ve geoteknik mühendisliği çalışmaları oluşturur. Bir baraj için dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlar, baraj yerinin doğru seçimi, barajın güvenli bir biçimde inşa edilmesi ve barajın güvenli ve yeterli miktarda suyu tutabilmesidir. Barajın inşa edildiği alanda yer alan kayaçlar, litolojilerine, oluştukları ortama, tektonizma etkilerine, ayrışmaya ve zamana bağlı olarak değişik mühendislik özellikleri gösterirler. Bu sebepten baraj yapımı için en uygun temel özelliklerini gösteren baraj havzasında bile baraj yapılmadan önce jeolojik ve geoteknik açıdan detaylı incelemeler yapılmalı, mühendislik ve diğer geoteknik parametreler belirlenmeli, geçirgenlik ve duraylılık açısından gerekli ayrıntılı incelemeler sonucu, sonradan ortaya çıkabilecek sorunlarda; baraj projesinde gerekli değişikliklerin de yapılabilme imkânları sağlanmalıdır. Bir barajın ömrü ise baraj gölünün sedimentlerle tamamen dolmasıyla sona ermektedir.

Baraj tipi seçiminde en uygun baraj türünün belirlenmesinde önemli kriterlerden biri de vâdi şekli faktörüdür. Bu değer, baraj tepe uzunluğunun maksimum baraj yüksekliğine oranı olarak kabul edilir. Baraj yapımında bu faktör, tek başına yeterli olmayıp, bunun yanında barajın yapılacağı yerin jeolojisine, mühendislik özelliklerine, deprem bölgesine yakınlık veya uzaklık, ülkenin gelişmişliği gibi kriterlere bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Barajların efektif olarak kullanılabilmesi ilk aşamada, baraj gölünün su tutabilmesine bağlıdır. Bunun en önemli kriteri de suyun, yamaçlardaki veya yer altındaki boşluklar yoluyla aşırı sızmasını engellemektir. Ayrıca eriyebilen kayaçlarda karstlaşma; baraj gölünden büyük ölçüde su kaçaklarına neden olan önemli jeolojik faktörlerden biridir. Bu amaçla baraj yeri seçimlerinde arazide yer alan tabakaların litolojik özellikleri, yapısal konum ve süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri, kayaçların su iletim özellikleri birinci derecede önemlidir.

Barajlarda dikkat edilmesi gereken ve oluşabilecek bir diğer problem de yamaçlardaki kütle hareketleridir. Tüm diğer çalışmalarla birlikte, baraj yeri ve havzasının, özellikle yamaçlarda, potansiyel heyelân alanı olan kesimlerin jeoloji ve mühendislik jeolojisi ve geoteknik etüt çalışmalarının detaylı ve doğru olarak yapılıp yorumlanarak en uygun çözümün uygulamaya konması, emniyet ve ekonomi açısından önem taşımaktadır.

12. BÖLÜM: TÜNELLER ve TÜNEL İNŞAATLARINDA JEOLOJİK KRİTERLER

12.1. TÜNELLER

Tünel'ler; herhangi bir ulaştırma işleminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla yapılan ve her iki ucu zemin yüzeyine açılan, dışarıyla bağlantılı olan hafredilmiş yapay yeraltı geçitleri ya da yeraltı açıklıklarıdır. Tüneller, yer altında yapılacak kazı ile istenilen kesitte boşluk oluşturulması ve desteklenmesi ile inşa edilen yapay yeraltı yapıları olarak da tanımlanmaktadır.

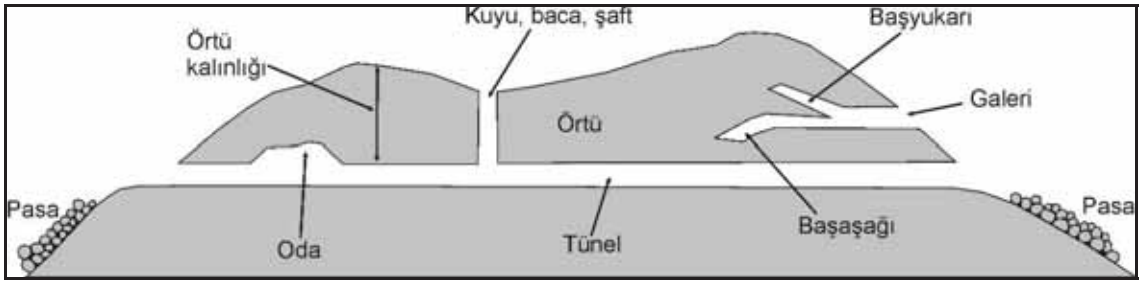
Tünel *(tunnel)* tanımındaki ulaştırma işlemi, karayolu tüneli, metro gibi trafik ulaşımı veya baraj derivasyonu, kanalizasyon gibi su-malzeme iletimini yer altından daha kısa veya amaca uygun olarak istenilen bir yolla sağlanması anlamındadır. Tüneller, insan veya malzemenin zaman, emniyet ve ekonomik açıdan yararlı şekilde en kısa yoldan iletiminin sağlanması için inşa edilirler.

Bu bölümde; tünele ait temel bilgiler yanında, ağırlıklı olarak tünelin jeolojik yapıyla ilgisi ve tünel güzergâhında ya da güzergâh seçiminde göz önünde bulundurulması gerekli önemli jeolojik kriterlerden bahsedilecektir. Tünel'e ait uygulamalı güncel bir örnek ise tünel konusu sonunda yer alan "Örnek, Uygulama ve Yorumlar" kısmında verilmektedir.

12.1.1. Tünel ve galerilerde kullanılan terimler

Tipik bir tünelde, tünel tavanından yeryüzüne kadar olan kısma **örtü** *(cover)*, kalınlığa **örtü kalınlığı** *(thickness of cover*), tek tarafı açık kazıları ise **galeri** *(adit)* ismi verilir. Düşey olarak yapılan kazılara **şaft** *(shaft)*, baca ya da kuyu, yukarı doğru eğimli olanlarına **baş yukarı**, aşağıya eğimli olanlarına **baş aşağı**, aynı tünel ya da galeride normal genişlik ve yükseklikten fazla kazılmış kısımlar **oda** olarak isimlendirilir. Kazılarda kazı sonunda çıkan artık

malzemeye **pasa**, yol güzergâhında bulunan tünellerin giriş ve çıkış yüzlerine **portal** denir. Tünele paralel veya dik olarak kazılmış araştırma ve yardım amaçlı galeriler ve şaftlar, inşaat sırasında ve sonrasındaki araştırma, ana tünelin değişik kısımlarına kısa zaman ve mesafeden ulaşma, emniyet bakım ve tahliye işlemleri ile malzeme veya havalandırma ihtiyaçları için kullanılırlar (Şekil 12.1, 12.2).



Şekil 12.1. Bir tünelin başlıca kısımları (Ertunç, 2003).

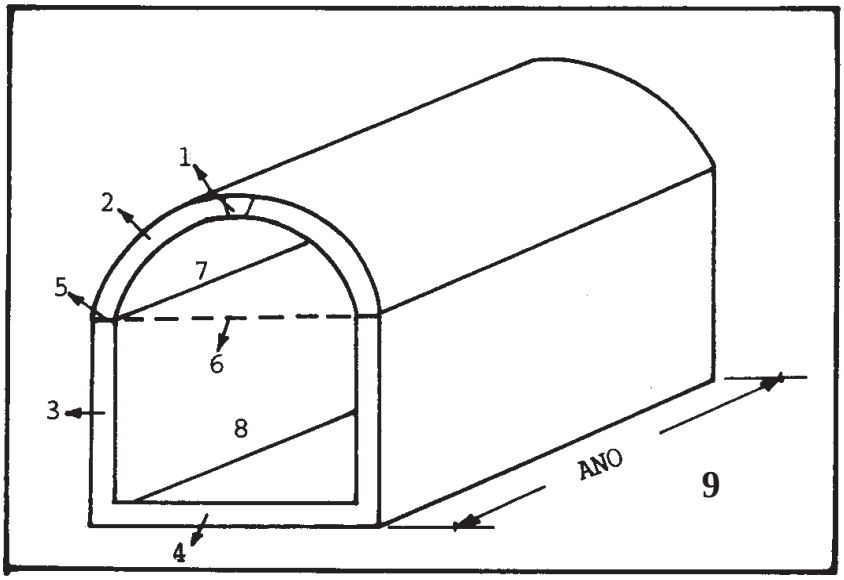


Şekil 12.2. Tünellerde açılan şaft uygulamasına örnek; Ambarlı atık su tünel şaftı. Şaft derinliği 30 m'dir (14.09.2006).

Tünel ya da galerinin en kesiti göz önüne alındığında kazı boşluğunun alt kısmına **taban**, üst kısmına **tavan** (kemer), yan kısımlara **ayak** (duvar), tavanın ayaklarla birleştiği kısma **üzengi**, üzengileri birleştiren çizgiye **üzengi düzeyi**, üzengi düzeyi ile tavan arasında kalan kısma **kalot**, üzengi düzeyi ile taban arasındaki kısma **stros**, tünel çalışması sırasında bir kerede açılan tünel uzunluğuna ise **ano** denmektedir. Ano, geniş kapsamda; istinat duvarları, galeri veya kuyularda beton, betonarme, taş duvar veya kemer inşaatlarında meydana gelebilecek deformasyonların tüm ***tahkimatı etkilemesini önlemek ve deforme olan kısımların kolay tamir edilebilmesini sağlamak için söz konusu

tahkimatın bloklar hâlinde inşa edilen kısımları olarak tanımlanmaktadır. Ano, kazı yapılan kayacın özelliğine, uygulanan kazı yöntemine bağlı olarak genelde 1 m ilâ 9 m arasında (Tarhan, 2002) veya daha da uzun olabilir (Şekil 12.3.A).

***[Tahkimat:** Tünel veya maden ocağını teşkil eden galeri, kuyu ve üretim yerlerini mal ve can emniyeti bakımından çalışılabilinir duruma sokmak ve çalışılabilir durumda tutmak için yerine göre ağaç, demir ve beton kullanılarak yapılan takviye, sağlamlaştırma (iksa, destek düzeni)**]**.



Şekil 12.3. A- Atnalı tipli eski bir tünelin en kesiti ve çeşitli kısımlara verilen isimler. 1- Kilit (anahtar) taşı, 2- Kemer, 3- Ayak (duvar), 4- Taban, 5- Üzengi, 6- Üzengi çizgisi (düzeyi), 7- Kalot, 8- Stros, 9- Ano (Tarhan, 2002).

Bir tünel açılırken; emniyet, maliyet ile yakın ilişkili kaya-zemin ve ortamlarına ait özellikler birlikte değerlendirilmelidir. Kaya ve zemin ortamlarının kapladıkları alanlarda tektonik, jeolojik ve litolojik yapı, dokanak zonları, dokusal, bünyesel özellikler doğru olarak belirlenmelidir. Jeolojik harita ve kesitler yanında jeofizik ölçümler eksiksiz tamamlanmalıdır. Daha sonra mühendislik jeolojisi harita yapımı aşaması sırasında; yapılan zemin etüt sondajları değerlendirilmeli, sondajlardan elde edilen numunelerin laboratuar deney sonuçları ve sondaj logları zemin kesitlerinde yerlerine işaretlenmelidir. Güzergâhta karşılaşılabilecek muhtemel sorunlara yönelik değerlendirmeler de konusunda uzman kişilerce yapılmalıdır.

Tünel açılmadan önce yapılacak zemin etüt sondajları; tünel aksı boyunca, aksın her iki tarafına çapın iki katı kadar bir mesafe içinde, zemin

yüzeyinden yapılmalıdır. Sondajların aralıkları denizde 100 m – 150 m, karada ise jeolojik haritada görülen farklı kayaçlar ve tektonik yapı göz önüne alınarak belirlenmelidir. Sondaj aralıkları kayaç cinslerinin değiştiği ve ayrışma ile zayıflık ve kırık zonlarının bulunduğu ya da diğer problem yaratabilecek kesimlerde daha sık, fazla değişiklik göstermeyen ortamlarda ise daha seyrek olmalıdır. Sondaj derinlikleri, tünelin geçtiği güzergâhta, tünel tabanının altına, tünel çapının minimum yarısı kadar, problemli kayaçlardan (örn. şişen kil) geçiliyor ise tünel çapının minimum iki katı kadar altına uzatılmalıdır. Bu tür sondajlar (örn. otoyol ya da hızlı tren tünelleri vb.) genellikle tünel kırmızı kotunun 20 m altına inecek şekilde ve tamamı karotlu olarak yapılmalıdır. Sondaj derinlikleri uzunlukları toplamı da tünel uzunluğu kadar olmalıdır. İki tünel arası (örn. metro tüneli) birbirine yakın ise ek yükler oluşacağından bu tüneller arası mesafe en az tünel çapı ya da tünel çapının >1,5 katı kadar bırakılmalıdır.

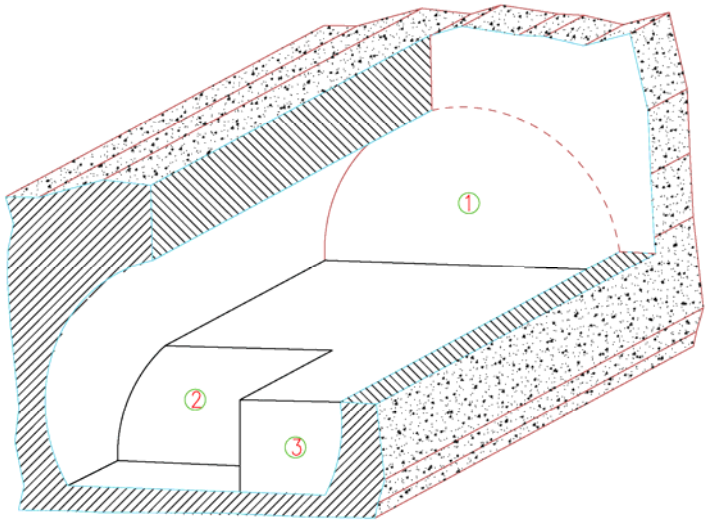
Tünel aksı boyunca geçilecek kayaçların litolojik ve mühendislik özellikleri ile tünel kayalarının sınıflandırılması yapıldıktan sonra eğer emniyet açısından çok galerili sistem olarak da adlandırılan çok parçalı bir tünel açılmasına karar verilmiş ise ilerleme şekli, kayacın özellikleri göz önüne alınarak belirlenir. Yapılacak tünelde kazı uzunluğu > 1 km ise TBM ile tünel açmak ekonomiktir. Kaya ortamı ve tünel açma çalışmaları uygun gittiği takdirde TBM ile bir metro tüneli güzergâhında bir günde 6 m ilâ 10 m arası boyda (ano) tünel açılabilmektedir. Tünel uzunluğu 1 km'den az ise 'delme patlatma', eğer yerleşim yerinden geçiliyorsa "kollu kazı makinaları" ya da "hidrolik kırıcı makinaları" veya "tam cepheli kazı makinası (TBM)" ile tünel açılmalıdır. Tünel ortamında kaya delinecek ise bu durumda kayanın tek eksenli basınç direnci dikkate alınmaktadır. Sürekli olarak tek eksenli basınç direnci >2.000 kg/cm^2 olan kayalarda teknolojiye bağlı olmakla birlikte genelde tam cepheli tünel açma metodu yani TBM kullanılmaz. Tünelin parçalı kazı ile açılarak ilerlenmesine yönelik şekiller 12.3.B, C, D ve E'de verilmektedir.

Parçalı kazı yaparak kazı alanını küçültmek ve kazı adımlarını (ano) kısaltmak, kazı göbeği bırakmak, tünel açılması sırasında, tünelin **"destek öncesi duraylılığı arttırıcı önlemler"**ini oluşturmaktadır.

Püskürtme beton *(shotcrete),* çelik iksa, çelik hasır, bulon, ayna ankrajı, *jet grouting*, süren, iç kaplama betonu, tünelde oluşabilecek göçükler yanında, kaya düşmesi/patlaması, aynanın yenilmesi, tünel kesitinin daralması

(convergence) gibi duraysızlıkları engellemek için yapılan uygulamalar **"kazı destek sistemleri"**ni oluştururlar.

Kazı destek sistemlerinde, kazı destek tiplerinin belirlenmesi, kazı yapılan kayacın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapıların ve yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin özellikle yoğunlaştığı bölgeler dikkate alınarak yapılır.



Şekil 12.3. B) Daire-Atnalı tipli bir tünelin (üç parçalı) tipik ilerleme kesiti.



Şekil 12.3.C) Tünel kazısı. 07.12.2006 tarihinde, İstanbul raylı sistem metro çalışmalarında İstasyon ve tünellerin birleşim yeri gibi geniş tünel açıklığı gerektiren kesimlerinde (peron ve makas tünelleri) çok parçalı tünel açma çalışmalarında yapılan tünel üst yarı çeyreği kazısı.



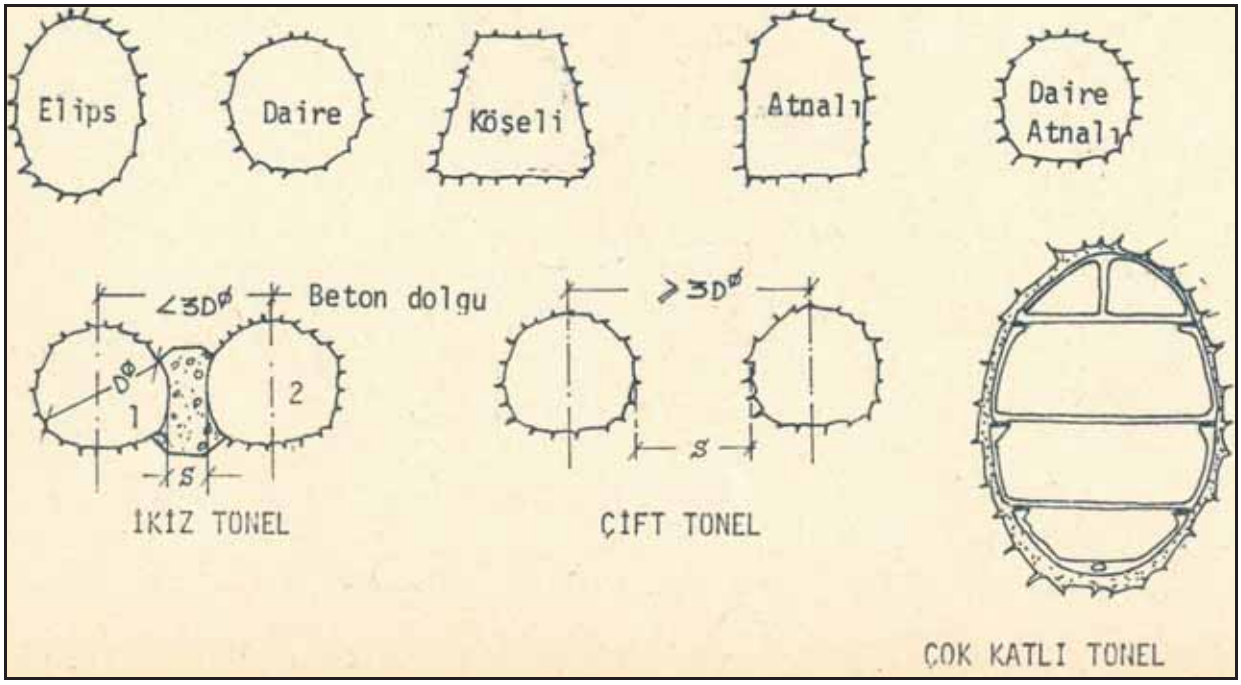
Şekil 12.3.D) Tünel üst yarı kazısı ve Önsüren'ler. İstanbul Metrosu, "Maslak Yaklaşım Tüneli. Aşırı konsolide kil ve kumlu kilden oluşan (Miyosen çökelleri) zeminde açılan dairesel kesitli tünelin, 28.02.2007 tarihinde yapılan üst yarısını açma çalışmaları (iki parçalı, yarım kesit). Tünelde, killi kumlu zeminde çok döküntü olması nedeniyle tünel altında rahat çalışmak için, aynada üst kesimlerde yatayla 5°, max. 10° açı yapacak şekilde çakılmış **Önsüren**'ler (şemsiye) görülmekte.



Şekil 12.3.E) Tünel alt yarı kazısı. İstanbul Metrosu, 28.02.2007 tarihinde "Maslak Yaklaşım Tüneli"nde yapılan çalışmalar. Bir önceki şekilde üst yarısı açılmış dairesel kesitli tünelin alt dairesel yarısının açılma çalışmaları görülmekte.

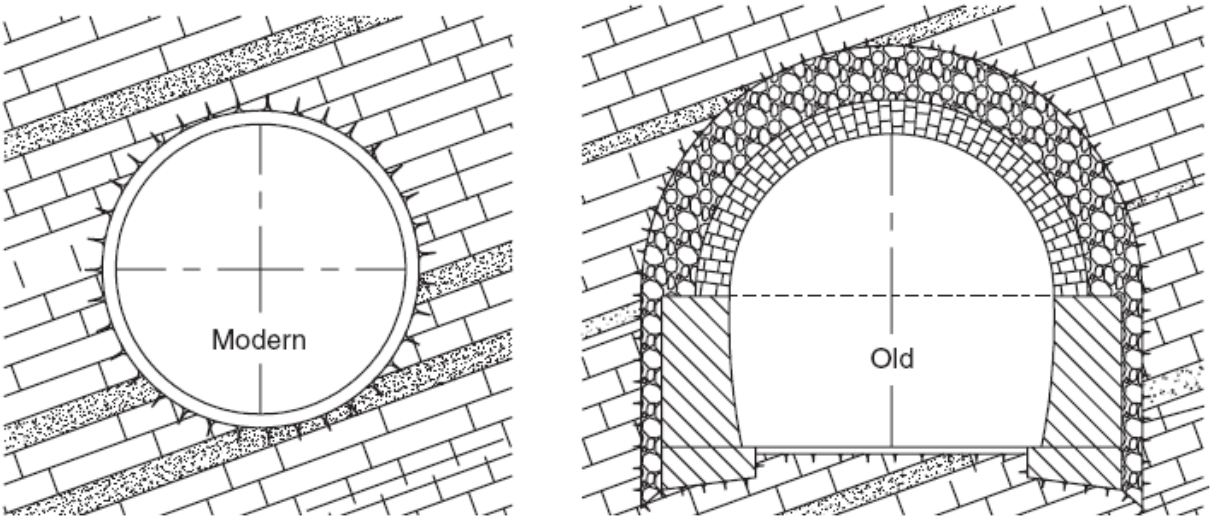
12.1.2. Tünel tipleri

Tünel veya galerilerin kesitleri, yer altına ait jeolojik yapı başta olmak üzere maliyet, kullanım amacına ve diğer tüm mühendislik özellikler dikkate alınarak kesitler; köşeli (kömür aynasında kömürü kolay alabilmek için), elips, at nalı, daire, daire+at nalı, çok katlı tünel ya da yan yana olmak üzere ikiz tünel veya çift tünel olarak açılabilirler (Şekil 12.4.A).



Şekil 12.4.A) Kesitlerine ve yapılarına göre tünel ve galeri tipleri (Vardar, 1986).

Tünel kesitleri değişken olmakla birlikte, çoğunlukla 6 m ilâ 8 m arasında değişmektedir. Kazıda tünelin dairesel (modern) olması daha ekonomiktir (Şekil 12.4.B). Zira; 1) Dairesel kesitler, makina ile açılmaları daha kolaydır, 2) Dairesel kesit, köşesiz biçimde olduğundan, kazı kesitinde oluşan gerilme kemeri, büyük gerilme yoğunlaşmaları oluşturmaz, 3) Hidrostatik basınç altında en iyi davranışı gösterirler, 4) Teğetsel gerilmeler azdır, 5) Havalandırma açısından iyi, sürtünme kaybı daha azdır, 6) Enerji tasarrufu diğer kesitlere nazaran daha iyidir, 7) Dairesel kesitlerde daha fazla malzeme yerleştirme olur ve ölü hacimlar da kullanılabilir.



Şekil 12.4.B) Yeni (modern) ve eski tip tünel kesitleri.

12.1.3. Tünel türleri ve özellikleri

a) Karayolu tünelleri: Demiryolu tünellerine nazaran güzergâh geometrisi açısından çok daha esnektir. Genellikle karayolu tünel projeleri ±% 2'lik bir eğime göre projelendirilmektedir. Eğer trafik hacmi düşük ise söz konusu eğim % ±4'e kadar çıkmaktadır. Daha yüksek eğimler, havalandırma (CO, CO_2, NO_2 emisyonları vb.) ve görüş güvenliği açısından uygun değildir. Karayolu enkesiti günlük trafik hacmine sıkı sıkıya bağlıdır. Uzun tünellerde "havalandırma" ve "yangın güvenliği" projenin en önemli öğelerinin başında yer alır (Arıoğlu, 2009).

b) Demiryolu tünelleri: Demiryoluna verilen eğim, yerçekim parametresi nedeniyle % 1 ilâ % 2 arasında değişmektedir. İstasyonlarda bu eğim, yüzde (%) 0 ilâ binde (‰) 3 arasında alınır. Zorunlu olduğu durumlarda; demiryoluna verilebilecek maksimum eğim binde 25'tir (örn. Malatya ve Bilecik yöresi demiryolu geçiş güzergâhı). Bir ve iki hatlı hızlı tren projelerinde tünel enkesiti sırasıyla 50 m^2 , 80 m^2 ve 100 m^2 dir.

c) Metro tünelleri: Tünel en kesiti, çalıştırılacak trenlerin maksimum kapasitesine, tren dizilerinin takip aralıklarına, sinyalizasyon ve ücret toplama sistemlerine bağlıdır. Tek ve çift hatlı metro tünelleri için tipik bir en kesit 35-37 m^2 dir. Örnek olarak İstanbul Metrosu tünelleri, gidiş-dönüş iki ayrı hat olarak açılmakta olup 4 ayrı karakterde tünel kesiti kullanılmaktadır. A tipi ana hat tünellerinin kesit alanı 37 m^2 ; P tipi peron tünelleri 65 m^2 ; T tipi makas

tünelleri 100 m^2 ; B tipi bağlantı tünellerinin kesit alanları ise 22 m^2 ilâ 45 m^2 arasında değişmektedir. Metro tünellerinde yangın güvenliği de en üst düzeyde olmalıdır. Ayrıca yerin yaklaşık >25 m gibi derinliklerinden geçen ve mühendislik hizmeti ve deprem parametrelerinin de dikkate alınarak inşa edilmiş bir metro tüneli, zemin yüzeyine kıyasla depremden son derece az etkilenmektedir. Diğer bir ifâde ile zemin yüzeyinden derine doğru indikçe deprem şiddeti de hızla azalmaktadır.

d) Hidrolik güç ve su tünelleri: Güzergâh geometrisi (yol eğimi, ***kurp** yarıçapı) diğer tünellere nazaran daha esnektir. Genelde sağlam kayada açılırlar. Hidrolik güç tünel kesit alanları; düşüm yüksekliği, su debisi ve enerji kayıpları gibi faktörlere bağlı olup 10 m^2 – 30 m^2 arasındadır.

***[Kurp** ***(curve)*:** Proje yatay ve düşey hattındaki doğrusal kesimleri birleştiren eğrisel veya dairesel karayolu kesimi.
Dever ***(superelevation):*** Yatay kurplarda merkezkaç kuvveti nedeniyle taşıtların dışarıya savrulmalarını önlemek için yol platformuna uygulanan enine eğim**]**.

e) Kanalizasyon tünelleri: Kesit alanı 10 m^2 dir.

12.1.4. Tünel açma yöntemleri

Tünel açma yöntemleri, yörenin jeolojik yapısına, kaya ve zeminin litolojik özelliklerine, jeolojik dayanımına, geçilen güzergâhın uzunluğuna, derinliğine, bulunduğu noktadaki zemin basınçlarına, zemin ve kaya kütle sınıflamasına, mühendislik özelliklerine, yerleşim yeri yoğunluğuna ve uzaklığı gibi nedenler göz önüne alınarak belirlenmektedir.

Tünel açma yöntemleri; başta klâsik kazı yöntemlerinden: a) Madencilik yöntemleri (delme-patlatma), b) Hidrolik kırıcılar, c) Kollu delme makinaları (kollu kazıcı), d) Yeni Avusturya tünel açma metodu (NATM), e) Açma-Kapama yöntemi f) TBM makinaları ile tam cepheli tünel açma yöntemi (TBM-*Tunnel Boring Machine*) g) Kalkan yöntemi, h) Batırma tünel yöntemi ile yapılmaktadır.

Tünel açma yöntemlerinden tam cepheli tünel açma yönteminde kullanılan tünel açma makinalarına örnek olarak Marmaray/Yedikule-Sirkeci arası yapılan çalışmalar şekil 12.4.C, D ve E'de; açma-kapama (aç-kapa) yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar ise şekil 12.4.F ve G'de verilmektedir.



Şekil 12.4.C) Tünel açma makinası (TBM) montaj çalışmaları.



Şekil 12.4.D)Tünel açma makinası (TBM) montaj çalışmaları. Marmaray-Raylı Sistem, Yedikule tünel girişi.



Şekil 12.4.E) Tünel açma makinası (TBM).



Şekil 12.4.F) Aç-Kapa yöntemi: İkitelli Sanayi 1, Metro İstasyonu (raylı sistem). Şekilde dayanma yapıları, **yatay destek boruları** *(=strut)* ve TBM montaj çalışmaları görülmekte (03.04.2008).



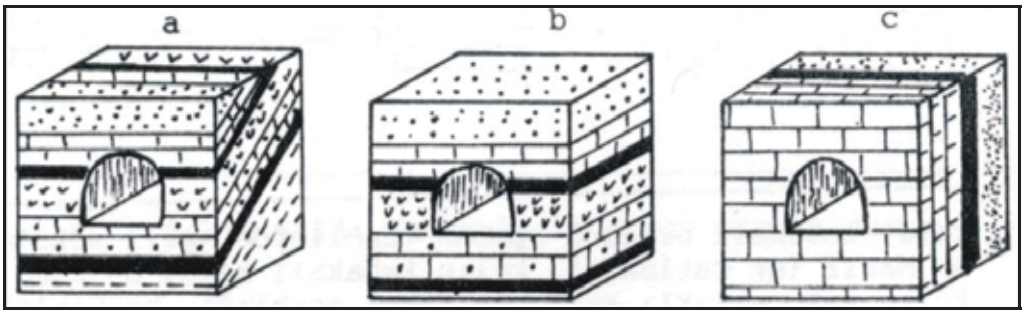
Şekil 12.4.G) İkitelli Sanayi 1. Metro İstasyonu-Raylı Sistem, Tünel ve TBM montaj çalışmalarının yakından görünüşü (03.04.2008).

12.1.5. Tünel güzergâhı seçiminde göz önünde bulundurulacak jeolojik kriterler

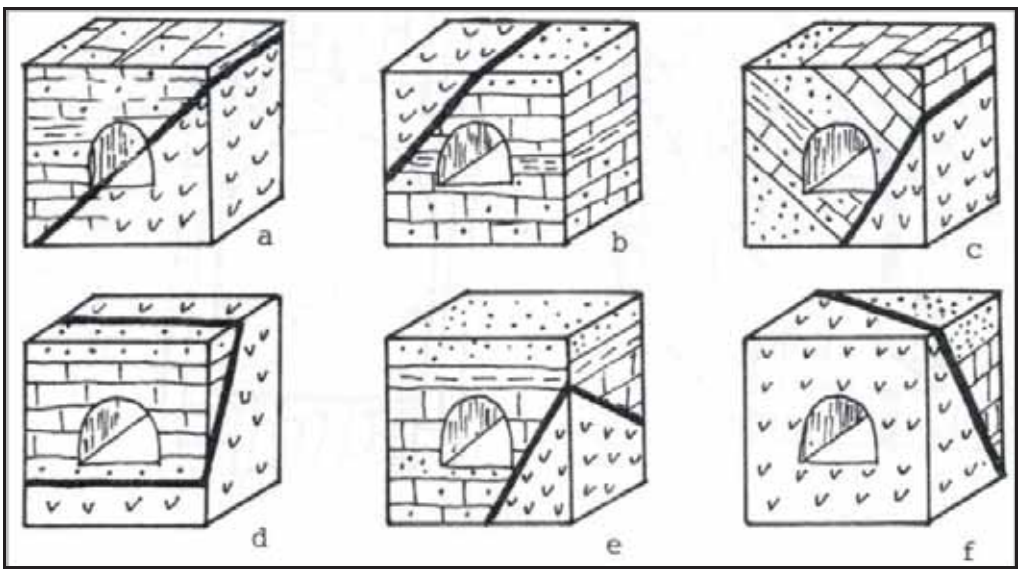
Tünel açılması sırasında karşılaşılan problemlerin çoğu, çalışılan güzergâhın jeolojisinin ve jeolojik modelin tam ve doğru olarak yeterince ortaya konmamasından kaynaklanmaktadır. Tünel açılması düşünülen güzergâhta, ilk yapılması gereken, tünel yapımının her aşamasında tüneli ilgilendiren konularda uzman kişilerin bulunması gerekliliğidir. Projede çalışacak mühendis, teknik eleman ve işçiler, birinci sınıf eleman olmak mecburiyetindedir. Tünel güzergâhının doğru belirlenmesi, belirlenen güzergâh boyunca geçilen kayaçların jeolojik yapı ve modelinin doğru olarak ortaya konması, konusunda uzman jeoloji mühendislerince belirlenmelidir. Doğru güzergâh seçimi; doğru jeolojik, mineralojik yapı, tektonik, harita, sondaj ve zemin kesitlerini içeren çalışmalar ve hazırlanan jeoloji-mühendislik jeolojisi-

jeofizik ve geoteknik raporlar, tünel hattı boyunca en uygun ve doğru gerekli iksa *(bulkhead)* sisteminin belirlenip, tünelin doğru projelendirilmesini sağlayan çalışmaların başında yer alırlar. Bu çalışmalar ile birlikte, inşaat, harita ve çevre mühendisliği gibi diğer tüm ilgili branşların vazgeçilemez katkıları, tünel yapımı aşamalarının tamamında koordineli bir çalışma ile doğru projelendirmeyi de beraberinde getirecektir.

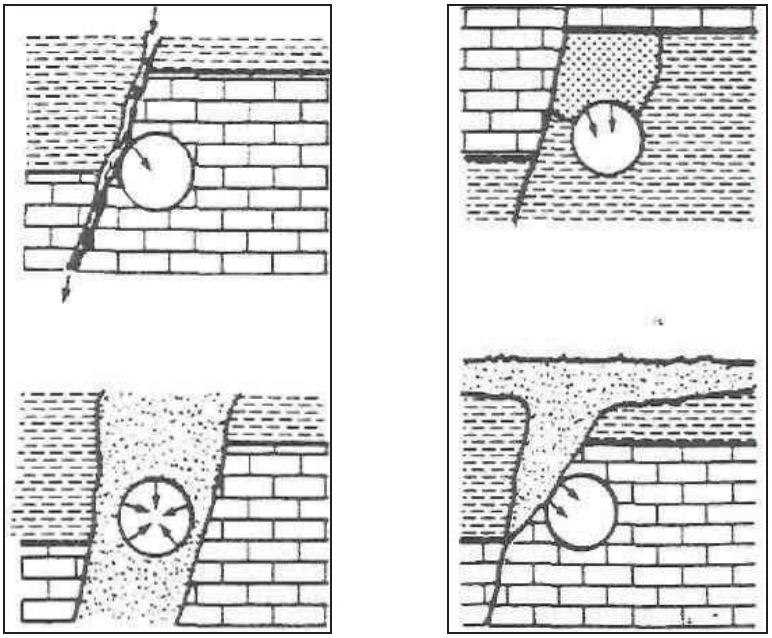
Tüneller, seçilen güzergâh doğrultuları itibarı ile jeolojik birimlerde tabakalar ve süreksizlikleri değişik açılarla keserler (Şekil 12.5, 12.6.A, B, C). Bu nedenle tüneller, kestikleri jeolojik birimlerin özelliklerine göre yeraltı suyu basması, tavan çökmesi, kaya patlaması, gaz sorunu vb. değişik problemlere mâruz kalırlar.



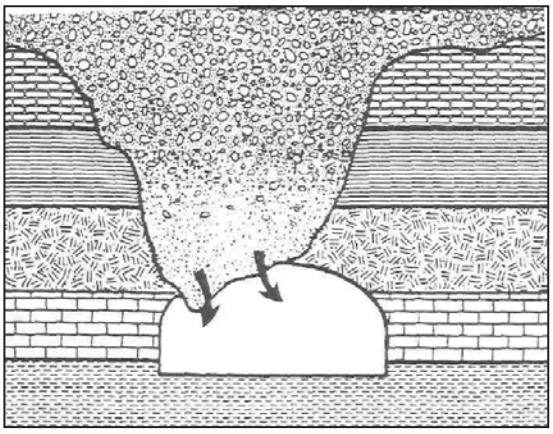
Şekil 12.5. Tabaka ile tünel doğrultusu ilişkisi (a: Eğik, b: Yatay, c: Düşey tabakalanma; Tarhan, 2002).



Şekil 12.6.A) Tünel ile tabakalanma ve fay zonu arasındaki ilişki (*Krynine* ve *Judd*, 1957; Tarhan, 2002).



Şekil 12.6.B) Fayların ve oluşturdukları farklı ezik zonların tünel stabilitesine menfi (olumsuz) etkileri.

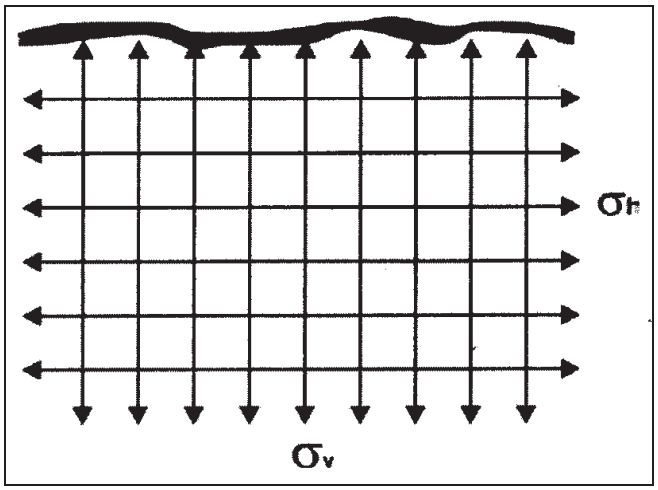


Şekil 12.6.C) Derin deşilmiş eski bir vâdi yatağını dolduran genç, gevşek alüvyal zeminlerin tünel güzergâhında oluşturduğu stabilite bozuklukları.

Tüneller içinde kazı yapıldığında gerilmelerin etkisi ile kayaçlar açılan boşluğa doğru hareket etmek isterler. Oluşan bu ikincil gerilmelerin dağılımı sırasında tünelin boşluk çevresinde oluşan yeni gerilmelerin şiddetlerine ve kayacın dokusuna bağlı olarak kemerlenme *(arching)* adı verilen yüklerin yoğunlaştığı bölgeler meydana gelir. Kayaçlar, bu hareketi birbirine dayanarak bir dereceye kadar önlerler ve denge oluşur. Yoğunlaşmanın olduğu bölgedeki bu denge hâline **“kemerlenme”** denir. Kemerlenme ile derinlik basınçları, gevşeme zonu vasıtasıyla gerilere aktarılmış olmaktadır. Kemerlenme;

kayaçlarda açılan boşlukların destek gerekmeden durabilme özelliği olarak da tarif edilmektedir.

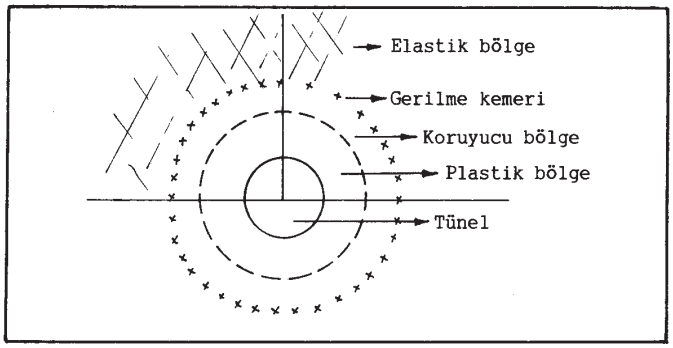
Doğada kayaların içinde bulunan değişik kökenli her türlü gerilmelerin bileşkesine **doğal gerilmeler** veya primer (ilkel) gerilmeler denir. Bunların yer, yön ve şiddetlerine bağlı olarak kaya içindeki dağılımı ise **primer gerilme durumu** adını alır (Şekil 12.6.D). Yerçekimi kuvveti, boşluk suyu basıncı, çatlak suyu basıncı, kayalarda fiziksel ve kimyasal reaksiyonların oluşturduğu yeniden kristallenmeler doğal gerilmelerdir. Kayalardaki yer çekimi gerilmeleri dışında kalan doğal gerilmelere **kalıcı gerilmeler (artık, rezidüel gerilme)** denilmektedir. Bu gerilmeleri, yerin içinde yükselen mağma, mağmadaki kimyasal ve fiziko kimyasal reaksiyon kuvvetleriyle yer kabuğu içindeki büzülme, genleşme, kabarma ve erime gibi olaylar ile çökelme, taşlaşma, yeniden kristalleşme, levha hareketleri ve aktif fay zonları oluşturmaktadır. Yer kabuğu içindeki bu gerilmeler, yer kabuğunu hareket ettirmedikleri sürece "statik tektonik"; levha hareketlerinin ürünleri olan dağ oluşumu ve aktif fay zonları oluşum ve hareketleri sırasındaki gerilmeler ise "dinamik tektonik basınç" olarak adlandırılırlar. Yanal atımlı aktif fay zonlarında (örn. Kuzey Anadolu Fay Zonu) ya da bu zona çok yakın güzergâhlarda yapılan tünellerde (örn. Bolu Tüneli) kalıcı nitelikte gerilme artışları (bilhassa yatay gerilmeler) ile sık sık karşılaşılmaktadır. Bu tür yöreler; emniyet, maliyet, zaman ve ekonomik açıdan çok iyi irdelenmeli, tünel güzergâhı kapsamlı, doğru bir çalışma ile konusunda uzman kişilerce belirlenmelidir.



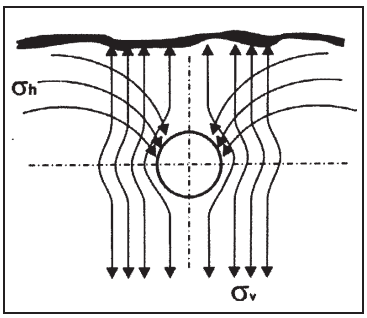
Şekil 12.6.D) Tünel açılmadan önce kayaçlarda doğal (birincil,ilksel, primer) gerilme durumu. Hayalî çizgilerle (paralel ve eşit aralıklı düşey ve yatay çizgiler) gösterilen düşey (σ_v) ve yatay (σ_h) gerilmeler.

Sekonder (ikincil) gerilme durumu, kayalarda kazı sırasında doğal gerilmelerin yön, yer ve şiddet değiştirmesiyle oluşan gerilme dağılımıdır ve dar anlamdaki arazi basıncı da budur. İkincil gerilmelerin dağılımı sırasında boşluk çevresinde oluşan yeni gerilmelerin şiddetlerine ve kayanın dokusuna bağlı olarak yukarıda bahsedilen "kemerlenme" adı verilen yüklerin yoğunlaştığı bölgeler meydana gelir (Şekil 12.6. E, F ve G). Yer altı boşluğunun açılmasından sonra oluşan ve teknik girişimler olmaksızın kendi içinde dengeli konuma gelen ikincil (sekonder) gerilme durumunun, daha sonra farklı kökenli kuvvetlerin etkisiyle yeniden değişmesiyle **tersiyer (üçüncül) gerilme** durumu meydana gelmektedir. Tersiyer gerilmelerini; sağlamlaştırma dirençleri, dolgu basınçları, kabarma basınçları ile üretim, yapı, kazı, sağlamlaştırma ve su basıncının değişmesiyle ortaya çıkan dış kuvvetler oluşturmaktadır.

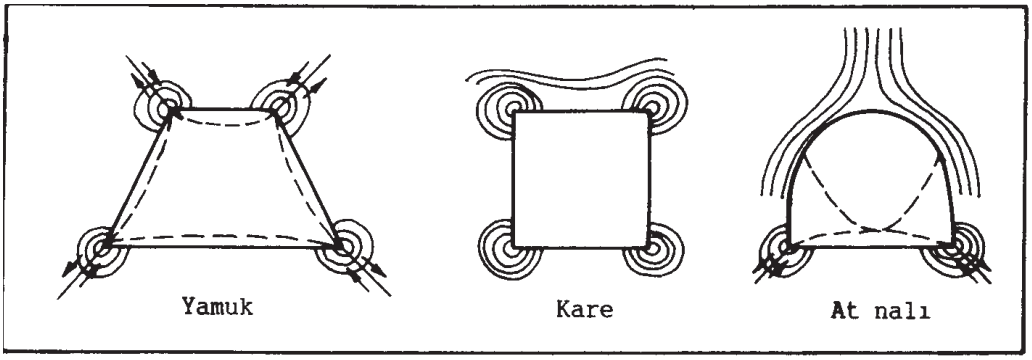
Gerilmeler, dairesel kesitli açılan tünellerde en ideal şekilde kayaya aktarılmakta, diğer tiplerde ise köşe ve kenarlarda aşırı yoğunlaşıp göçüklere neden olmaktadır.



Şekil 12.6.E) Yer altında açılan bir boşluk (tünel) çevresinde oluşan farklı gerilme bölgeleri:
Elâstik bölge (kazıdan etkilenmemiş ve doğal yapısını koruyan kaya);
Koruyucu bölge (*Protective Zone*, Wiesmann-Trompeter Schutzzone) ve
Plâstik bölge (kalıcı deformasyon kazanmış gevşeme zonu).



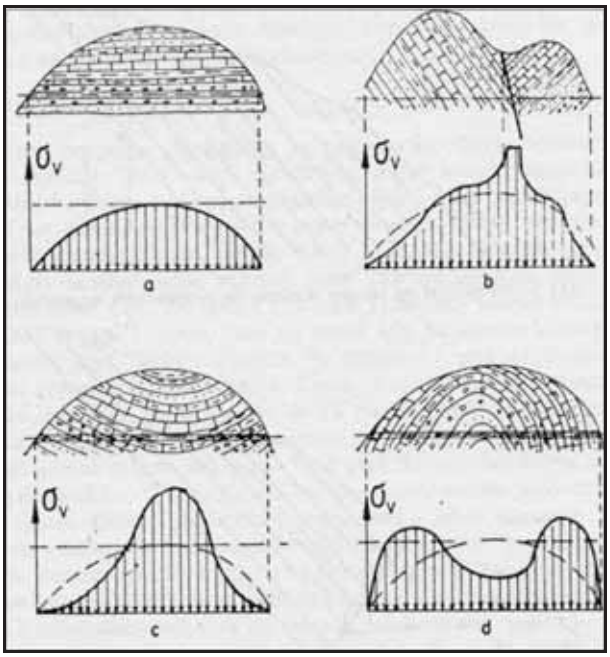
Şekil 12.6.F) Dairesel kesitli (modern) tünelde, tünel açılırken oluşan sekonder (düşey ve yatay) gerilmelerin dağılışı (Yılmaz, 2007). Düşey gerilmeler tünel yan duvarlarına yaklaştıkça birbirlerine paralel, ancak sık aralıklıdır.



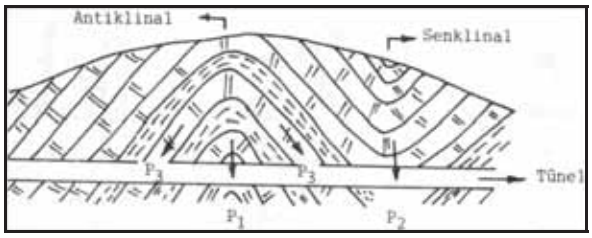
Şekil 12.6.G) Kesitlerine göre köşeli (yamuk ve kare) ve at nalı tipli açılan eski tip tünellerde gerilmelerin aşırı yoğunlaştığı kesimler.

Bir tüneli etkileyen diğer önemli sorunlardan bazıları da örtü birimlerinin kalınlığı yanında tabaka düzlemlerinin konumları (yatay, antiklinal, senklinal yapı) ya da güzergâha yakın veya güzergâhı kesen ve ezik zonları içeren fay veya dayk düzlemlerinin varlığıdır. Bu tür yapılar, tünel güzergâhının bazı kesimlerine beklenenden daha fazla yükler aktarmaktadır. Tabaka doğrultu eğimlerine ve tabaka yapılarına göre değişen miktarlarda, örtü birimleri tünel tavanında beklenen düşey ve yatay doğal gerilmeler nedeniyle tünellerin üzerine farklı gerilme etkisi yaratacaktır (Şekil 12.7, 12.8). Düşey gerilmeler, yatay tabakalı bir birimde, tünelin her iki ucundan ortasına doğru ilerlerken yaklaşık homojen bir biçimde, örtü kalınlığı ve kayaç yoğunluğu ile orantılı olarak artarken (Şekil 12.7.a), tabakaların eğimli olduğu veya tünelin bir fayı kestiği kesimlerde ise (Şekil 12.7.b), örtünün tünele uyguladığı gerilmeler beklenenden daha büyük olacaktır. Faylar, yer değiştirmiş kırıklar olduklarından, yer değiştirmenin bir sonucu olarak bulundukları ve oluşturdukları zayıflık zonları boyunca, tünelin üzerinde aşırı gerilme artışına neden olurlar (Şekil 12.7.b). Kıvrımlı tabakalarda ise kıvrımın senklinal ekseninden geçen tünelde, kıvrımı oluşturan eksen kesiminde yük miktarını arttırırken (Şekil 12.7.c), doğal bir kemer yapısı oluşturan antiklinal tip kıvrımlarda tünel üzerine binen yük, tabakaların tabiî kemerlenmesi nedeniyle yanlara aktarılacak ve tünelin antiklinal eksen düzlemine paralel geçtiği kesimlerde, beklenen gerilme daha da az olacaktır (Şekil 12.7.d). Antiklinal ve senklinalden oluşan kıvrımlı tabakaların bir arada görüldüğü tünel boyunca Şekil 12.8'de görüldüğü gibi yine tünel üzerinde, tünel tavanı kaplamasına en yüksek basınç değeri senklinal ekseninde meydana gelirken (Şekil 12.8-P_2), antiklinal ekseninde örtü biriminin tünel tavanına uyguladığı basınç,

beklenenden düşük değerde olacaktır (Şekil 12.8-P_1). Antiklinalin kanatlarında ise antiklinal eksenine göre, tünel üzerine kanatlarda daha büyük bir basınç görülecektir (Şekil 12.8-P_3). Yani tünel tavanında ölçülen düşey ve yatay doğal gerilme bileşenleri, yer çekimi etkisi ile oluşan gerilmelerden daha büyük çıkacaktır.



Şekil 12.7. Tünelin içerisinden geçeceği tabakaların durumuna göre ("a" yatay tabakalar; "b" eğik tabakalar ve fay; "c" senklinal; "d" antiklinal) tünele etkiyecek muhtemel yük dağılımı (Erguvanlı, 1994).



Şekil 12.8. Tünel güzergâhının kıvrım eksen düzlemi ve tabaka doğrultusuna dik olması hâli (örn. Şekil 12.7. c ve d). P1<P3<P2: Tünele etkiyen basınçlar (*Zaruba* ve *Mencl*, 1976; Tarhan, 2002).

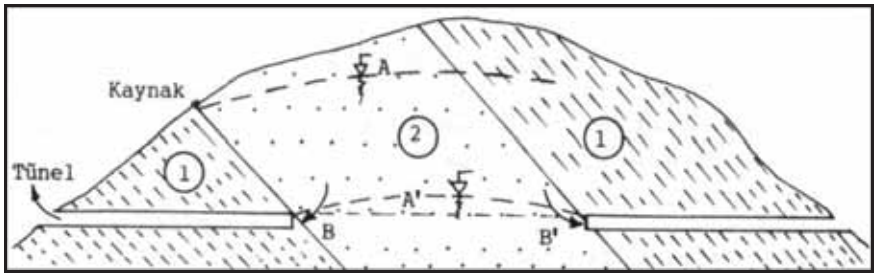
Yukarıda Şekil 12.6, 7 ve 8'de görüldüğü üzere tünellerin geçtiği güzergâh boyunca çok farklı jeolojik birimler, jeolojik yapı, tektonik ve bunun gibi nedenlerden güzergâh ortamına ait jeolojik modelin tam olarak yeterince ortaya konmaması ve mühendislik jeolojisinin, mekanik davranışın eksik olması, tünelin boyutlandırılmasından hesap ve projeye kadar uzanan hatalar zincirine neden olacağından bu tür tünellerde deformasyonlar ve sonuçta göçükler oluşabilecektir.

Tünellerde farklı türlerde deformasyonlar oluşabilmektedir. Karayolu, tünel, köprü, baraj, kule, yüksek binalar gibi her türlü mühendislik yapılarında ve yer kabuğu üzerinde geçici veya kalıcı etkiler altında malzemenin boyutunda veya şeklinde meydana gelen değişimlere genel olarak **deformasyon** *(strain)*, bir malzemenin artan gerilmeler sonunda meydana gelen şekil değiştirmesinin, gerilme ortadan kalktığı zaman, kaybolması yani malzemenin ilksel şekline dönme özelliğine **elâstisite** *(elasticity)* adı verilmektedir. Meselâ tünellerde elâstik, plâstik ve bunların her ikisinin de görüldüğü deformasyonlar vardır. Bunlardan; cisme etki eden kuvvetin ortadan kalkması durumunda, cismin tekrar eski hâline dönme durumu **elâstik** (geçici) **deformasyon**; etki eden kuvvet ortadan kalksa dahi cisim eski hâline dönemiyorsa yani yükleme sırasında oluşan deformasyonların, cisme etki eden kuvvetin ortadan kalkması sonrasında geriye dönmeden kalması durumu **plâstik** (kalıcı) **deformasyon**; sabit gerilmeler altında ve zamanla sıvıya benzer karakterdeki kalıcı deformasyonların *(residual strain)* oluşması ve zamanla artmasına **sünme,** akma (krip, *creep*) veya viskozluk olarak tanımlanmaktadır ve bu davranış "elâsto-plâsto viskoz ortamların belirgin özelliğidir. Plâstik davranış ise zamandan bağımsızdır. Bu durum zamana bağımlı oluyor ise **viskoz davranış** (akma, sünme) adını alır. Rijit, elâstik, plâstik veya viskoz davranışların bir kısmının veya tümünün bir arada görüldüğü davranışlar ise **karma davranışlar** olarak adlandırılır.

Tünellerde oluşan deformasyonlar, inklinometre ve ekstansometreler gibi **fiziksel deformasyon ölçme yöntemleri** ile ölçülmektedir. Tünelin geçtiği eksen boyunca kazıdan dolayı tünele doğru olan yanal deformasyonların miktarını ve yönlerini **inklinometre** yerleştirilerek; düşey deformasyonlar ise kuyuların içine yerleştirilen **çubuk ekstansometreler** ile ölçülüp takip edilmektedir. Ayrıca tünel iç cidarına beton ve çelik gerilmelerini ölçmek için **strengeç** (=birim deformasyon ölçer - *straingage*) yerleştirilmektedir. Kısaca; çubuk ekstansometreler, tünel içi deformasyon **(=konverjans=**tünel iç cidarı konum değişimleri) ölçümleri, tünel içi *****üç boyutlu jeodezik ölçümler (opto-trigonometrik), yüzey ve bina oturma ölçümleri, inklinometreler, kaya bulonu yük hücreleri ve basınç hücreleri ölçümleri, tüneller için yapılan ölçümleri oluştururlar. Bunların dışında, yeraltı su seviyesindeki meydana gelebilecek değişimleri takip edebilmek için tünel güzergâhı boyunca belli aralıklar ile piyezometre kuyuları

açılarak, piyezometre yerleştirilmek suretiyle (elektrikli veya hidrolik piyezometre vb.) ölçümler alınmaktadır ***[üç boyutlu jeodezik izleme yöntemi:** Yer altı kazılarında gerilmelerin ve dağılma değişiklilklerinin hassas tanımlanmasına yardımcı olan ve yer altı biçim değişikliklerinin (tünel içi deplasman ve deformasyonlar) jeodezik ölçme büyüklükleri (yatay açı, düşey açı, yükseklik farkı, mesafe vb.) kullanılarak yatay ve düşey konum değişimlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntem**]**.

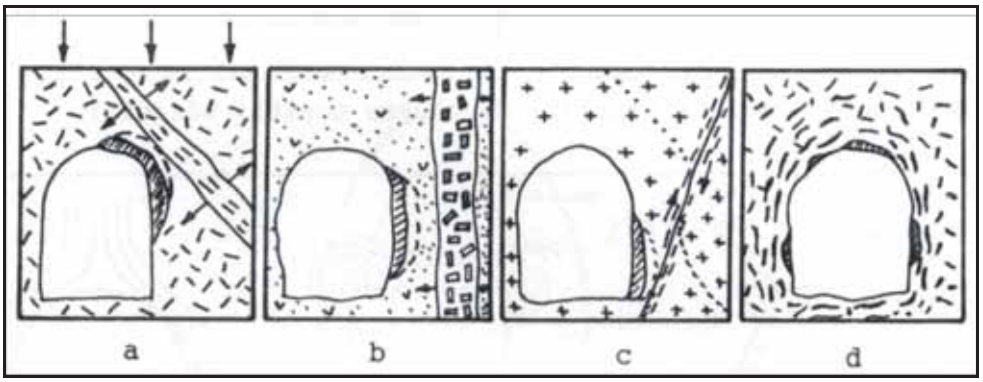
Yeraltı suları, tünel yapımı sırasında jeolojik kökenli oluşabilecek bir diğer önemli problemin kaynağını oluşturur. Tünel güzergâhı boyunca su problemi ile karşılaşma ihtimalî, önceden yapılan jeolojik çalışmalarla ortaya konmalıdır. Yeraltı su düzeyi altındaki suya doygun bölgeyi kesecek olan tünellerde, yeraltı sularından kaynaklanan olumsuzluklara rastlanılmaktadır. Bu olumsuzluklar yeraltı suyunun doğrudan tüneli basması (Şekil 12.9) veya suya doygun zeminlerdeki göçükler olarak gözlenmektedir. Bu nedenle yeraltı su düzeyi altındaki tünel çalışmalarında tünel iyi tahkim edilmeli ve su kaçaklarına karşı önlem alınmalıdır. Yeraltı su seviyesi altında açılan tünellerde su, tünel içine geçirimliliği yüksek olan ayrışmış, gözenekli ve çatlaklı kayaçların çatlakları boyunca geldiğinden tünel açılmasını büyük ölçüde zorlaştırırlar. Tünel güzergâhı boyunca farklı litolojideki geçirimli ve geçirimsiz kayaçların ardalanması, tünek akiferler, fay zonları ya da kireçtaşı, mermer gibi karstik yapıların erime boşlukları içinde biriken sular, su patlamalarına neden olabilirler.



Şekil 12.9. Her iki yönden geçirimsiz birimlerden geçen tünel kazısında, bir akiferin kesilmesi sonucu yeraltı suyunun tüneli basması ve tünel boyunca boşalması. 1-Geçirimsiz kayaç, 2-Geçirimli kayaç, A: Tünel açılmadan önceki yeraltı su seviyesi, $A^{/}$: Tünel açıldıktan sonraki yeraltı su seviyesi, B, $B^{/}$: Tünel açılmasıyla su akımının artması, tünelin drenaj galerisi gibi çalışması (Tarhan, 2002).

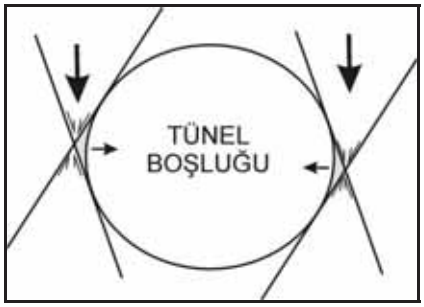
Tünel içine gelen yeraltı sularının kimyasal bileşimi de, tünel desteklenmesinde kullanılan çelik ve beton üzerinde zararlı etkilere neden olabileceğinden, bu etki derecesinin anlaşılması için suda $CaSO_4$, $NaSO_4$, $MgSO_4$, H_2S, CO_2 ve $Ca(HCO_3)_2$ olup olmadığı araştırılmalıdır. Zira sülfatlı

sular beton üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır. Bu maddelere jipsli, anhidritli, piritli, kömürlü ve kükürtlü sahalardan gelen sularda daha çok rastlanılır. Tünellerde rastlanılan jeolojik problemlerden bir diğeri de kaya patlamalarıdır. Yeraltı kaya yapılarının tüneli çevreleyen kesimlerinde anî gerilme artışları ile gaz ve su basınçlarındaki anî artışlar nedeniyle görülen ve yeri, zamanı, şiddeti ve miktarı önceden belirlenemeyen anî sökülme, kırılma ve göçme olaylarına **kaya patlamaları** denir. Kaya patlamaları gevrek-kırılgan *(brittle)* davranış gösteren birimlerde meydana gelir. Obsidiyen (volkan camı), masif sağlam bazalt ve granit gibi aşırı yük taşıyabilen kayalar, kaya patlamalarının gerçekleşebileceği en riskli kaya grupları içerisinde yer alırlar. Bu tür kayaların serbest basınç dirençleri genellikle 140 MPa'dan (1427 kg/cm^2) büyüktür. Tünellerde, yüzeyden derinlik arttıkça kaya patlaması sorunu da artar (Şekil 12.10). Kaya patlamaları, zemin yüzeyinden bilhassa 600 m'yi aşan derinliklerdeki kazılarda daha etkili ve yaygınca görülmektedir. Ancak kaya patlamaları, "kiraz çekirdeği olayı" ile karıştırılmamalıdır.



Şekil 12.10. Jeolojik koşulların kaya patlamasına etkisi. a) Mikaşist merceği, b) Dayk, c) Fay, d) Sağlam gevrek kaya (*Wahlstrom*, 1973; Tarhan, 2002).

"**Kiraz çekirdeği olayı**" (Kirsch-kern-effekt): Yeraltı kaya yapısının, sekonder düşey gerilmelerin etkisiyle yan duvarlardan kesilerek boşluk içine anîden fırlaması olayıdır. Bu olay, çapraz gelişmiş bir süreksizlik sistemini kesen tünellerde, süreksizliklerle sınırlanan kayaların düşey gerilmelerin etkisi ile yan duvarlardan tünel boşluğunun içerisine fırlaması, hareketin yanlarından sıkılan bir kirazın çekirdeğinin fırlaması benzeri bir mekanizmaya sahip olması nedeniyle "kiraz çekirdeği olayı" veya etkisi olarak tanımlanır (Şekil 12.11).



Şekil 12.11. Kiraz çekirdeği olayı. Tünel yan duvarlarının, ikincil (sekonder) gerilmeler etkisi ile süreksizlikler boyunca, tünelin içerisine doğru fırlaması.

Tünel kazılarında, tünel cidarı ve tavanında meydana gelen ve istenilen kesitten daha fazla hafriyata sebep olan profil fazlası (=ödeme hattı fazlası) düzensiz göçmelere **aşırı sökülme** adı verilir. Kayacın ayrışma derecesi, içerdiği süreksizlikler ve sıklıkları, tünel kesit alanı ve tipi, eğer patlayıcı kullanılıyorsa, patlatma yöntemi ve patlayıcı türü, kazı ano boyu, aşırı sökülmeyi doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Isı ve gaz sorunu, tünel güzergâhları boyunca rastlanabilecek önemle dikkate alınması gerekli diğer hususları oluştururlar:

Yer kabuğunda zemin yüzeyinden itibaren yerin içine inildikçe jeotermik gradyan nedeniyle **ısı** artmaktadır. Sıcaklığın artması ise yer kabuğunun her yerinde aynı değildir. Jeotermal gradyan (jeotermik derece) vâdi altlarında az, dağların altında fazladır. Yeryüzüne yakın katmanlarda yerin içine, her 100 m derinlik için ortalama sıcaklık artışı 1,8°C - 3°C arasında değişmektedir. Volkanik sahalarda ısı artışı daha fazla olup yaklaşık 10 m – 15 m'de 1°C olabilmektedir. Ancak sıcaklığı etkiyen faktör sadece derinlik değildir. Örnek olarak yatay tabakalı ortamda sıcaklık, düşey tabakalı ortama göre daha fazladır. Bunların yanında, yeryüzünden kayaçların süreksizliklerinden yerin içine süzülen ya da hareket hâlinde olan soğuk sular sıcaklığı düşürmekte, buna karşılık termal sular, radyoaktif reaksiyonu olan sahalar ise sıcaklığı yükseltmektedir. Ayrıca oksidasyon, ayrışma, mineral dönüşümleri gibi kimyasal reaksiyonlar, tabakaların doğrultu ve eğimleri, kayaçların iletkenliği tünelin uzunluğu sıcaklığı etkileyen diğer faktörlerdir. Sıcaklığın artması galeri içinde çalışma koşullarını (>25°C) zorlaştırdığından ve verimi de düşürdüğünden bilhassa 40°C'yi aşan sıcaklıklarda soğutulmuş havaya ihtiyaç duyulmakta, bu da su püskürtme, artırımlı havalandırma veya soğutulmuş hava kullanılarak tünel ısı koşulları iyileştirilebilmektedir.

Kayaçlar içinde doğal yol ile oluşan **gazlara**, tünel kazı çalışmaları sırasında sıkça karşılaşılmaktadır. Jeolojik olarak metan (CH_4) gazına petrol, kömür, bitümlü şeyl havzaları, bataklık bölgeler ve yakın civarlarında rastlanılmaktadır.

Karbondioksit (CO_2 nin gaz hâlindeki yoğunluğu: 1,977 gr/cm^3) ve karbonmonoksit (CO, yoğunluğu: 1,2506 gr/cm^3) gazları renksiz, kokusuz ve havadan ağır olup toksik (zehirleyici) özellik taşırlar ve kömür havzalarında yaygınca bulunurlar. Ayrıca volkanik bölgeler ile kireçtaşlarında da bu tür gazlara rastlanılır.

Hidrojen sülfür=Hidrojen sülfit (H_2S); havadan ağır (yoğunluk: 1,363 gr/cm^3) gaz hâlinde bulunan, çürük yumurta kokusunda, havayla karıştığında patlayıcı özelliğe sahip, zehirleyici etkisi olan bir gazdır ve organik çökellerde organik maddelerin ayrışması ile meydana gelir. Hidrojen sülfür; aktif volkanik bölgelerde, organik killerde, tabiî gaz kuyularında, jeotermal sahalarda ve az miktarda petrolde (kara altın) bulunurlar ve su ile absorbe edilmeleri sonucunda beton üzerinde korozif (aşındırıcı) etkiye sahip sıvılar oluşur.

Gerek aşırı **ısı**, gerekse zararlı **gaz** sorunlarını ortadan kaldırmanın başlıca yolu, tünel veya galeri içlerinde, daima kirlenmemiş temiz hava bulundurmaktır. Bunun için, düşey ya da yan bacalar (örn. düşey, eğik ve yatay tünellerin yapılması) yanında hava basan ya da emen motorlar vasıtasıyla vantilâtör ve havalandırma borularından yararlanılarak havalandırma yapılmalıdır. **'Havalandırma'**nın amacı, tünel içinde gerekli temiz hava miktarının temin olunmasıyla güvenli ve sağlıklı çalışma koşullarının elde edilmesi şeklinde açıklanabilir. Diğer bir deyişle, sevk edilen havadan beklenen; tünel içinde işçilere temiz hava temin etmek, patlayıcı ve zararlı gazların ve tozların hava içindeki oranlarını azaltmak veya dışarıya sevk etmek, işyeri havasını iklim şartları bakımından iyileştirmektir. Henüz kirlenmemiş olan temiz hava, özellikle tünel havalandırmasında yeryüzü atmosfer havası ile aynı bileşimdedir.

Atmosferi; yani yerkürede yaşanabilen tabiî temiz havayı oluşturan esas gazlar, hacimce; % 20,95 oksijen (O_2), % 78,08 azot=nitrojen (N_2), atmosferin aşırı soğumasını önleyici su buharı (değişken, ~% 1), % 0,93 argon, % 0,03-0,04 karbondioksittir (CO_2). Eser (=zerre=*ppm) miktarda bulunan gazlar ise neon, helyum, metan, ozon, amonyak, hidrojen, kripton vb. gazlardır.

***[1ppm**=Milyonda bir birim; herhangi bir karışımda toplam madde miktarının milyonda bir birimlik maddesi *(parts-per-million*, ppm, 10^{-6})**]**.

Tünel içinde bulunan değişen miktardaki su buharı, havadaki azot oksijen oranını etkilemez. Örnek olarak eğer tünelde oksijen içeriği % 20'den az ise ortam "**pis hava**" olarak adlandırılır ve azalıma bağlı olarak % 10'dan daha az oksijen kısa zamanda öldürücü özelliğe sahiptir. Boğucu özelliğe sahip pis hava tanımında yüksek konsantrasyonda CO_2 ve N_2 içeren hava da pis hava grubu içinde yer almaktadır.

Yoğunluğu nedeniyle kazı tabanında toplanan karbondioksit (CO_2) temiz hava içinde % 10 civarında olması durumunda insanları komaya sokacağından müsaade edilen maksimum CO_2 konsantrasyonu % 0,5' tir.

Karbonmonoksit (CO); renksiz, kokusuz bir gaz olup yoğunluğunun hava yoğunluğuna yakın olması (1,2506 gr/cm^3) nedeniyle tünel atmosferi içinde her tarafta yayılmış şekilde bulunur ve zehirleyici ve patlama özelliğine sahiptir. Sobalarda mavi alevle yanan ve çok kuvvetli bir zehir olan karbonmonoksitin havada müsaade edilebilir tehlikesiz maksimum konsantrasyonu % 0,005'tir. Yaşamı acilen tehdit eden düzey % 0,12'dir. Ortamda % 0,4 CO anî ölüme neden olmaktadır. Burada, insanların CO bulunan ortama mâruz kalım süresi çok önemlidir. Patlama sınırları ise % 13-75 arasında olup en tehlikeli patlama konsantrasyonu % 30'dur. Karbonmonoksit; kömür damarları geçilirken ya da yangın ve patlamalarda ilk oluşan zehirleyici bir gazdır. Bunların yanında günümüzde insanlarda CO zehirlenmelerinin sık oluş nedeni fabrika ve egzoz gazları, odun, kömür, gaz gibi yapısında karbon taşıyan bileşiklerin tam yanmaması sonucu açığa çıkan karbonmonoksitten kaynaklanmaktadır. Eksik yanma ile $C+O \rightarrow CO$ karbonmonoksit; tam yanma ile $C+O_2 \rightarrow CO_2$ karbondioksit oluşmaktadır.

Hava içinde CO yanında H_2S, azot oksitleri, SO_2 ve radon gibi gazlar da zehirleyici gazları oluştururlar. Hidrojen sülfür (H_2S) havada % 1'den az orandaki karışımı (% 0,1-0,5) zehirleyici, % 6 oranından fazla olması durumunda ise patlayıcı özelliğe sahiptir.

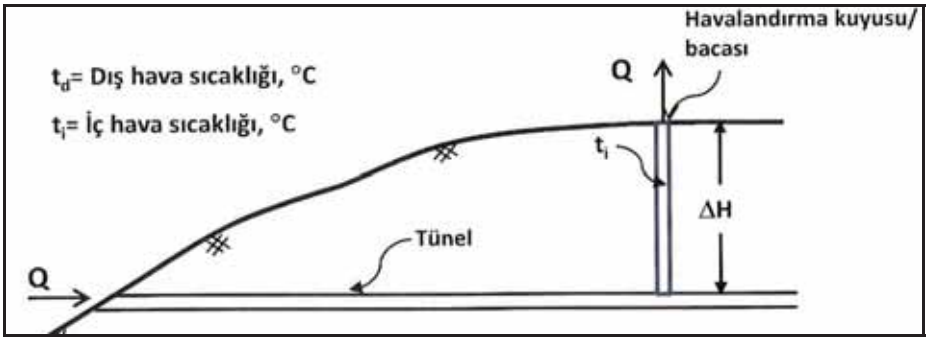
Kükürt dioksit olarak da bilinen sülfür dioksit (SO_2) renksiz, keskin kokulu, boğucu etkiye sahip ve su içerisinde kolayca eriyerek sülfürik asidi oluşturan

bir gazdır. Bu gaz genellikle volkanik oluşuklardan kaynaklanır veya Pirit'in (FeS_2) bozulması ile ortaya çıkar (Yılmaz, 2007).

Sedimantasyon sırasında bitki artıklarının parçalanması sonucu bol miktarda oluşan renksiz ve kokusuz patlayıcı özellikteki metan (CH_4 vb.), kayaç içinde saklı kalır. Bataklık gazı olarak da adlandırılan hidrokarbondan oluşan metan gazı, sadece kömürde değil, kaya tuzu, potas, kükürt ve demir madenlerinde de görülebilir. Dolayısıyla sedimenter kayaçlarda ve kömür vb. yataklara yakın yerlerde yapılacak tünel kazılarında metan gazı ile karşılaşılabilinir. Havadan hafif, renksiz, kokusuz, gaz hâlindeki yoğunluğunun 0,716 gr/cm^3 olması nedeniyle tünel tavanında toplanan metan (CH_4), zehirli olmamasına rağmen yanıcı ve patlayıcı özelliği olan bir gazdır. Bu gazın (metan yanında etan, propan ve bütan) hava ile karışımına "**grizu**" denmektedir. Metan yandıktan sonra da CO'ya dönüşerek ½ ya da 1 saat içinde öldürücü etki yapar. Metan gazı hava ile karışımındaki oran % 5 civarında olursa patlayıcı olur. Eğer bu metan konsantrasyonu % 5'in altında ise patlama olmaz, yanar. % 14'ün üzerinde de yüksek özgün ısısı ve oksijen azlığı nedeniyle patlama özelliği yok olur, tehlikesiz sayılabilecek konsantrasyonu % 1'dir (Ayvazoğlu vd., 1994). Ancak bu konsantrasyon % 1,5'i aşmamalı, tünel genel havasında metan konsantrasyonu % 2 olduğunda ise tünel terk edilmelidir. Metanın yanma ısısı, ısı kaynağına bağlı olarak 650°C-750°C arasında değişmekte, patlamadan sonra çevrede ısı 1.800°C-2.500°C'ye kadar çıkmaktadır ve patlamadan sonra ortamın basıncı 9 kat artmaktadır. Yani tünelde göçük; patlama (=çok hızlı yanma) anında oluşan büyük basınç nedeni ile meydana gelmektedir.

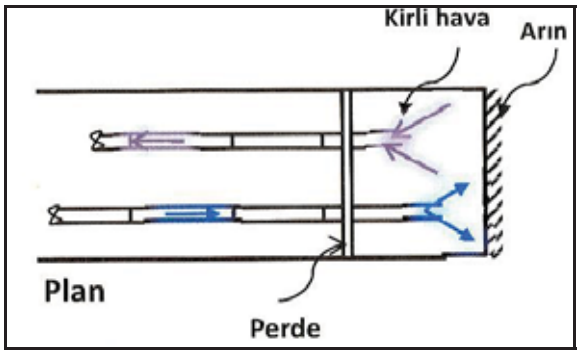
Taş tozu, tünelde arzu edilmeyen ve delme ateşleme dolgu ve göçük sonucu ortaya çıkan, silis gibi erimeyen, sağlığa zararlı ve akciğerlere yerleşen zerre büyüklüklerinde taneciklerden oluşan tozlardır. İçinde taş tozu bulunan havaya "**tozlu hava**" adı verilir. Sağlığa zararlı olup akciğer hastalıklarını (pnömokonyoz, *pneumoconiosis*, staublunge) meydana getirir. Tünellerde bu tür toz ve zehirli, yanıcı, patlayıcı gaz oluşumları önlemek, tünelin aşırı sıcaklığına engel olmak için daima temiz havanın korunması gerekmektedir. Bu koruma, doğal ve mekanik havalandırma ile sağlanmaktadır.

Doğal havalandırma: Mekanik havalandırmaya yardımcı olmak gayesiyle dışarıdan tünele bağlamak üzere havalandırma kuyuları açılarak tünelin ek temiz hava ihtiyacı sağlanabilmektedir. Ayrıca havalandırma kuyusu/bacası uzun tünellerde "işletme" sırasında havalandırma ihtiyacının karşılanmasında etkindirler. Tabiî olarak gerçekleşen bu tür havalandırmada, sıcak hava kütlesinin yoğunluğunun soğuk havaya nazaran daha az olması nedeniyle tüneldeki tabiî hava sirkülasyonu kış rejiminde $(t_i-t_d)>0$ olduğundan, temiz hava alt kottan üst kota doğru, yaz rejiminde ise tam tersi yönünde bir hava sirkülâsyonuna neden olur (Şekil 12.12) ve kot farkı (ΔH) ne kadar fazla ise temiz hava sirkülasyonu da o kadar güçlü olur.



Şekil 12.12. Doğal havalandırma sistemi.

Mekanik havalandırma: Tünel açılırken ve açıldıktan sonra vantilâtörlerle tünel içindeki temiz hava akışı sağlanmaktadır. Tünel içindeki havalandırma, henüz hava dönüş bağlantıları sağlanmamış tünellerde (tâli/ikincil havalandırma), tünel açılması nedeniyle daha çok önem kazanmaktadır. Tâli havalandırma; üfleyici, emici ve "üfleyici ve emici" gibi sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemlerden birini oluşturan üfleyici ve emici sistem, Şekil 12.13.'de örnek olarak verilmektedir.



Şekil 12.13. Tünel kazısında üfleyici ve emici havalandırma sisteminin üstten görünüşü (Arıoğlu, 2009).

Şekil 12.13'de görüldüğü gibi tünelin açıldığı yüzeyde, yani ayna (arın) bölgesinde hem üfleyici hem de emici gibi iki sistemin birlikte uygulanması nedeniyle tünel aynasında sürekli temiz ve serin hava sirkülâsyonu vardır. Ayna arkası kesimlerde ise kirli ve sıcak hava zonu yoktur. Etkin havalandırma sağlanmıştır. Yatırım ve enerji masrafı açısından daha pratik bir sistemdir.

Diğer mühendislik hizmetlerinde olduğu gibi tünel çalışmalarında da trafik ve çevre düzenlemeleri yanında, hizmet veren tüm çalışanların, çalışma öncesi emniyetlerinin sağlanması, tünel eğitimlerinin eksiksiz tamamlanması ve her an sağlıklarının korunması öncelikle alınması gerekli önlemleri oluşturmalıdır.

12.2. ÖRNEK, UYGULAMA ve YORUMLAR:

12.2.1. Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli:

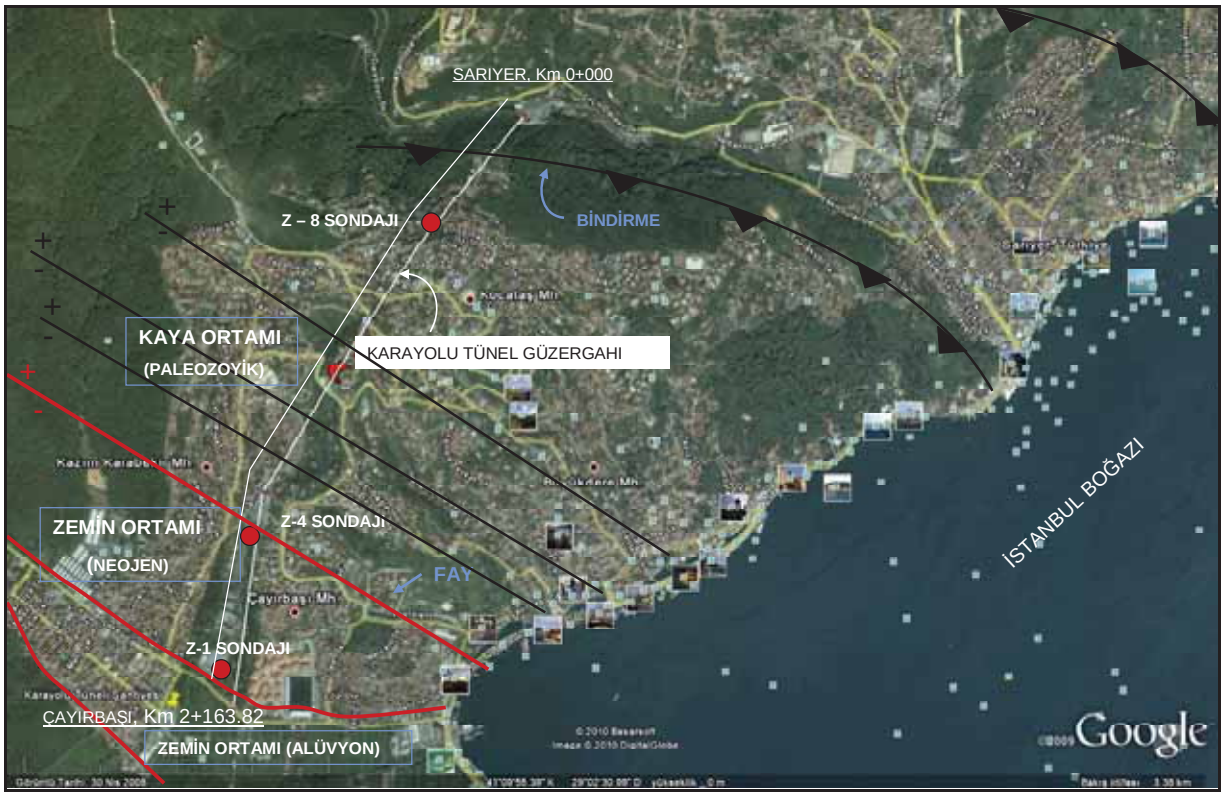
İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından Sarıyer-Çayırbaşı arasında, İstanbul Boğazı karayolu sahil trafiğini rahatlatmak ve E5 ile TEM'e ulaşımı kısa zamanda sağlamak gayesiyle bir tepenin altından gidiş ve gelişi ayrı ayrı olmak üzere çift tüplü karayolu tüneli inşa edilmiştir. Yapımına 2008 yılında başlanan "Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli" girişi, Sarıyer Çırçır Suyu Vâdisi güney yamacında, yaklaşık +32,50 m kotlarında başlayıp, Çayırbaşı Tekel Fabrikası güneyinde -5 m kotlarında sona ermektedir. Tünel, çift tüp hâlinde 2+163.82 m ana hat tüneli, 163 m yaklaşım tüneli ve 8 adet bağlantı tünelinden oluşmaktadır. Beş klâstan oluşan ana tünel hatları 13,5 m ilâ 13,9 m arasında değişen genişlikte ve 8,86 m yükseklikte plânlanmıştır. Tüpler arası mesafe (eksenden-eksene) ortalama 37,5 m'dir. Ana tünellerin yaklaşık Km 1+550.00 metresinde plânlanan yaklaşım tüneline ait çap 7 m, ana hat tünelleri arasında inşa edilecek 8 adet bağlantı tüneli ise 6,8 m çapında plânlanmıştır. Tünel güzergâhı boyunca zemin yüzeyinden 30 m ilâ 187 m derinlikler arasında değişen toplam uzunluğu yaklaşık 640 m olan 9 adet zemin etüt sondajı yapılmıştır. Tünelin örtü kalınlığı 30 m ilâ 170 m arasındadır. Tünel güzergâhının Çayırbaşı girişinde görülen gevşek tutturulmuş zemin ortamında yeraltı su seviyesi zemin yüzeyine çok yakın olup güzergâhın Z1-Z4 sondajları arası kesiminde yüzeyden 2 m ilâ 8 m derinlikler arasında yer almaktadır. Güzergâhın diğer kesimleri oluşturan kaya ortamlarında ise sızıntı sular

haricinde yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Tünel, Yeni Avusturya Yöntemi ile (NATM) 2008 yılında yapılmaya başlanmış, kazı işlemleri iç kaplaması 2009 yılında tamamlanmış, 2011 yılında açılması plânlanan tünelin, kaya ortamlarındaki ezik zonların oluşturduğu problemlerin giderilme çalışmaları ve kamulaştırma sorunlarının uzaması nedeniyle 08 Eylül 2012 tarihinde hizmete açılmıştır. Örnek Şekil 12.2.A'da mühendislik jeolojisi haritasında gösterildiği üzere Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünel Güzergâhı birbirlerinden kırmızı dokanak çizgileriyle ayırt edilmiş üç farklı kayaç ortamı içinden geçmektedir. Bu ortamlar, 1) Sarıyer tünel girişinden itibaren Km 0+000.00 ile Km 1+550.00 arası grovak, silttaşı, kireçtaşı gibi kayalardan oluşan "Kaya Ortamı"nı temsil eden Paleozoyik dönem çökelleri (12.2.B); 2) Km 1+550.00 ile Km 2+110.00 arası gevşek tutturulmuş killi kumlu "Zemin Ortamı"nı temsil eden Neojen dönemi çökelleri 3) Km 2+110.00 ile Km 2+163.82 arası Çayırbaşı tünel çıkış kesiminde yer alan gevşek killi-siltli kumlu ve yine "Zemin Ortamı"nı temsil eden güncel alüvyal çökellerden oluşmaktadır (Örnek Şekil 12.2.C).

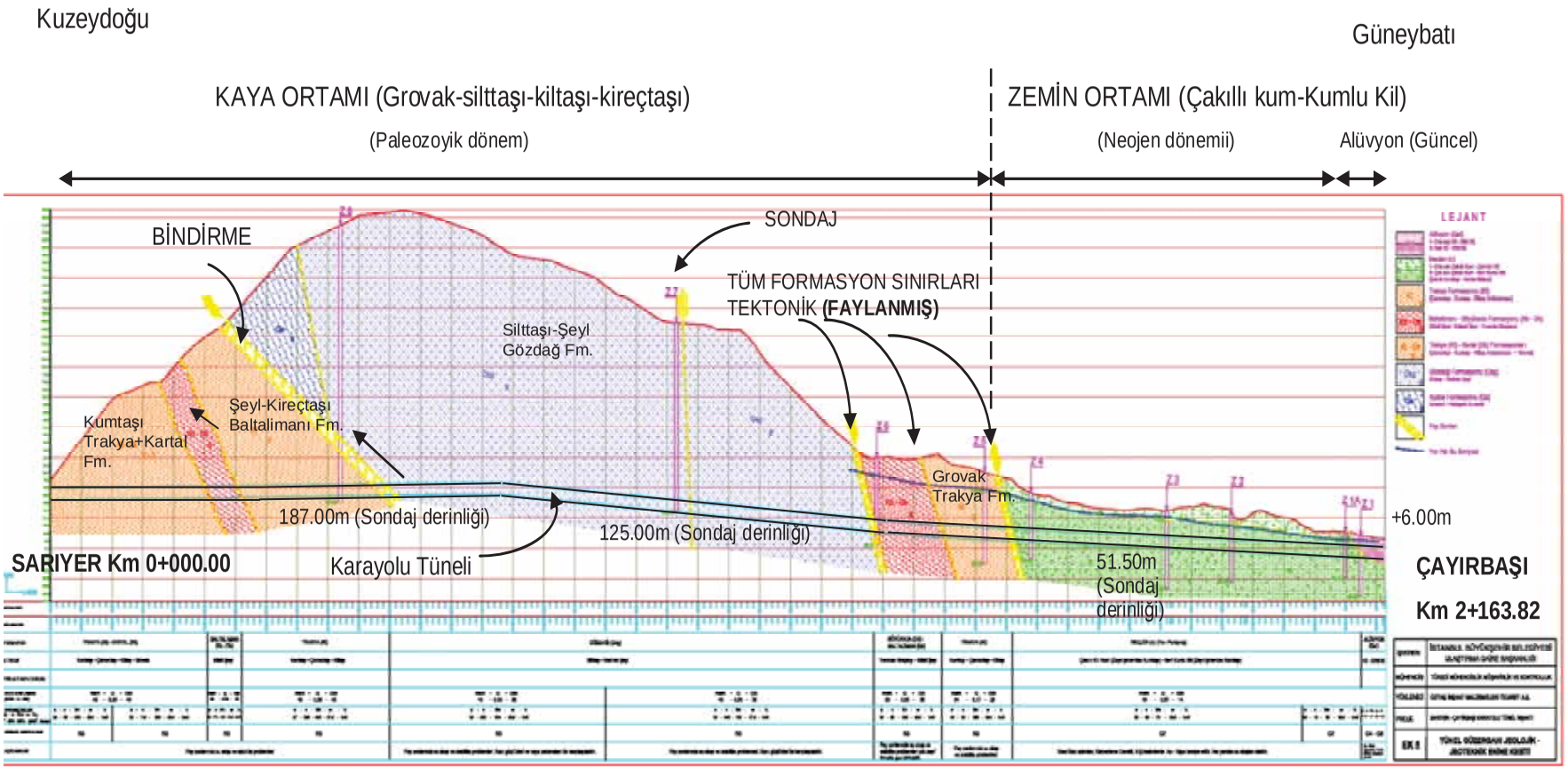
Tünelin Sarıyer girişinden (Km 0+000.00), yaklaşık Km 0+250.00 ile Km 0+550.00 uzaklıklar arası güzergâh, kaya ortamından geçmekle birlikte, bu kesimler eski sürüklenim zonlarını (bindirme zonu) oluşturduğundan, tünel güzergâhını kesen bu zonlar boyunca; etkinliği yer yer 40 m - 50 m'lik mesafelere ulaşan göçüklere neden olmuştur. Bindirme zonu olarak tariflenen bu ezik kesimler, ölü ters fay, sürüklenim ve makaslama zonlarını oluşturmuş, tünel açılması çalışmaları sırasında ise sık sık stabilite problemlerine neden olmuştur. Bu sebepten, jeoloji, jeofizik, inşaat ve geoteknik mühendislerinin koordineli bir çalışma içinde güzergâh boyunca ve güzergâhın bilhassa bu kesimlerinde oluşabilecek muhtemel problemlerin iyi irdelenerek, gerekli önlemlerin önceden alınması ve belirlenmesi gerektiğini göstermiştir. Bunun için de, standartlara uygun yapılması ve denetlenerek değerlendirilmesi gerekli zemin etüt sondajlarında, sondaj uzunlukları toplamı tünel güzergâhı boyu kadar uzunlukta olması dikkate alınması, ezik zonlar ile farklı kaya ya da zemin ortamlarının geçiş bölgelerinde ve ayrışmış kesimlerde ilâve sondajlar yapılması ve doğru yapılacak yorum ve değerlendirmeler ile oluşabilecek problemler minimuma indirilebilmesi takip edilmesi gerekli esas hedefleri oluşturmaktadır. Aksi takdirde, tünel açma çalışmaları sırasında emniyet azalacak, maliyet, proje değişiklikleri ve zamansal gecikmeler gibi sorunlar

ortaya çıkabilecektir. Zaman kaybına da neden olan sorunların çözümüyle, 08 Eylül 2012 tarihinde hizmete açılan, her biri iki şerit ve emniyet şeritli inşa edilmiş, en son teknoloji ile donatılmış elektro-mekanik sisteme sahip ve geliş gidiş olmak üzere iki ayrı tüpten oluşan Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli, İstanbul Boğazı sahil yolu trafiği yoğunluğunu rahatlatmıştır. Tünelle Hacıosman Bayırından Kilyos Caddesine giden mesafe % 40 azalmış, yaklaşık 1 saatlik araba yolculuğu 5 dakikaya inmiş ve bölgeye erişimde tek ana arter olan İstanbul Boğazı sahil yolu trafik yükü de büyük ölçüde azalmıştır. Ayrıca Kilyos ve Zekeriyaköy Bölgesi yolu, Sarıyer merkezine girmeden ana artere bağlanmıştır.

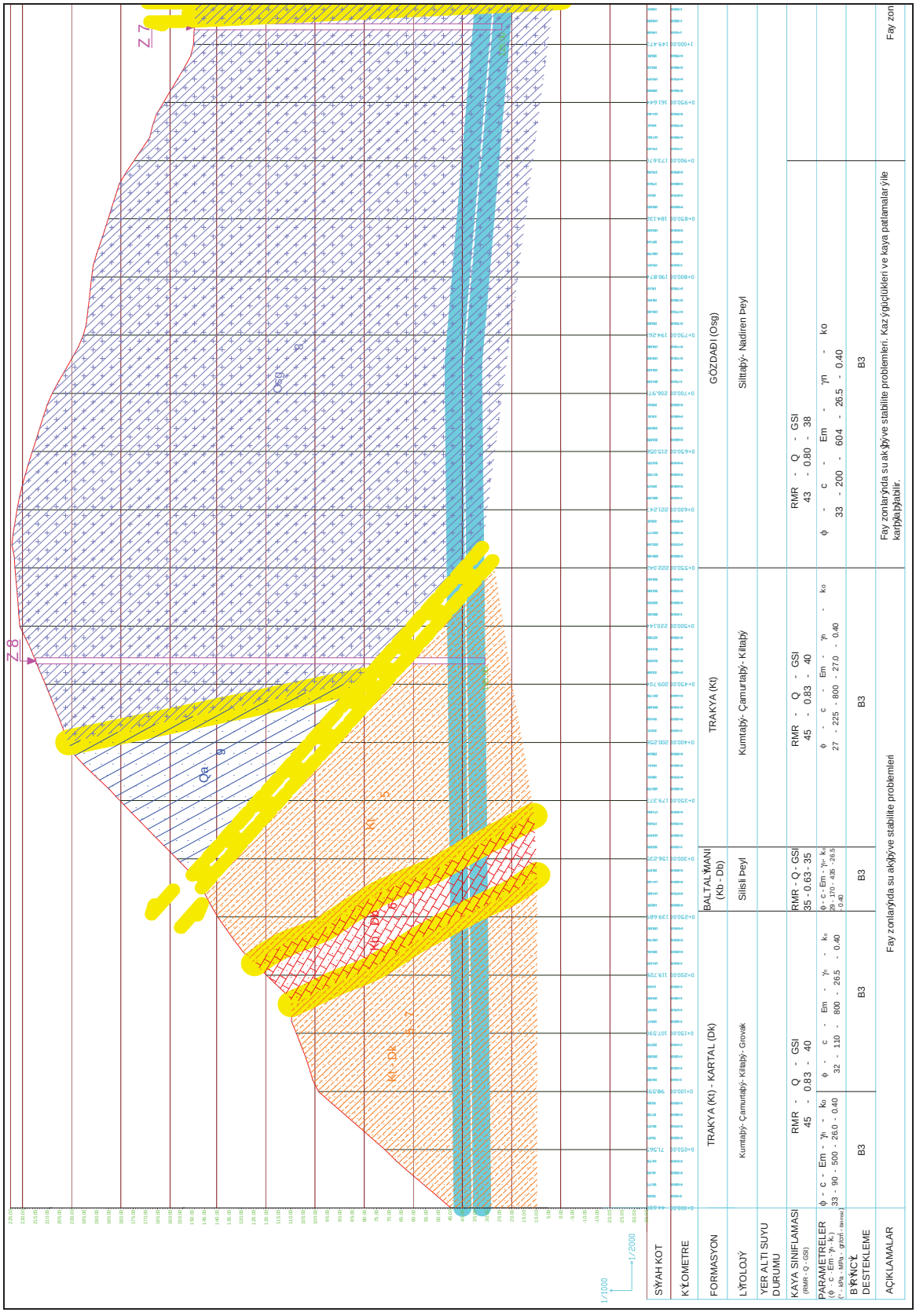
Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde yapılan çalışmalar ile ilgili olarak jeolojik-geoteknik harita, mühendislik jeolojisi bilgileri ile geoteknik parametrelerin yer aldığı açıklayıcı zemin kesitleri, tünel ve tünel iç kaplama çalışmalarını gösterir fotoğraflar, standart tip tünel kesiti uygulaması ve zayıf zeminler için uygulanan tünel tip kesiti ve bulon yerlerini gösterir örnek şekiller ve analiz örnekleri aşağıda 12.2.A- L arası şekillerde yer almaktadır.



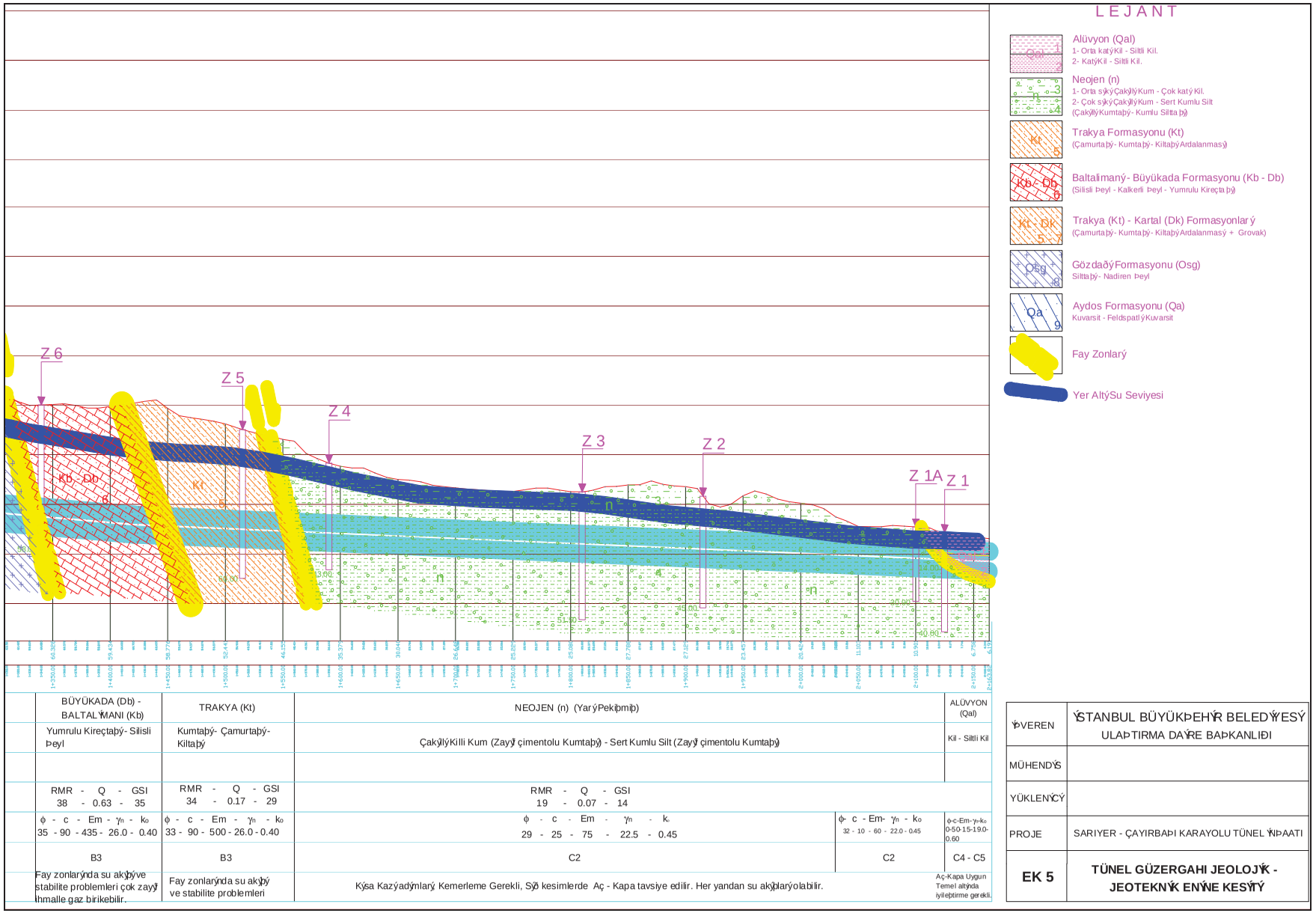
Örnek Şekil 12.2.A) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı mühendislik jeolojisi haritası (*the aspect of the Sarıyer-Çayırbaşı highway tunnel route,* Yıldırım, 2010).



Örnek Şekil 12.2.B) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı jeolojik-geoteknik zemin kesiti (Yıldırım, 2010).



Örnek Şekil 12.2.C) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı "Sarıyer girişi" jeolojik-geoteknik zemin kesiti.



	BÜYÜKADA (Db) - BALTALÝMANI (Kb)	TRAKYA (Kt)	NEOJEN (n) (YarýPekiþmiþ)		ALÜVYON (Qal)
	Yumrulu Kireçtaþý- Silisli Þeyl	Kumtaþý- Çamurtaþý- Kiltaþý	ÇakýllýKilli Kum (Zayýf çimentolu Kumtaþý) - Sert Kumlu Silt (Zayýf çimentolu Kumtaþý)		Kil - Siltli Kil
	RMR - Q - GSI 38 - 0.63 - 35	RMR - Q - GSI 34 - 0.17 - 29	RMR - Q - GSI 19 - 0.07 - 14		
	ϕ - c - Em - γn - ko 35 - 90 - 435 - 26.0 - 0.40	ϕ - c - Em - γn - ko 33 - 90 - 500 - 26.0 - 0.40	ϕ - c - Em - γn - kc 29 - 25 - 75 - 22.5 - 0.45	ϕ- c - Em- γn - ko 32 - 10 - 60 - 22.0 - 0.45	ϕ-c-Em-γn-ko 0-50-15-19.0-0.60
	B3	B3	C2	C2	C4 - C5
	Fay zonlarýnda su akýþý ve stabilite problemleri çok zayýf ihmalle gaz birikebilir.	Fay zonlarýnda su akýþý ve stabilite problemleri	Kýsa Kazýlýmlarý Kemerleme Gerekli, Sýð kesimlerde Aç - Kapa tavsiye edilir. Her yandan su akýþlarýolabilir.		Aç-Kapa Uygun Temel altýnda iyileþtirme gerekli.

ÞVEREN	ÝSTANBUL BÜYÜKÞEHÝR BELEDÝYESÝ ULAÞTIRMA DAÝRE BAÞKANLIÐI
MÜHENDÝS	
YÜKLENÝCÝ	
PROJE	SARIYER - ÇAYIRBAÞI KARAYOLU TÜNELÝ ÝNÞAATI
EK 5	TÜNEL GÜZERGAHI JEOLOJÝK - JEOTEKNÝK ENÝNE KESÝTÝ

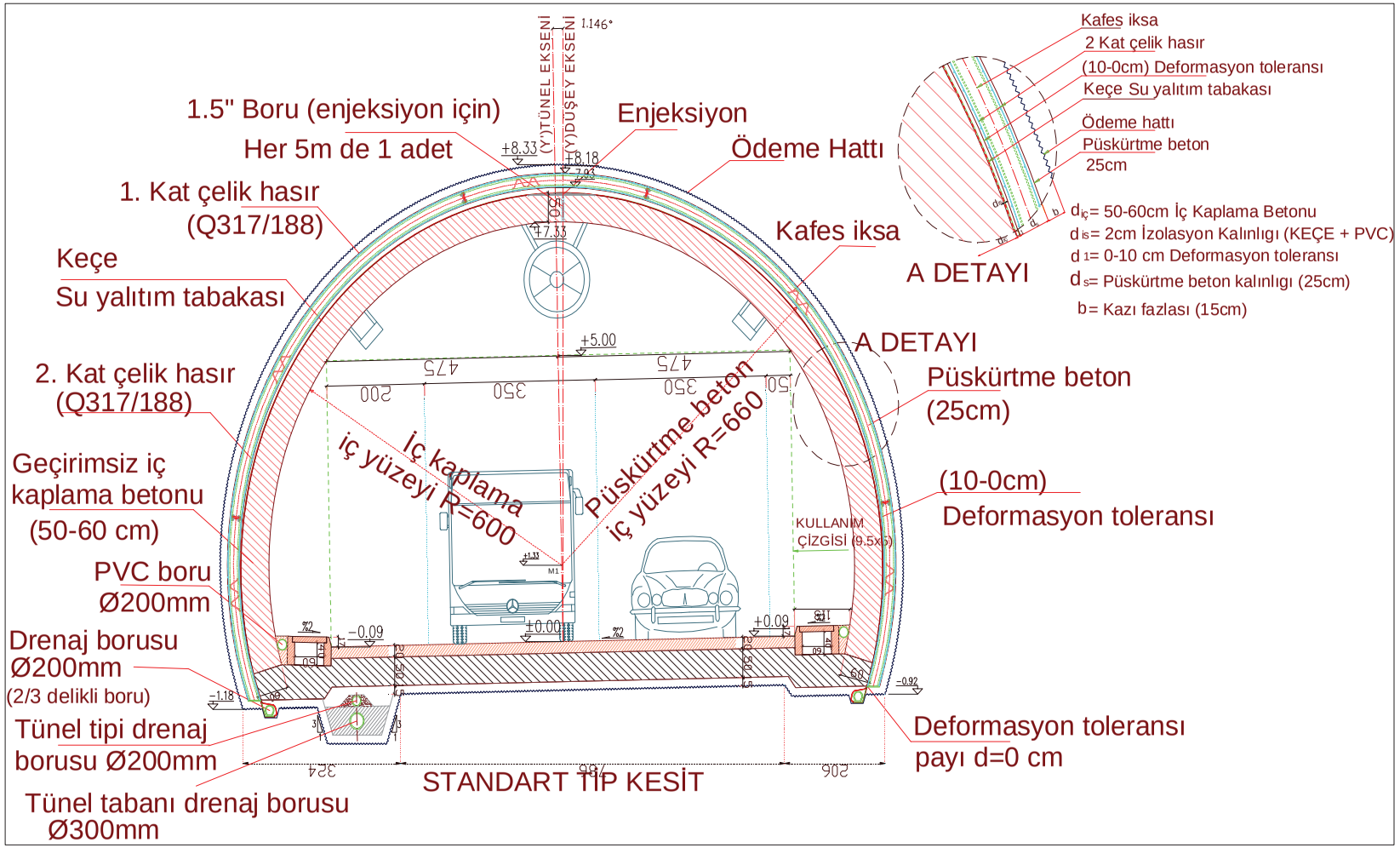
Örnek Şekil 12.2.D) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli güzergâhı “Çayırbaşı girişi” jeolojik-geoteknik zemin kesiti.



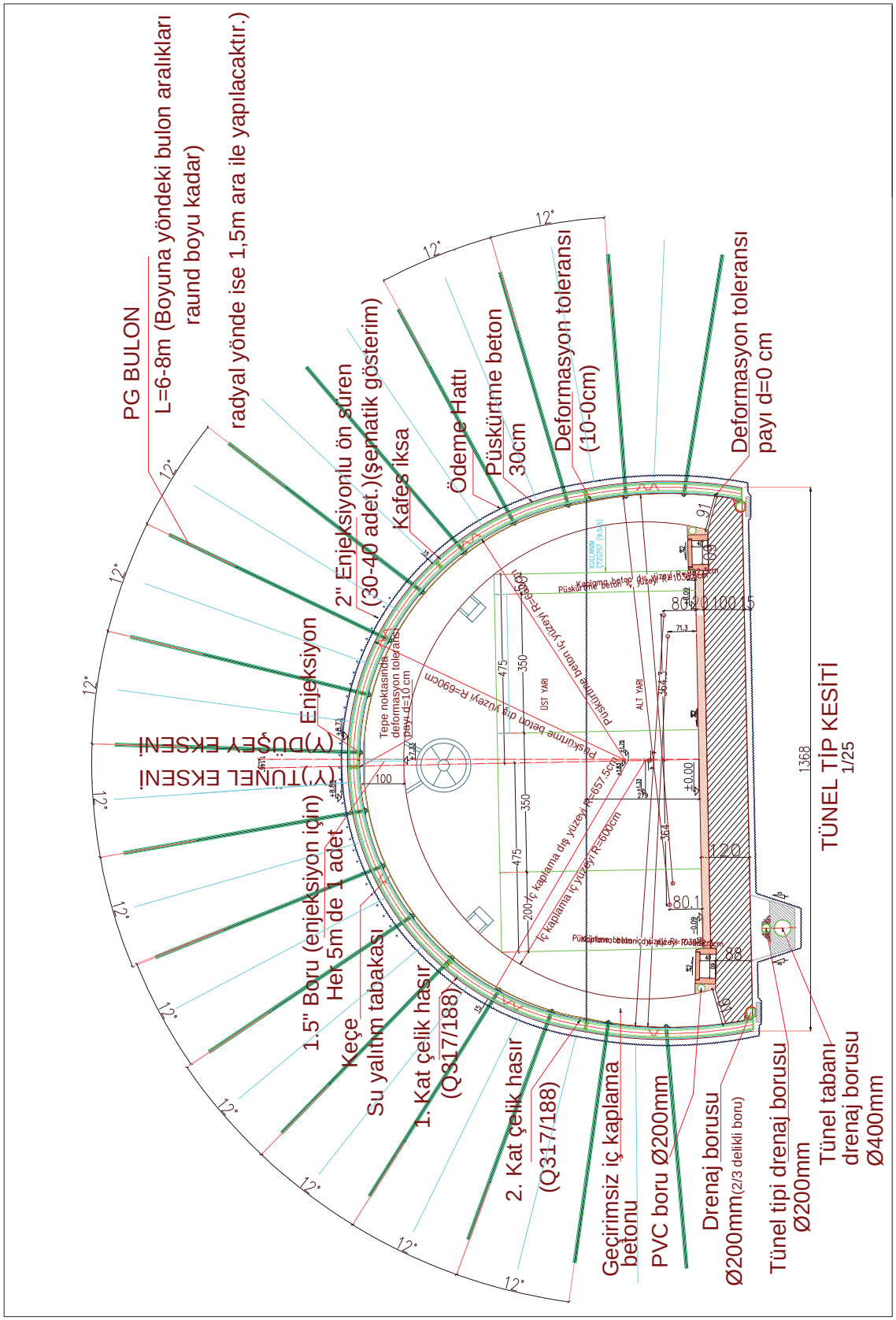
Örnek Şekil 12.2.E) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinin (çift tünel) Sarıyer girişi. Tünelin her iki tüpünde de kazı işlemleri tamamlanmış durumda. Solda yer alan tüp tünel girişinde, iç kaplama çalışmaları hazırlıkları görülmekte. Fotoğrafın sağ tarafında yer alan tünel kazısından çıkarılmış yığıntı; artık malzeme (pasa), mavi grovak ve silttaşlarından oluşmakta (21.04.2009).



Örnek Şekil 12.2.F) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli içinde, iç kaplama çalışmaları (04.03. 2010).



Örnek Şekil 12.2.G) Sarıyer-Çayırbaşı arası Karayolu Tüneli İnşaatı Uygulama Projesi, Standart Tünel Tip kesiti.

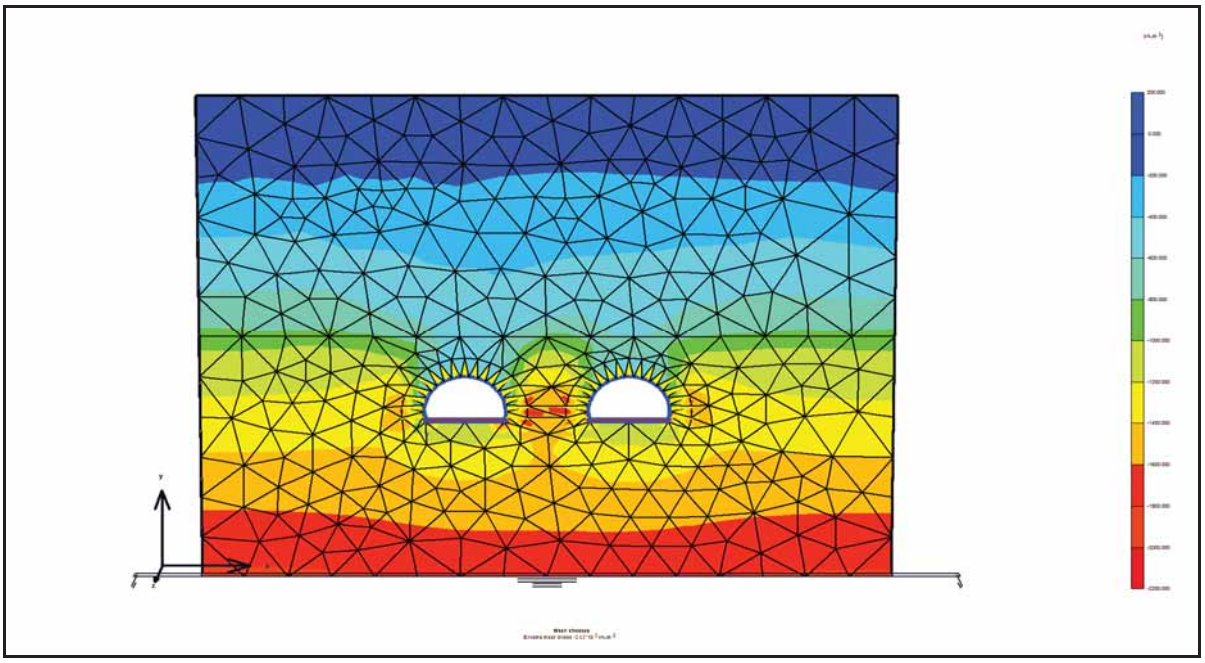


Örnek Şekil 12.2.H) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde zayıf zeminler için uygulanan tünel tip kesiti ve bulon yerleri.

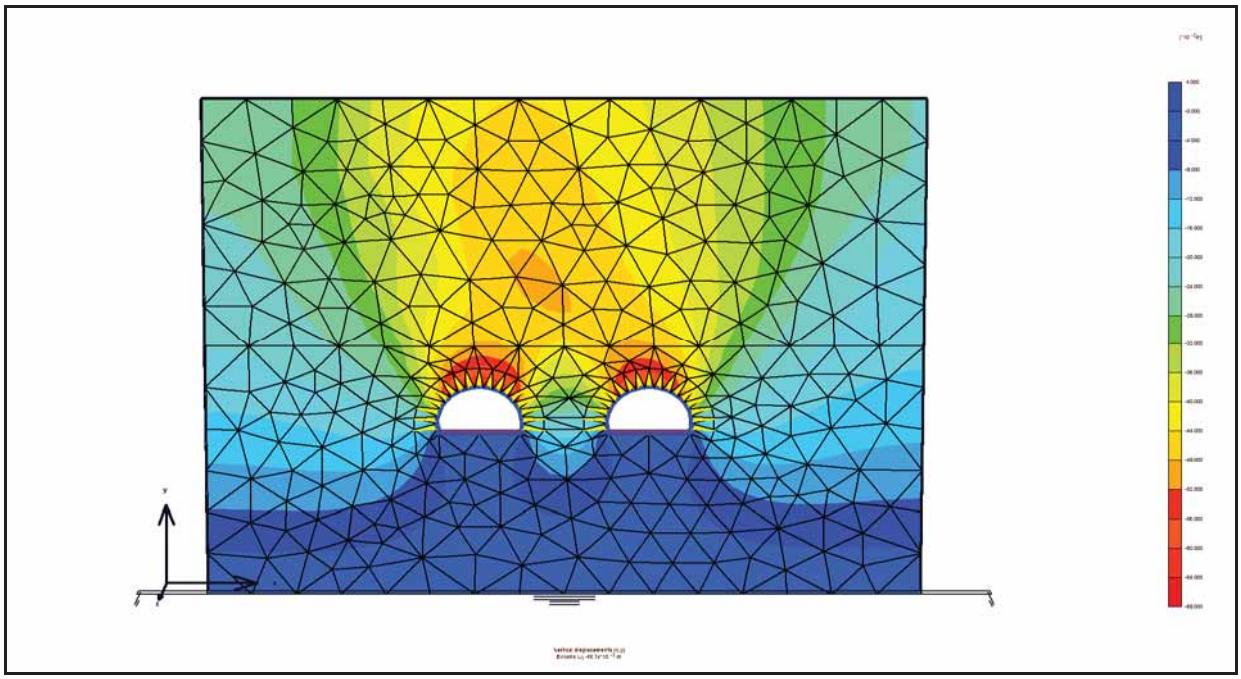


Örnek Şekil 12.2.İ) İç kaplaması tamamlanmış, Sarıyer Karayolu Tüneli girişi (04.03.2010).

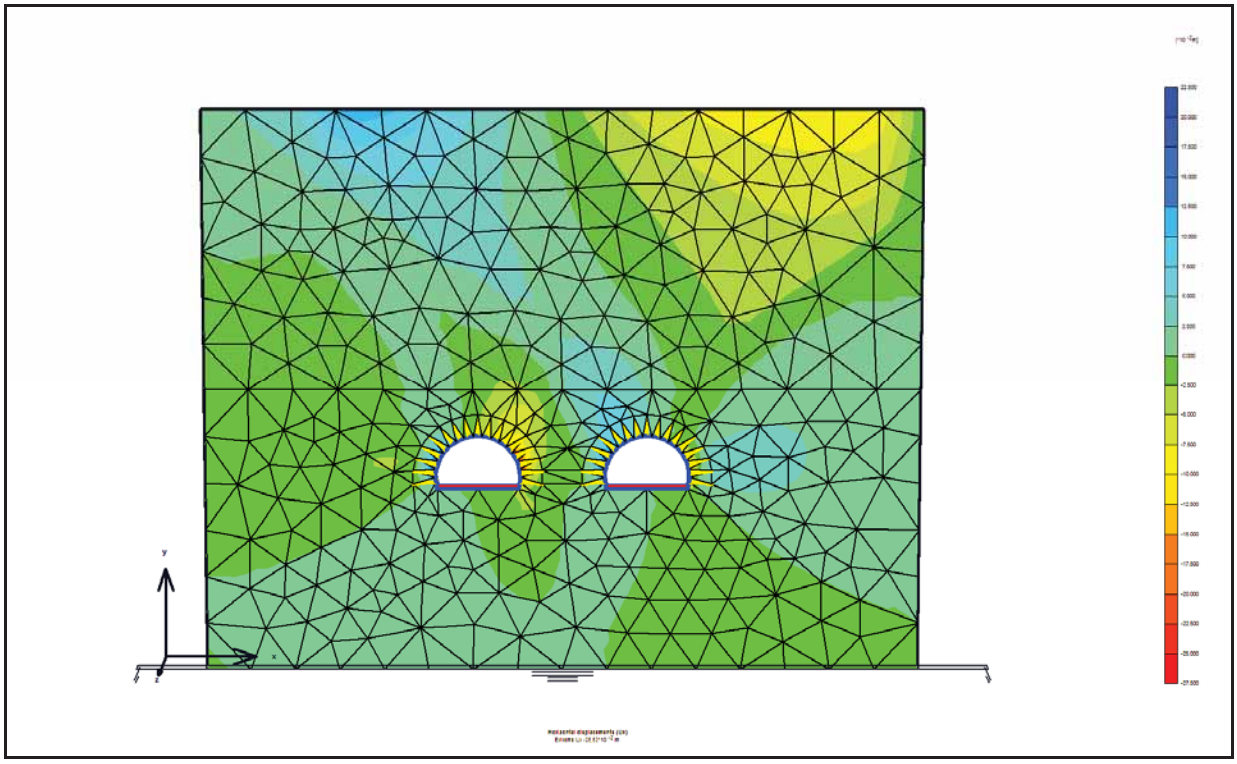
Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli'nde 2 boyutlu gerçekleştirilmiş ve yatay ve düşey yer değiştirmelerin (deplasman) müsaade edilebilir sınırlar içinde kaldığı analizler sonucunda belirlenmiştir. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı ile elde edilen analiz sonuçları aşağıda Örnek Şekil 12.2.J, K ve L'de verilmektedir (Yıldırım, 2010).



Örnek Şekil 12.2.J) Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tüneli etrafındaki maksimum gerilmeler (değerler, kırmızıdan maviye doğru küçülmektedir; Yıldırım, 2010).



Örnek Şekil 12.2.K) Analiz edilen Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde düşey yer değiştirmelerin dağılımı
(Yıldırım, 2010).



Örnek Şekil 12.2.L) Analiz edilen Sarıyer-Çayırbaşı Karayolu Tünelinde yanal yer değiştirmelerin dağılımı
(Yıldırım, 2010).

12. Bölümün Özeti

Yapay yeraltı yapısı olarak adlandırılan tüneller, içerisinden geçtikleri yer altı ortamının belirlenebilmesi ve güvenli, stabil bir yapının oluşturulabilmesi için jeolojik ve mühendislik jeolojisi kriterlerinin yoğun olarak dikkate alınması gerektiği yapılardandır.

Tünel açılırken yörenin jeolojik yapısına, kaya ve zeminin özelliklerine, jeolojik dayanımına, geçilen güzergâhın uzunluğuna, derinliğine, gerilmelere, zemin ve kaya kütle sınıflamasına, mühendislik özelliklerine ve yerleşim yeri yoğunluğuna uzaklığı gibi etkenler göz önüne alınarak belirlenmelidir. Tünelde emniyet, maliyet ve süreyi etkileyen kaya-zemin ortamlarına ait tüm özellikler birlikte değerlendirilmeli, kapladıkları alanlar, tektonik, jeolojik ve litolojik yapı, dokanak zonları, dokusal, bünyesel özellikler eksiksiz olarak belirlenmelidir. Jeolojik harita ve kesitler, jeofizik ölçümler ile desteklenmelidir.

Tünellerde mühendislik jeolojisi harita yapımı aşaması sırasında standartlara uygun zemin etüt sondajları yapılmalı, bu sondajlar doğru bir şekilde değerlendirilmeli, sondajlardan elde edilen numunelerin laboratuar deney sonuçları yanında, sondaj logları zemin kesitlerinde yerlerine işaretlenerek güzergâhta karşılaşılabilecek muhtemel sorunlara yönelik tahminler, konusunda uzman kişilerce yapılmalıdır.

Bir tünel güzergâhının iyi tariflenebilmesi, emniyet ve maliyet gibi sorunların en aza indirilebilmesi, ancak tünel güzergâhını oluşturan “jeolojik model”in doğru ortaya konabilmesi ile mümkündür. Tünelde toplam sondaj derinlikleri uzunlukları, yaklaşık olarak tünel uzunluğu kadar olmalıdır. Tünel açılmadan önce yapılacak sondajlar; tünel aksı boyunca, aksın her iki tarafına çapın iki katı kadar bir mesafe içinde, zemin yüzeyinden yapılmalıdır. Sondajların aralıkları ve sıklıkları jeolojik haritada görülen farklı kayaçlar ve tektonik yapı göz önüne alınarak belirlenmelidir. Sondaj aralıkları kayaç cinslerinin değiştiği ve ayrışma ile zayıflık ve kırık zonlarının bulunduğu ya da diğer problem yaratabilecek kesimlerde daha sık, fazla değişiklik göstermeyen ortamlarda ise daha seyrek yapılmalıdır. Sondaj derinlikleri, tünelin geçtiği güzergâhta, tünel tabanının altına mimimum tünel çapının yarısı kadar, problemli kayaçlardan geçiliyor ise tünel çapının iki katı kadar altına uzatılmalıdır.

Tünel veya galerilerin kesitleri, yer altına ait jeolojik yapı başta olmak üzere maliyet, kullanım amacına ve diğer tüm mühendislik özellikler dikkate alınarak açılmakta ve elips, at nalı, daire, daire+at nalı, çok katlı veya ikiz tünel tipleri olarak isimlendirilmektedir. Bunlardan dairesel tip, ulaşımda en emniyetli ve ekonomik olanıdır. Karayolu tünelleri yanında demiryolu, metro, kanalizasyon, hidrolik güç ve su tünelleri, “tünel türlerini oluştururlar. Tünel açılırken delme-patlatma, hidrolik kırıcılar, kollu delme makinaları, Yeni Avusturya tünel açma metodu, aç-kapa, TBM makinaları ile tam cepheli tünel açma, kalkan ve batırma tünel yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

Tüneller yeraltı yapıları olmaları dolayısıyla, yer altındaki tabakalanma, faylanma, aktif faylar ve ayrışma zonları gibi jeolojik, yapısal oluşumlardan çok fazla etkilenirler. Tünellerin üzerinde biriken yüklerin dağılımı, söz konusu tabakaların geometrisi ile de yakından ilişkilidir. Özellikle bu tabakaların konumları ve faylar, rezidüel gerilmeler ile birlikte gerilmelerin beklenenden daha fazla olmasına neden olurlar. Ayrıca tünelde yeraltı su düzeyinin altında yapılacak mühendislik faaliyetleri öncesinde, yeraltı suyu drene edilmeli ve izolasyon *(waterproofing)* yapılmalıdır.

Bunların dışında kaya patlamaları, ısı ve gaz sorunu ve göçmeler de gerek inşaat sırasında ve gerekse sonrasında tünelin efektif olarak kullanımında dikkat edilmesi gereken en önemli problemlerden birkaçını oluştururlar.

13. BÖLÜM: HALİÇ ISLAH PROJESİ KAPSAMINDA YAPILAN JEOLOJİK ve GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

13.1. Giriş

İstanbul'da 7 km uzunluğunda ve 730 m genişliğe kadar ulaşabilen ve "Altın Boynuz" *(Golden Horn)* olarak bilinen Haliç'e memba tarafını oluşturan kuzeyinden, Alibey ve Kâğıthane dereleri birleşmektedir. Bu derelerin taşıdıkları ve Haliç güncel çökelleri olarak tanımlanan ve günümüzden 8.500 yıl öncesinden itibaren çökelmeye başlamış çamur tortular, Haliç'in temelinde yer alan grovak kayaları üzerinde günümüze kadar yaklaşık 50 m - 60 m'lik bir kalınlığa ulaşmışlardır. Derelerin taşıdığı malzeme yanında, temizleme çalışmaları öncesine kadar uzanan son 80 yıl boyunca Haliç çevresinde ağaçların kesilerek kurulan irili ufaklı 2.000'in üzerinde iş yeri, plânsız yapılaşma ve gecekondulaşmadan dolayı doğal yapı bozulmuş, arıtılmadan Haliç'e deşarj (boşaltma) edilen evsel ve kimyasal atıkların yol açtığı çok hızlı tortullaşma sonucu, Unkapanı Köprüsü civarında 38 m olan su derinliğini Haliç'in kuzeyini oluşturan 3,5 km'lik bir güzergâh boyunca sıfıra yaklaştırmış ve yeni adacıklar oluşmuştur. Bu durum su sirkülasyonunun engellenmesine ve Haliç'e taşınan her tür atığın bu alanlarda birikmesine ve aşırı bir çevre kirlenmesine neden olmuştur. Haliç'teki kirlenmenin boyutlarının her geçen gün artarak çevre ve insan sağlığına zarar vermesi üzerine, 1975 yılından itibaren Haliç'in sorunlarının ve çözüm yollarının araştırılması amacı ile bilimsel toplantılar yapılmıştır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 1984-1989 yıllarında yapılan çalışmalarla Haliç'i çevreleyen endüstriyel tesisler önemli ölçüde boşaltılmış, evsel atıkların Haliç'in her iki yakasına paralel uzanan ana kanalizasyon kollektörlerine bağlanarak Haliç'in daha fazla kirlenmesinin önlenmesi amaçlanmıştır.

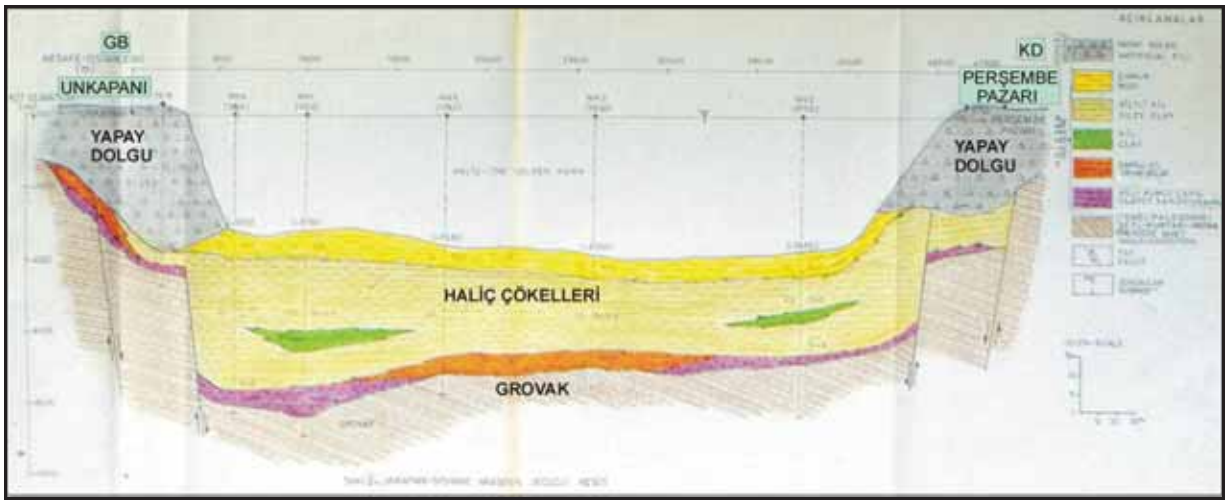
Bu bölümde, Haliç Islah Projesi kapsamında Haliç ve çevresinin jeolojik-geoteknik koşullarının belirlenmesi, taranan çamurun depolanacağı alanın mühendislik jeolojisi araştırmaları, çamur depolama sahasında inşa edilen atık tutma barajlarının tasarımı ve depolama alanının uzun süreli davranışının analizi ile ilgili lokomotif görevini taşıyan temel çalışmalar YTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerince gerçekleştirilmiş olup bu çalışmalarla ilgili özet bilgiler aşağıda sunulmaktadır. Haliç ve Haliç kili ile ilgili bilimsel çalışmalar ise günümüzde de devam etmektedir (Yıldırım ve Özaydın, 2000; İnce, vd., 2008; Kılıç vd., 2010; Terzi vd., 2011).

13.2. Haliç Islah Projesinde Yapılan Jeolojik-Geoteknik Çalışmalar

İstanbul Haliç ve çevresinin tabiî dokusuna tekrar kavuşması için 1995 yılında Haliç çamurunun temizlenmesine ve uzaklaştırılmasına yönelik bir ıslah projesi başlatılmıştır (Şekil 13.1, 13.2). Haliç Köprüsünün memba tarafında kalan kesiminde taban çamurunun su derinliği 5 m olacak şekilde taranarak uzaklaştırılması ve deniz ortamının oksijen düzeyinin yükseltilerek taban çamurunun yerinde stabilizasyonu plânlanmıştır. Tarama işleminin kıyılarda zemin hareketlerine yol açmaması ve taranacak çamurun en ekonomik şekilde uzaklaştırılabilmesi için ayrıntılı arazi ve laboratuar araştırmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 13.3A-B). Haliç'ten taşınan çamurun çevreye zarar vermeden uzaklaştırılabilmesi için terk edilmiş bir taş ocağı çukurunda depolanması kararlaştırılmış, taş ocağının iki adet olan giriş-çıkış yerlerine, iki büyük kil çekirdekli kaya dolgu baraj inşa edilmiştir.



Şekil 13.1. İstanbul Boğazı ve Haliç çevresinin Jeoloji Haritası (Eroskay, 1986).



Şekil 13.2. Unkapanı-Perşembe Pazarı arası Haliç zemin kesiti (Yıldırım vd., 1992).



Şekil 13.3.A) Taraması yeni yapılmış koyu siyah renkli Haliç dip çamuru (08.08.1995).



Şekil 13.3.B) Kuruduktan sonra gri renge dönüşmüş Haliç dip çamuru (1995).

1995 - 1998 yılları arasında İstanbul, Haliç Islah Projesi kapsamında gerçekleştirilen geoteknik çalışmalarda, Haliç'in kara ve deniz kesimlerinde Temmuz-Ağustos 1995 tarihlerinde 10 m – 25 m derinlikler arasında 19 adet sondaj yaptırılmış (Şekil 13.4, 13.5), sondajlardan yararlanılarak zemin kesitleri hazırlanmış, Haliç deniz tabanından 25 m derinliğe kadar yer alan zeminlerin indeks özellikleri ile taban çamurunun kayma mukavemetini, konsolidasyon özelliklerini belirleyen laboratuar deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 13.6, 13.7). Böylece taranacak çamurun uzaklaştırılarak depolanması ve depolama alanındaki davranışını belirlemek için gerekli bilgiler elde edilmiştir (Özaydın vd., 1995, Akgüner vd., 1996, Özaydın ve Yıldırım, 1997). Haliç'in memba tarafından başlamak üzere 3,5 km'si tamamen dolmuş olan kuzey kesimlerinin su derinliği 5 m olacak şekilde dip taraması yapılması ve uzaklaştırılması uygun görülmüştür. Bu derinliğin; Haliç'e birleşen Alibey ve Kâğıthane Dereleri düzeyinin Haliç'e akabilmesi, su sirkülasyonunun sağlanması, çözünmüş oksijen eksikliğinin giderilmesi ve küçük deniz araçlarının ulaşım imkânları için yeterli olduğu düşünülmüştür. Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Geoteknik Anabilim Dalı tarafından yapılan stabilite değerlendirmelerinde, Haliç kilinde su altında oluşturulacak şevlerin 10° eğimle, 6 (yatay) : 1 (düşey) taranması durumunda kenar yapıların güvenliği

için yeterli olacağı ve istenilen tarama derinliğinin sağlanabileceği tespit edilmiştir (Özaydın vd., 1995).



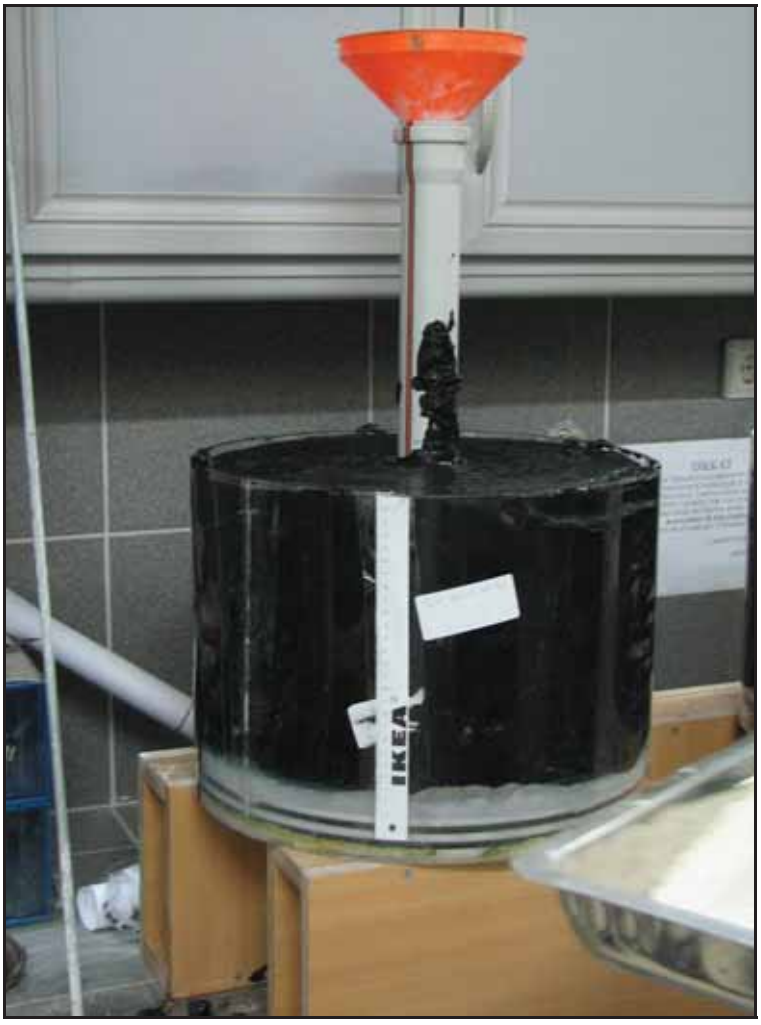
Şekil 13.4. İstanbul, eski Taşkızak Tersanesi kuzeyi Haliç batimetrik haritası ve sondaj yerleri (Özaydın vd., 1995).



Şekil 13.5. Haliç Köprüsü ile 1995 yılında mansap tarafında yer alan ve daha sonra yeri değiştirilen Valide Sultan Köprüsü (eski Galata Köprüsü) arasında Haliç'te yapılan sondaj çalışması (08.08.1995).

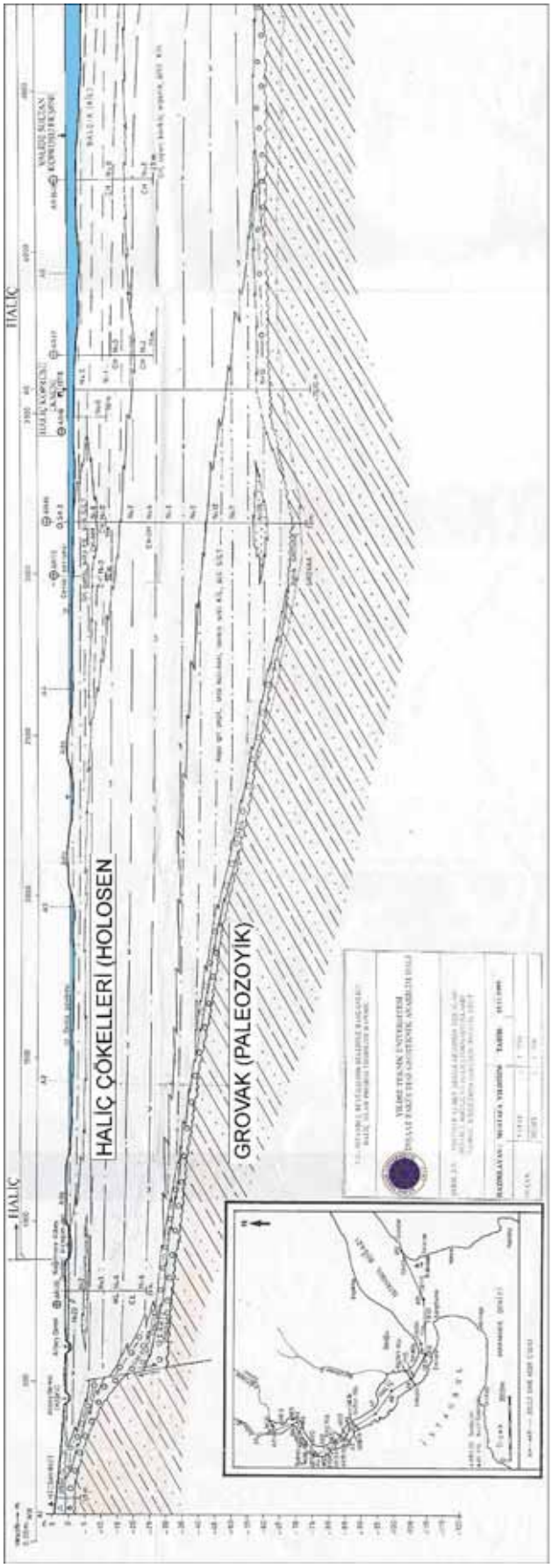


Şekil 13.6. YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bl., Geoteknik Anabilim Dalı laboratuarında, Haliç çamurunda yapılan sulu çamur sedimentasyon ve konsolidasyon deneyi (Akgüner vd., 1996).



Şekil 13.7. Haliç çamurunda kireç kolonu yöntemi ile yapılan iyileştirme deneyi (Akgüner vd., 1996).

Çoğu likit kıvamdaki killerden oluşan genç (Holosen) Haliç çökelleri, Haliç Köprüsü civarında zemin yüzeyinden itibaren 50 m – 60 m kalınlıklara ulaşmakta ve daha derinde Trakya formasyonu olarak adlandırılan Paleozoyik yaşlı grovaklar üzerinde yer almaktadır (Eroskay, Kale, 1986; Yıldırım vd., 1992). Jeolojik kesiti ve diğer özellikleri Şekil 13.8'de görülen Haliç çökellerinin aşırı kirli üst kesimlerini oluşturan yaklaşık 5 milyon m^3 taban çamurunun taranması sırasında denizi ve çevreyi kirletmemesi için bu amaçlara uygun çamuru emerek tarayan dört adet dip tarama gemisi inşa edilmiştir. Bu gemiler ile emilen çamur (Şekil 13.9), 40 cm'lik bir iç çapa sahip borularla 5 km kadar uzaklıkta Alibeyköy kuzeybatısında Eyüp (Yeşilpınar Mahalllesi) Taş Ocaklarına pompalanması kararlaştırılmıştır (Şekil 13.10).



Şekil 13.8. Haliç Adaları ile Alibey Deresi arası, boyuna zemin kesiti ve kesit güzergâhı
(Özaydın vd., 1995).

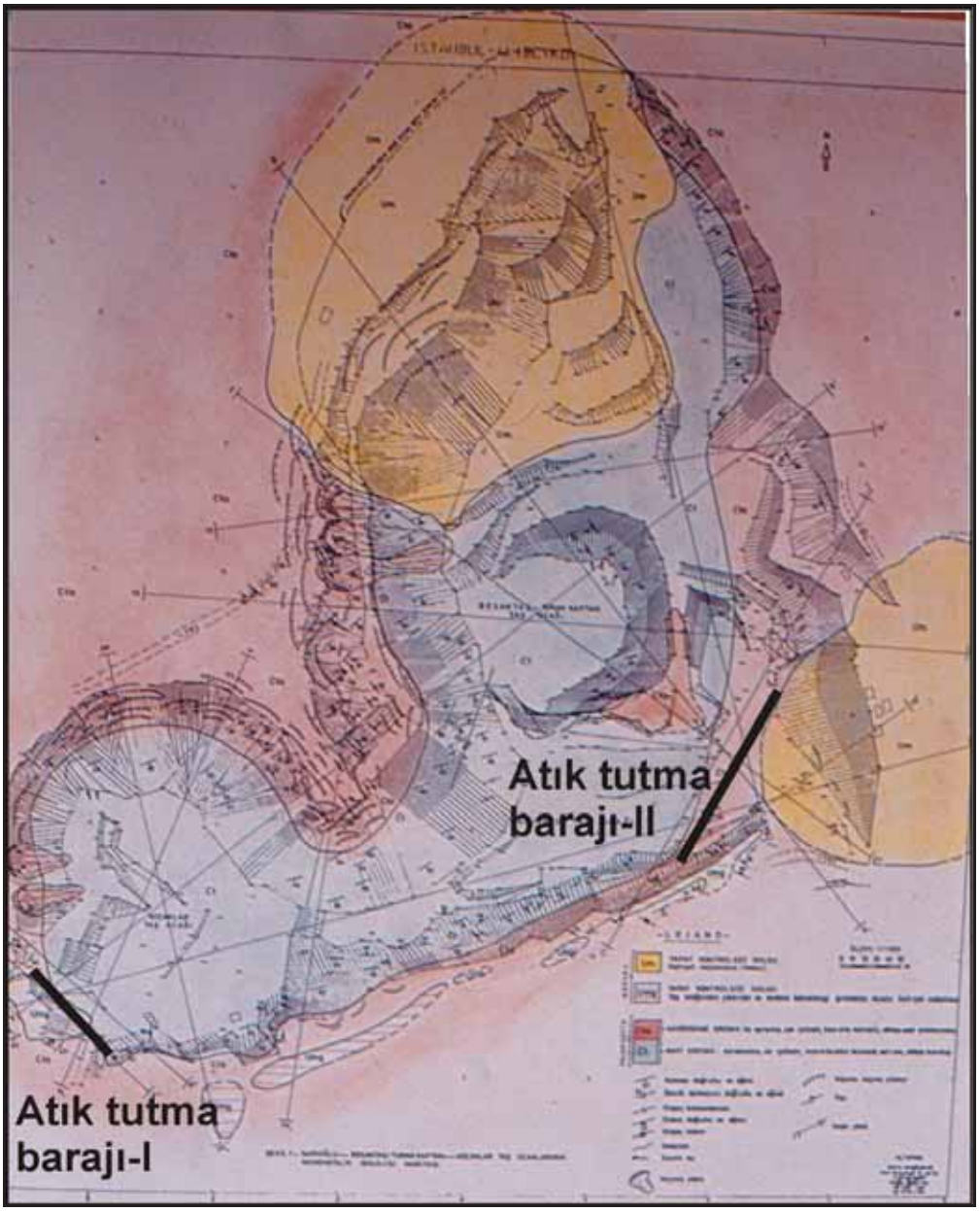


Şekil 13.9. Haliç çamurunda dip taraması yapan iş makinası (Haziran 1997).



Şekil 13.10. Haliç çamuru depolama alanı. Haliç çamurunun depolanacağı Eyüp, Alibeyköy Deresi kuzeybatısı Yeşilpınar Mahallesi Taş Ocakları. Karşı şevde tepe üst düzlüğünü oluşturan zemin yüzeyinden itibaren 15 m – 20 m kalınlığa ulaşan ve ayrışma nedeniyle kahverengi tonlarda görülen grovak (kumtaşı) ve silttaşı kayalarının alt seviyelere doğru ayrışmamış (mavi-gri renkli) kesimlerine geçtiği görülmekte (21.12.1996).

200.000 m^2 ye yaklaşan çamur depolama alanı ve çevresini oluşturan 1 km^2 lik alanın jeoloji ve mühendislik jeolojisi incelemeleri sonucunda eski taş ocağı çukurunun iki ağzını kapatarak depolama alanı oluşturulmasını sağlayacak baraj aks yerleri ana kayaya oturacak şekilde seçilmiş ve barajların tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 13.11, 13.12). Barajların uzunlukları 224 m ve 360 m, yükseklikleri 40,5 m olup arkalarında depolanan ve kendi ağırlığı altında konsolide olan çamur kalınlığı 40 m'dir (Şekil 13.13 ve 13.14). 5 milyon m^3 lük çamuru Temmuz 1998'de depolayan bu barajlar, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nden etkilenmemişlerdir.

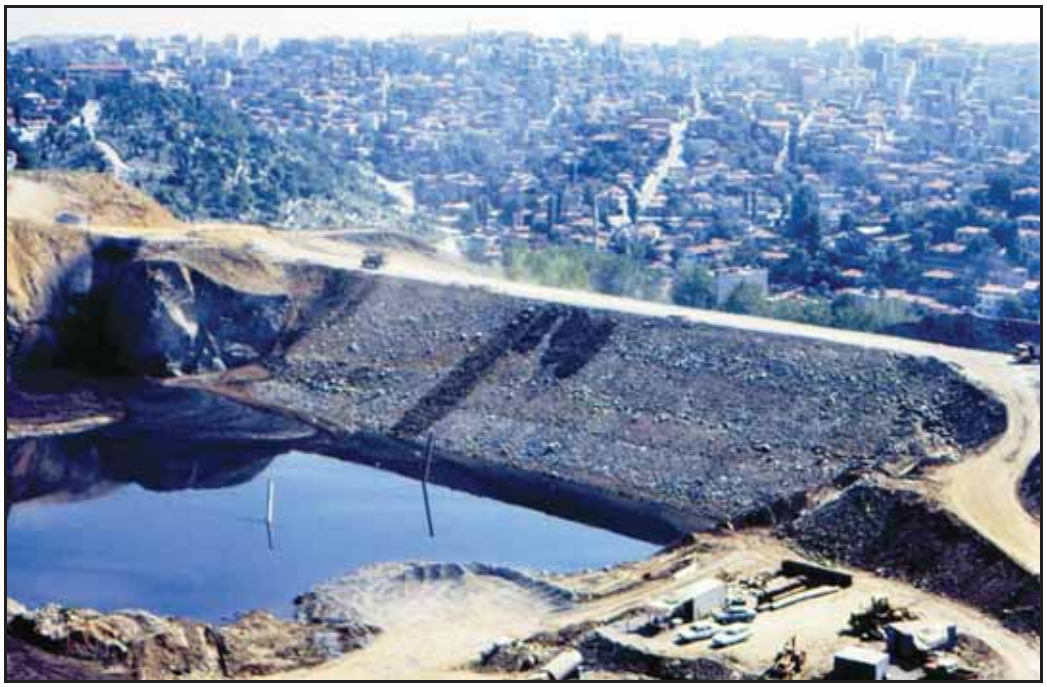


Şekil 13.11. Haliç çamurunun depolandığı “taş ocakları” ve yakın çevresinin jeoloji haritası. Sarı renk ile boyanmış alanlar; eski taş ocakları hafriyatlarından arta kalan ve 50 m’yi aşan derinliklere ulaşan büyük çukurluklar olup bu çukurluklar uzun seneler hafriyat döküm alanları olarak kullanılması sonucu dolmuşlardır. Kontrolsuz yapay dolguyu oluşturan ve kalınlığı yer yer 50 m’yi aşan bu atıklar, hafriyat, evsel atık ve çöplerden oluşmaktadır. Kahverengiye boyanmış alanlar; ana kayayı oluşturan az ayrık kahverengi grovakları, Haliç çamuru ile doldurulan ***mavi renkli kesimler ise ayrışmamış grovakların yüzeylendiği yerleri göstermektedir (Jeolojik harita, hazırlayan: Yıldırım, M.; Aralık 1996/Şubat 1997).

***[**Haliç çamuru ile doldurularak elde edilmiş yaklaşık 600 dönümü kaplayan yatay düzlük alanın (mavi renkle boyanmış kesimler), muhtemelen 23 Nisan 2013 tarihinde hizmete girecek olan Türkiye’nin ilk *Disneyland* alanı *(Vialand)* olarak değerlendirilmesiyle, İstanbul dünya ölçeğinde bir eğlence merkezine kavuşmuş olacaktır**]**.



Şekil 13.12. **Atık Tutma Barajı-II.** Haliç çamurunun depolanabilmesi için taş ocağının girişinin kapatılması amacıyla depolama alanı güneydoğusunda inşa edilen 40 m yüksekliğinde, 360 m uzunluğundaki barajın gövdesinde kil çekirdek ve kaya dolgu çalışmaları. Baraj bir taraftan inşa edilirken, diğer taraftan da Haliç çamuru memba kesimine borular vasıtasıyla nakledilip boşaltılmakta (güneybatıya bakış). Baraj taban kotu: +20 m, kret kotu: +60,50 m (03.08.1997).



Şekil 13.13. **Atık Tutma Barajı-I:** Haliç çamuru depolama alanı güneybatısında yer alan bu barajın yüksekliği 32 m, uzunluğu 224 m, kret kotu: 60,5 m'dir. Haliç çamuru doldurulmaya başlanmış durumda (29.08.1997).



Şekil 13.14. **Atık Tutma Barajı-I:** Haliç çamuruyla tamamen doldurulmuş barajda, çamurun üst yüzeyinin kurumaya başlaması (Temmuz 1998).

Haliç'ten taranan dip çamurlarının diğer bir kısmı Haliç'in memba kesiminde tamamen dolmuş alanlarda karada depolanarak bu alanlar rekreasyon alanları olarak düzenlenmiş, Haliç'e birleşen Alibeyköy ve Kâğıthane Dereleri ıslah edilmiş, Haliç'e ulaşan atık sular Haliç'in her iki yakasına paralel uzanan ana kanalizasyon kollektörlerine bağlanmış, kolektörlerle taşınan atık sular da "Yenikapı ve Balta Limanı Arıtma Tesisleri"nden denize deşarj edilerek, Haliç'in dolayısıyla Marmara Denizi'nin de kirlenmesi önlenmiştir. Temizlenmesi imkânsız olarak düşünülen Haliç ve çevresi, Haliç Islah Projesinin gerçekleştirilmesi ile temizlenerek bugünkü doğal yapısına ve tarihî güzelliğine kavuşmuştur (Şekil 13.15, 13.16).



Şekil 13.15. Dip çamuru taraması yapılmadan **“Önceki Haliç”**. Haliç’ten Alibey ve Kâğıthane Dereleri tarafına kuzeye bakış. (Mayıs 1997).



Şekil 13.16. Dip çamuru taraması ve çevre düzenlemesi yapıldıktan **Sonraki Haliç”**. Haliç’ten Alibey ve Kâğıthane Dereleri tarafına kuzeye bakış. (12.06.1998).

KAYNAKLAR

AÇLAR, A.; ÇAĞDAŞ, V., “SPK ve Kamulaştırma Değerleyicileri Mühendis, Mimar ve Uzmanlar İçin, Taşınmaz (Gayrimenkul) Değerlemesi”, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş İkinci Baskı, 486 s., Ankara, 2008.

AKARTUNA, M., “Genel Jeoloji”, Elif Ofset Basımevi, İstanbul, 443 s., İstanbul, 1982.

AKGÜNER, C.; YILDIRIM, M.; KILIÇ, H.; İPEKOĞLU, P., “Haliç Güncel Çökellerinin Geoteknik Parametreleri”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Birinci Cilt, Sayfa: 1-12, İzmir, 1996.

AKGÜNER, C.; YILDIRIM, M.; BERİLGEN, M.; TONAROĞLU, M.; SELÇUK, M. E., “Killerin ve Kumların Elâstik Özelliklerinin Laboratuarda Piezoelektrik Bender Elemanlar Kullanılarak Belirlenmesi ve Elde Edilen Verilerin Arazi Ölçümleri ile Karşılaştırılması”, YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bl. Geoteknik Anabilim Dalı, KAP Projesi Raporu, Rapor No: 2011-05-01-KAP01, Başlama tarihi: 2011-09-05, Bitiş tarihi: 2013-03-05, Davutpaşa Kampüsü, İstanbul, 2012.

AKMAN, M. S., “Yapı Malzemeleri”, İ.T.Ü., İnşaat Fakültesi Matbaası, 162 s., İstanbul, 1990.

AKÖZ, F.; YÜZER, N.; ÇAKIR, Ö.; KABAY, N.; KIZILKANAT A.B., “Tarihi Yapılarda Özgün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi, Hünkâr Kasrı (Otağ-ı Hümayun) Örneği” İnşaat Mühendisliğinde 100. Yıl Teknik Kongresi, YTÜ-TK116.pdf., 10 sayfa, Bildiriler Kitabı, s. 56-57, YTÜ Basım-Yayım Merkezi, İstanbul, 22-24 Kasım 2012.

AKYOL, E.; KAYABALI, K., “Çevre Jeolojisine Giriş”, 3. Baskı, Gazi Kitap Evi, Bahçelievler/Ankara, Çeviri: KELLER, E. A., University, of California, Santa Barbara, 549 s., Ankara, 2006.

AKYÜREK B.; SOYSAL, Y. “Biga Yarımadası Güneyinin (Savaştepe-Kırkağaç-Bergama-Ayvalık) Temel Jeoloji Özellikleri”, Maden Tetkik ve Arama Dergisi (MTA), Sayı 95-96, Sayfa: 12, Ankara, 1980/1981.

ALTINLI, E. İ., “Yerbilimleri Sözlüğü”, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, No: 195, 1175 s., Ankara, 1986.

ANDREWS, D.C.A.; MARTİN, G.R., “Criteria for liquefaction of silty soils”, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, 2000.

ANSAL, A.; ERDİK, M.; ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M.; EYİDOĞAN H.; SİYAHİ, B., “Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması İşine Ait, -Özel Teknik Şartname-Hazırlanması”, Raporu. İstanbul, 2004.

ANSAL, A.; ERDİK, M.; ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M.; EYİDOĞAN H.; SİYAHİ, B.; DURUKAL, E. “Migrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması –Avrupa Yakası (Güney)” raporu, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Bilimsel ve Teknik Destek Çalışma Grubu, OYO Int. Corp., İstanbul, 2007.

ANSAL, A.; ÖĞÜNÇ, G., “Dinamik Üç Eksenli Sıvılaşma Deneyleri ve Tekrar Sıvılaşma”, Deprem Araştırma Bülteni, Yıl 8, Sayı 35, Sayfa 61-82, 1981.

ARIOĞLU, E., “Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Tünel Dersi” 1. Bölüm, Yapı Merkezi AR&GE Bölümü, 2009.

ARIOĞLU, N.; ARIOĞLU, E. “Mimar Sinan’ın Seçtiği Taş: Küfeki ve Çekme Dayanımı 1997. İTÜ Mim. ve Maden Fak., 14 s., Yapı Merkezi, http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12690.pdf

ARIOĞLU, N.; TUĞRUL, A.; ZARİF, H.; GİRGİN, Z. C.; ARIOĞLU, E., “Küfeki taşının Dayanıklılık Analizi: Şehzade Câmii Örneği-I, 6 s., http:// www.ym.com.tr/ formdata/pdf/kufeki1.pdf

ARIOĞLU, E.; YILMAZ, A. O., “Çözümlü Problemlerle Tünel/Galerilerin-Sismik Analizi”, TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yayın No: 111, 312 s., 2006.

ARMIJO, R.; MEYER, B.; NAVARRO, S.; KING, G.; BARKA, A., “Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: A clue to propagation process of the North Anatolian Fault”, Terra Nova 14: 80-86, 2002.

AWATA, Y.; YOSHIOKA, T.; EMRE, Ö.; DUMAN, T.Y.; DOĞAN, A.; TSUKUDA, E.; OKAMURA, M.; MATSUOKA, H.; KUŞÇU, İ., “17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Yüzey Kırığının Genel Özellikleri, 17 Ağustos 1999 İzmit depremi yüzey kırığı”, MTA Özel Yayın Serisi-1, Ankara, 41-55, 2003.

AYTAÇ, M., “Tatbikî Topoğrafya”, Boy-Açı Ölçmeleri-Geometrik Nivelman-Tesviye Eğrileri, 2. Baskı, İstanbul, 1971.

AYVAZOĞLU E.; ÖKTEN, G.; TUNCEL, Z., “Yer Altı Kazılarında Havalandırma Uygulamaları”, 12/1994, s. 277-300, Ulaşımda Yer altı Kazıları 1. Sempozyumu, İTÜ Maçka Sosyal Tesisleri, 01.12.1994-03.12.1994.

BARKA, A.A., “The North Anatolian fault zone”, Annales Tectonicae Special Issue 6: 164-195, 1992.

BARKA, A.A., “Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967”, Bull. Seismol. Soc. Amer., 86, 1238-1254, 1996.

BARKA, A.A., “The 17 August 1999 Izmit earthquake”, Science 285: 1858–59, 1999.

BARKA, A.A.; KADINSKY-CADE, K., “Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity”, Tectonics 7: 663-684, 1988.

BARKA, A.; AKYÜZ, H.S.; ALTUNAL, E.; SUNAL, G.; ÇAKIR, G.; DİKBAŞ, A.; YERLİ, B.; ARMİJO, R.; MEYER, B.; CHABALİER, J.B.; DOLAN, J.R.; HARTLEB, T.; DAWSON, T.; CRİSTOFFERSON, S.; TUCKER, A.; FUMAL, T.; LANDGRİDGE, R.; STENNER, H.;

LETTİS, W.; BACHHUBER, J.; PAGE, W., “The surface rupture and slip distribution of the 17 August İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault”, Bull. Seismol. Soc. Amer., 92, 43-60, 2002.

BAYKAL, F. A., “Historik Jeoloji”, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları: Rektörlük No: 2002, Fakülte No. 127, 436 s., İstanbul, 1974.

BAYKAL, F. A., “Stratigrafi Prensipleri”, Kutulmuş Matbaası, 214 s., İstanbul, 1967.

BEURLEN, K., “Geologie, Die Geschichte der Erde und des Lebens”, Kosmos Gesellschaft der Naturfreunde Franckh’sche Verlagshandlung, 318 s., Stuttgart, Deutschland, 1975.

BİLGİ^{2000} Mühendislik&İnşaat Ltd. Şti., “Hasdal Kavşağı-Kemerburgaz-Yassıören Ayırımı Devlet Yolu Yapım İşi”, Km 16+400 – 17+100 Arası Heyelân Önleme Projesi İnklinometre Raporu, 14 s., İstanbul, 25 Şubat 2012.

BOGGS JR S., “Sedimentology and stratigraphy (3. edition)”, Prentince Hall Pres, 726 s., 2001.

BOZKUŞ, Z., “Afet Yönetimi için Baraj Yıkılma Analizleri, İMO Teknik Dergi, 3335-3350, Yazı 224, ODTÜ, İnş. Müh. Bölümü, Ankara, 2004.

CANITEZ, N., “Levha Tektoniği Ders Notları” Editör ve Akademik Yöneticisi, Tübitak-İTÜ Maden Fakültesi, Ofset Baskı Atölyesi, 798 s., İstanbul, 1983.

CODUTO, P.D., “Geotechnical Engineering, Principles and Practices”, Prentice Hall, 760 pp., NJ, USA, 1999.

ÇATAL, A., “Atatürk Barajı jeoteknik uygulamaları”, Atak Ofset, 260s, 1993.

ÇAĞDAŞ, V., “Taşınmaz Değerlemesi Ders Notları”, (yayımlanmamış), http://yildiz.edu.tr/~volkan/td/td.pdf, İstanbul, 2012.

ÇEPEL, N., “Ormanların Erozyon Üzerindeki Etkileri”, Anadolu Üniversitesi, www.anadolu.edu.tr/aos/kitap/IOLTP/1270/unite08.pdf, sayfa 145-171, 1998.

DALGIÇ, S.; TURGUT, M.; KUŞKU, İ.; COŞKUN, Ç.; COŞGUN T., “İstanbul’un Avrupa Yakasındaki Zemin ve Kaya Koşullarının Bina Temellerine Etkisi”, Uygulamalı Yerbilimleri, Sayı: 2, s. 47-70, Ekim-Kasım 2009.

DAUSIEN, W., “Die Entwicklungsgeschichte der Erde”, Verlag Werner Dausien-Hanau/M. Band 1 und 2, 888 s., Deutschland, 1974.

De BEER, J.H., “Subjective classification of the hardness of rocks and the associated shear strength”, Proc. 4th Reg. Cong. Afr. Soil Mech. Found. Eng., 396-398, Capetown 1967.

DEERE, D.U., “Technical description of rock cores for engineering purpose”, Rock Mech. and Eng. Geol. 1, 16-22, 1963.

DİRİK, K. “Yerbilimleri Dergisi’nde (2004, Sayı 30, 129-134) yayımlanmış olan “Arazide bir fay yüzeyinin kayma yönünü saptamada kullanılan 'elle dokunma' yönteminin geçerliliği” başlıklı makale (T. Yürür) ile ilgili tartışma”, 79-83, Yerbilimleri, 26 (2), s. 79-83, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi, Ankara, 2005.

DİZER, A., (1985). “Paleontoloji-Omurgasız”, İstanbul Üniversitesi Yayınları-3157, İstanbul, 1983.

DİZER, A., (1985). “The Oligocene of the Pınarhisar, Piri Reis”. International Contribution Series Publication, V.2, Sixth Colloquium on Geology of the Aegean Region, 129-153, 1985.

DOLU, E.; GÖKAŞAN, E.; MERIÇ, E.; ERGIN, M.; GÖRÜM, T.; TUR, H.; ECEVITOĞLU, B.; AVŞAR, N.; GÖRMÜŞ, M.; BATUK, F.; TOK, B.; ÇETIN, O., “Quaternary evolution of the Gulf of Izmit (NW Turkey): A sedimentary basin under control of the North Anatolian Fault Zone”, Geo-Marine Letters (baskıda), 2007.

EMRE, Ö.; AWATA, Y., “Doğu Marmara bölgesinde Kuzey Anadolu Fay Sistemi’nin neotektonik özellikleri, 17 Ağustos 1999 İzmit depremi yüzey kırığı”, MTA Özel Yayın Serisi-1, Ankara, 1-9, 2003.

ERGİN, M.; BODUR, M.N.; EDİGER, V., “Distribution of surfical shelf sediments in the northeastern and southwestern of the Sea of Marmara: Strait and canyon regimes of the Dardanelles and Bosporus”, Marine Geology 96: 313-340, 1991.

ERGUVANLI, K., “Mühendislik Jeolojisi (5. Basım)”, Seç Yayınları, 590 s., İstanbul 1994.

ERGUVANLI, K.; YÜZER, E., “Yeraltı Suları Jeolojisi (Hidrojeoloji), İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, Sayı 967, Özarkadaş Matbaası, 340 s., 1973.

ERİNÇ, S., “Jeomorfoloji-II (3. Basım)”, Der Yayınları, İstanbul, 483 s., 2001.

EROSKAY, O.; KALE, S., “İstanbul Boğazı Tüp Geçişi Güzergâhı’nda Jeoteknik Bulgular”, Mühendislik Jeolojisi Türk Millî Komitesi Bült., 8, 2-7, 1986.

ERTUNÇ, A., “Mühendislik Jeolojisi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Yayınları, 179 s., Isparta, 2003.

FOLK, R. L., “Practical Petrographic Classification of Limestones”, American Association of Petroleum Geologists Bulletin (A.A.P.G.), v. 43, p. 1-38, 1959.

FOOKES P.G.; SWEENEY, M., “Stabilization and control of local rock falls and degrading rock slopes”, Engineering Geology, 9, 1-9, 1976.

GAZİOĞLU, C.; GÖKAŞAN, E.; ALGAN, O.; YÜCEL, Z.; TOK, B. AND DOĞAN, E, “Morphologic Features of the Marmara Sea from Multi-beam Data”, Marine Geology, 190/1-2, 333-356, 2002.

GAZİOĞLU, C.; YÜCEL, Z.Y.; DOĞAN, E., “Morphological Features of Major Submarine Landslides of Marmara Sea Using Multibeam Data”, Journal of Coastal Research 21(4), 664–673, 2005.

GLOVER, C. and ROBERTSON A.H.F, “Origin of tufa (cool-water carbonate) and related terraces in thi Antalya area, SW Turkey, Geological Journal, Geol. J. 38: 329-358, 2003.

GÖKAŞAN, E.; ALPAR, B.; GAZİOĞLU, C.; YÜCEL, Z.Y.; TOK, B.; DOĞAN, E.; GÜNEYSU, C., “Active tectonics of the İzmit Gulf (NE Marmara Sea): From high resolution seismic and multi-beam bathymetry data”, Marine Geology 175 (1-4): 271-294, 2001.

GÖKAŞAN, E.; USTAÖMER, T.; GAZIOĞLU, C.; YÜCEL, Z.Y.; ÖZTÜRK, K.; TUR, H.; ECEVITOĞLU, B.; TOK, B., “Morpho-tectonic evolution of the Marmara Sea inferred from multi-beam bathymetric and seismic data”, Geo-Marine Letters 23 (1): 19-33, 2003.

GÖKAŞAN, E.; TUR, H.; ECEVITOĞLU, B.; GÖRÜM, T.; TÜRKER, A.; TOK, B.; ÇAĞLAK, F.; BIRKAN, H.; ŞIMŞEK, M., “Evidence and implications of massive erosion along the Strait of İstanbul (Bosphorus)”, Geo-Mar. Lett., 25: 324-342, 2005.

GÖKAŞAN, E.; TUR, H.; ECEVITOĞLU, B.; GÖRÜM, T.; TÜRKER, A.; TOK, B.; BIRKAN, H., “İstanbul Boğazı Deniz Tabanı Morfolojisini Denetleyen Etkenler: Son Buzul Dönemi Sonrası Aşınma İzlerinin Kanıtları”, Yerbilimleri, 27 (3), 143-161, 2006.

GÖKÇEOĞLU, C.; SÖNMEZ, H.; NEFESLİOĞLU, H.A.; DUMAN, T.Y.; CAN, T., “The March 17, 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide susceptibility map of its close vicinity”, Engineering Geology, 81, pp. 65-83, 2005.

GÜLEÇ, A., “Characterization of Mortars and Plasters of Some Historic Monuments”, NATO, CCMS Pilot Study, Conservation of Historic Brick Structures, 3rd Expert Meeting Proceedings Book, Hamburg 2-4 November, pp. 133-141, 1989.

GÜRPINAR, O., “Sondaj Bilgisi”, Tatbikî Jeoloji Kürsüsü, İ.Ü. Yayını, 90 s., İstanbul, 1978.

HAMBLİN, W.K.; CHRİSTİANSEN, E.H., “Earth’s dynamic systems (X. Edition)”, Prentice-Hall Inc. New Jersey, 759 s., 2004.

HAMPTON, M.A.; LEMKE, R.W.; COULTER, H.W., “Submarine landslides that had a significant impact on man and his activities: Seward and Valdez, Submarine landslides: Selected studies in the U.S”, Exclusive economic zone (Ed. W.C. Schwab, H.J. Lee, D.C. Twichell) U.S. Geological Survey Bulletin 2002, 123-134, 2002.

HANSBO, S, Jordmateriallära, Almquist & Wiksell Förlag AB, Stockholm, 218 s., 1975.

İBB (İstanbul Büyükşehir Belediyesi), “1/100.000 Ölçekli İstanbul Çevre Düzeni Plânı Raporu”, İmar ve Şehircilik Daire Başkanlığı, Şehir Plânlama Müdürlüğü, 790 s., İstanbul, 2009.

IDRISS, I. M., “Response of soft soil sites during earthquakes”. Proceedings of the Symposium to Honor Professor H. B. Seed, Berkeley, May, pp. 273-289, 1990.

İMREN, C.; LE PICHON, X.; RANGIN, C.; DEMIRBAĞ, E.; ECEVITOĞLU, B.; GÖRÜR, N., “The North Anatolian Fault within the Sea of Marmara: A new evaluation based on multi-channel seismic and multi-beam data”, Earth Planet Sci Lett 186: 143-158, 2001.

İNCE, G. Ç.; YILDIRIM. M.; ÖZAYDIN, K.; ÖZENER, P.T.; “Seismic microzonation of the historic peninsula of İstanbul”, Bull. Eng. Geol. Environ., Vol: 67 (1), pp. 41-51, 2008.

ISRM, “Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses”, Int. J. Rock. Mechn. And Mining Sei. and Geomech., Abstr. 15, 6, pp 319-368, 1978.

İSTANBUL MÜHENDİSLİK Tic. Ltd. Şti., “Balıkesir İli, Susurluk İlçesi, Keltepe Rüzgâr Enerji Santrali Türbin Alanlarına Ait Jeolojik-Geoteknik Değerlendirme Raporu”, 76 s., İstanbul, 2009.

JEMİRKO, Jeolojik Mirası Koruma Derneği, www.jemirko.org.tr/ , 2000.

KARAGÜZEL, R.; KILIÇ, R. “The Effect Of The Alteration Degree of the Ophiolitic Melange on Permeability and Grouting”, Engineering Geology, Elsevier Sceince, 57, 2000.

KARAMAN, M. E.; KİBİCİ, Y., “Temel Jeoloji Prensipleri”, Genişletilmiş 2. Baskı, Belen Yayıncılık ve Matbaacılık, 17 Bölüm, 398 s., Ankara, 2008.

KAYABALI, K., “Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat”, (BELL F.G.’den Çeviri, British Geological Survey), Gazi Kitapevi, 797 s., Ankara, 2006.

KELLER, E.A; PİNTER, N., “Active Tectonics, Earthquakes, Uplift, and Landscape”, Pearson Education, 363 s., 2002.

KESKİN, M.; USTAÖMER, T.; YENİYOL, M., “İstanbul Kuzeyinde Yüzeylenen Üst Kretase Yaşlı Volkano-Sedimenter Birimlerin Stratigrafisi, Petrolojisi ve Tektonik Ortamı”, İstanbul’un Jeolojisi Sempozyumu, bildiri kitabı, s 23-35, İstanbul, 2003.

KETIN, I., “Über die Tektonisch-Mechanischen Folgerungen aus den grossen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums”. Geologische Rundschau 36: 77-83, 1948.

KETİN, İ., “Genel Jeoloji, Cilt I Yerbilimlerine Giriş” (5. Baskı), İTÜ Vakfı Yayınları, No: 22, 564 s., 1998.

KETİN, İ.; ERİNÇ, S.; ERGUVANLI, K.; EGEMEN, R.; ÖZUYGUR, M., “Umumi Jeoloji”, Arz Kabugunun Dış Olayları ve Yeryüzü Şekilleri, II. Kısım, 428 s., Berksoy Matbaası, İstanbul, 1963.

KETİN, İ. “Genel Jeoloji, Cilt II Dış Olaylar ve Yeryüzü Şekilleri” (2. Baskı), İTÜ Vakfı Yayınları, sayı 1228,, 396 s., 1982.

KILIÇ, H.; BERİLGEN, S. A.; BİÇER, P.; YILDIRIM, M. (2010), "Laboratory and Field Observations for Golden Horn Marine Clay", Marine Georesources and Geotechnology, 28: 303-323, Copyright © Taylor & Francis Group, LLC; ISSN: 1064-119X print/1521-0618 online; DOI: 10.1080/10641191003780849, 2010.

KOCATÜRK, T.; YILDIRIM, M.; ÖZAYDIN, K. "İstanbul İslâm ve Teknoloji Müzesi Binası ile Sur-i Sultanî Surları Altına İsabet eden Alandaki Tünel Çalışmaları Esnasında Müze Binası ve Sur Duvarlarında Meydana Gelen Ayrılmalar, Çatlaklar ve Dökülmelere İlişkin Teknik İnceleme ve Değerlendirme Raporu", YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bl., 9 s., 2010.

KRYNİNE, D.; JUDD, W., "Principles of engineering geology and geotechnics", McGraw-Hill, Washington, 1957.

KURT, H., "Eynif Polyesi (Antalya-Türkiye)", Marmara Coğrafya Dergisi, Sayı 3, Cilt 1, s. 93-122, İstanbul, 2001.

KUŞÇU, İ.; OKAMURA, M.; MATSUOKA, H.; GÖKAŞAN, E.; AWATA, Y.; TUR, H.; ŞİMŞEK, M.; KEÇER, M., "Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of İzmit, Sea of Marmara, NW Turkey", Marine Geology, 215: 193–214, 2005.

LE PICHON, X.; ŞENGÖR, A.M.C.; DEMIRBAĞ, E.; RANGIN, C.; İMREN, C.; ARMIJO, R.; GÖRÜR, N.; ÇAĞATAY, N.; MERCIER DE LEPINAY, B.; MEYER, B.; SAATÇILER, R.; TOK, B., "The active main Marmara Fault", Earth Planet Sci Lett 192: 595-616, 2001.

MCGEARY, D.; PLUMMER, C.C.; CARLSON, D.H., "Physical Geology: Earth Revealed (V. Edition)", Mc Graw Hill, New York, 574 s., 2004.

MILNE, D.; GERMAİN, P. and POTVİN, Y., Measurement of Rock Mass Properties for Mine Design, Proceedings of the ISRM-Eurock Symposium on Rock Characterization, A.A. Balkema Publishers, Chester, England, 1992.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Madenlerin Kullanım Alanları, www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=maden_kullanim.

NORMARK, W.R.; MCGANN, M.; SLİTER, R., "Age of Palos Verdes submarine debris avalanche, southern California", Marine Geology 203, 247-259, 2004.

OKLAY, N., "23. Güneş Çevriminin Genel Özellikleri", İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 72 sayfa, İstanbul, 2006.

OTEO, C. S., "In situ characterization of rocks", In-Situ Characterization of Rocks. Ed: V. M. Sharma & K. R. Saxena, Balkema, Lisse, 1-48, 2002.

ÖNALAN, M., "Pendik Bölgesi ile Adaların Jeolojisi ve Sedimenter Özellikleri, İ.Ü. Yer Bilimleri Fak. Jeoloji Bölümü, Doçentlik tezi, 156, İstanbul, 1982.

ÖNALAN, M., “İstanbul Devoniyen İstifindeki Yumrulu Kireçtaşlarının Oluşumu”, MTA Dergisi, 111, 37-46, 1990

ÖNALAN, M. “İstanbul Devoniyen Çökellerinin Sedimenter Özellikleri ve Çökelme Ortamları”, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.6, S. 1-2, sayfa: 92-108, İstanbul, 1987/1988.

ÖNALAN, M. “Sahada Yerbilimi Çalışmaları (Saha Jeolojisi)”, İstanbul Üniv. Jeoloji Müh. Böl., 599 s., İ.Ü. Basımevi, İstanbul, 2000.

ÖNALP, A.; AREL, E., “Geoteknik Bilgisi II: Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği”, Birsen Yayınevi, 414 s., 2004.

ÖZAYDIN, K., “Zemin Mekaniği”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 350 s., 2011.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M., “Rehabilitation of Golden Horn: Its Formation. Deterioration, and Hopes for Rehabilitation”, International Symposium honoring Prof. V. Yerlici, Boğaziçi University, School of Engineering-Department of Civil Engineering. pp. 195-210, İstanbul1997.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, S.; YILDIRIM, M., “İstanbul Büyükşehir Belediye Başkanlığı, Haliç Islah Projesi – Fizibilite Raporu için Taban Çamurunun Geoteknik ve Kirlilik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çamurunun Taranması ve Uzaklaştırılması” Proje Nihaî (Beşinci) Geoteknik Rapor, Teknik Rapor, YTÜ, İnşaat Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, 1995.

ÖZAYDIN, K.; ANSAL, A.; ERDİK, M.; YILDIRIM, M.; KILIÇ, H.; ADATEPE, Ş.; ÖZENER, P.T.; TONAROĞLU, M.; ŞEŞETYAN, K.; DEMİRCİOĞLU, M. “İstanbul Deprem Master Plânı-Zeytinburnu Pilot Projesi, Sismik Mikrobölgeleme Amaçlı Jeolojik ve Geoteknik Değerlendirme ve Yer Sarsıntısı Tehlikesi Mikrobölgeleme Raporu”, YTÜ Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul Büyükşehir Belediye Başkanlığı-Boğaziçi İnşaat Müşavirlik A.Ş., Bimtaş, İstanbul, 2004.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, S.; YILDIRIM, M., “Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş., Manisa İli, Kırkağaç İlçesi-Gelenbe, Sayalar Köyü, Avderneği Tepe-Yassı Tepe ve Kırüstü Tepe Mevkileri, Rüzgâr Enerji Santrali Temellerine İlişkin Geoteknik Değerlendirme Raporu”, YTÜ, Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul, 2007.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M., “Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Yerleşim Birimi Teknopark Alanı Hakkında Geoteknik Rapor”, YTÜ, Rektörlük Arşivi, 09.04.2009, 59 sayfa, İstanbul, 2009.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, S.; YILDIRIM, M., “Balıkesir İli, Susurluk İlçesi, Keltepe, Rüzgâr Enerji Santralı, Türbin Alanları Geoteknik Raporuna İlişkin Değerlendirme Raporu”, YTÜ, Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul, 2009.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, S.; YILDIRIM, M., “Soma Elektrik Üretim A.Ş. Manisa İli, Soma İlçesi, Yumruçalı Bölgesi için Hazırlanan Geoteknik Rapora İlişkin Değerlendirme” Raporu, YTÜ, Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul, 2009.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M., “Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş. ve İstanbul Mühendislik Tic. Ltd. Şti., Kuyucak Rüzgâr Enerji Santrali Projesi T-13 No’lu Türbin Alanı Kazısında Rastlanan Karstik Boşluklara ve Alınan Önlemlere İlişkin Görüş Raporu”, YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bölümü, YTÜ Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul, 2010.

ÖZAYDIN, K.; YILDIRIM, M.; BERİLGEN, M., “İstanbul İli, Kemerburgaz-Yassıören Ayrımı, Devlet Yolu Tayakadın Mevkii, Km 16+600 ve 17+200 Arası Heyelân Önleme ve Yeni Güzergâhı Belirleme Çalışmalarına İlişkin Geoteknik Değerlendirme Raporu” YTÜ, İnş. Fak., İnş. Müh. Bölümü, YTÜ Döner Sermaye İşletmeleri, İstanbul, 2012.

ÖZAYDIN, K., “Yıldız Teknik Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi (Teknopark)”, PP sunum, İnşaat Mühendisliği’nde 100. Yıl Teknik Kongresi, İstanbul, 23 Kasım 2012.

ÖZMEN, M. T., “Heyelân ve Antalya”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Yazılar, Antalya Şubesi, İMO Antalya Bülten, sayfa 11-15, 2008.

ÖZTUNALI, Ö. “Maden Yatakları Oluşumları ve Değerlendirmeleri”, 311 s., Latin Matbaası, İstanbul, 1973.

PATTON, F.D.; DEERE, D.U., “Significant Geological Factors in Rock Slope Stability”. Sym. on Plan. Open Pit Mines, Johennesburg, 1971.

PINAR, N., “Géologie et météorologe sismiques du bassin de la mer de Marmara”. Bull. of Science Fac. of Istanbul University, VII (3/4), 121-182, 1942.

PLUMMER, C.C.; MCGEARY, D., “Physical Geology (6. Edition)”, Wm. C. Brown Publishers, 537 s., 1993.

PRESS, F.; SİEVER, R.; GROTZİNGER, J.; JORDAN, T.H., Understanding Earth (IV. Edition), W.H. Freeman and Company, New York, 567 s., 2004.

RANGIN, C.; DEMIRBAĞ, E.; İMREN, C.; CRUSSON, A.; NORMAND, A.; LE DREZEN, E. & LE BOT, A., “Marine Atlas of the Sea of Marmara”, IFREMER-Brest Technology Center, France, 2001.

SAKAOĞLU, N.; “Türk Anadolu’da Mengücekoğulları”, Genişletilmiş 1. Baskı, 499 s., Yapı Kredi Yayınları; baskı: Altan Matbaacılık, İstanbul, 2005.

SELÇUK, M. E., Öğretim Görevlisi, Dr. Deprem Yük. Müh., kişisel arşiv, 1999, YTÜ.

SEYMEN, İ., “Kaman (Kırşehir) Dolayısında Kırşehir Masifi’nin Stratigrafisi ve Metamorfizması”, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, JMO, C. 24, 7-14, 13 s., 1981.

ŞAROĞLU, F.; EMRE, Ö.; KUŞÇU, İ., “Türkiye Diri Fay Haritası”, MTA Yayınları, Ankara, 1992.

ŞEKERCİOĞLU, E., “Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi”, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 28, 286 s., 2007.

ŞENTÜRK, H. Ş.; KÖKSAL, K.; “Karayollarımızda Don Penetrasyonunun Etüdü”, İMO, Türkiye İnşaat Mühendisliği, IV. Teknik Kongresi, Konu No: II, Rap. No: 2, Ankara, 1968.

ŞİMŞEK, O., “Yapı Malzemeleri II”, Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., 234 s., üçüncü baskı, İstanbul, 2007.

TARHAN, F., “Mühendislik Jeolojisi Prensipleri”, III. Baskı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basımevi, 384 s., Trabzon, 2002.

TERZAGHI, K., and PECK, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York, 566 s., 1948.

TERZAGHI, K., “Stability of step slopes on hard unwaethered rocks”, Geotechnique, 12(4), 1962.

TERZİ, N.U.; SELÇUK, M. E.; ŞENGÜL, T., “A Numerical Evaluation of a Cover Embankment Model on Very Soft Halic Dredge Material”, International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, 8 p., September 1-3, Seoul Korea, 2011.

TOLMAN, C.F. “Groundwater”, McGraw Hill Book Comp. Inc., New York, 1937.

TONAROĞLU, M., “Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı, Doktora Tezi (Yanınlanmamış), 2006.

TÜRK DİL KURUMU YAYINLARI, “İmlâ Kılavuzu”, Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu, Yayın No: 525, Türk Tarih Kurumu Basım Evi, 346 s., Ankara, 1993.

TÜRK SİLAHLI KUVVETLERİ (TSK), GENEL KURMAY BAŞKANLIĞI, “Malazgirt Zaferi”, Türk Tarihi’nde Önemli Günler, Resmî Kurumsal İnternet Sitesi, www.tsk.tr/8_tarihten_kesitler/8_4_turk_tarihinde_onemli_gunler/malazgirt_zaferi/malazgirt_zaferi.htm; Ankara, 2012.

TWİSS, R. J; MOORE, E. M., “Structural Geology”, W.H. Freeman and Company, 532 s., 1992.

UĞUR, T., “Perge Antik Kentine Ait Mozaik Harçlarının Karakterizasyonu”, İ.Ü. Sosyal Bilimler Enst., Taşınabilir Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 256 s., Proje No: 6125, İstanbul, Aralık 2011.

ULAŞTIRMA BAKANLIĞI (BOZGEYİK, K.; YEŞİL, M.A.; ÖNDER, S.; ÖLÇEN, G.; ERSÖZ, Y.; TEMUR, M.; SELÇUK, E., ve Çalışma Grubu), “Ulaştırma ve Haberleşme Terimleri

Sözlüğü", T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Strateji Geliştirme BaşkanlığıYayınları-16, 397 s., Ankara, 2011.

ULUKAYA, S.; YÜZER, N.; SELÇUK, M. E.; YILDIRIM, M., "Tarihî Kireç Harçlarının Tanımlanmasında Uygulanan Deney Yöntemlerinin İrdelenmesi", İnşaat Mühendisliği'nde 100. Yıl Teknik Kongresi Bildirileri, 10 sayfa, YTÜ-TK172.pdf; Bildiriler Kitabı: s. 84-85, YTÜ Basım-Yayım Merkezi, İstanbul, 22-24 Kasım 2012.

ULUSAY, R., "Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler (IV. Baskı)", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları No: 38, 385 s., 2001.

ULUSAY, R.; SÖNMEZ, H., "Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri", TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları No: 60, 243 s., 2002.

VARDAR, M., YÜZER, E., "Kaya Mekaniği" , İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı Kitap Yayınları No: 11, İTÜ Maden Fakültesi Ofset Atölyesi, 187 s., 1986.

VARDAR, M. "İnşaat Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Ders Sunumları", 2006.

VARDAR, M.; KARAGÜZEL R.; ORHON, D.; SÖZEN S.; ESİN, N.; YEŞİL A.; YILDIRIM, M.; YILDIZCI, A.C., "İstanbul'un Kentsel Gelişim ve Dönüşüm Plânlanmasında Çevresel Etkiler Dikkate Alınarak Agrega İhtiyacının Karşılanması ve Yıkıntı Atıklarının Değerlenirilmesi Araştırma Raporu", İstanbul Büyük Şehir Belediyesi; 126 sayfa, İstanbul.

WAHLSTROM, E.E., "Tunelling in rock", Elsevier, Amsterdam, 1973.

YALÇINER, A.C.; ALPAR, B.; ALTINOK, Y.; ÖZBAY İ.; IMAMURA, F., "Tsunamis in the Sea of Marmara: Historical documents for the past, models for the future", Marine Geology, Volume 190 (1-2), 445-463, 2002.

Yapı Merkezi AR&GE Yayınları, (www.yapimerkezi.com.tr), 2010.

YENİYOL, M. "Mineraloji", İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34850 Avcılar/İstanbul, 324 s., 2004.

YILDIRIM, G., , "The Deformations Occured Around the Sarıyer-Çayırbaşı Highway Tunnel, CE 890 Final Project, TC İstanbul Kültür University, Faculty of Engineering and Architecture Civil Engineering Department., p. 79, İstanbul, May 2010.

YILDIRIM, M. "Kahramanmaraş Kuzeyindeki (Engizek-Nurhak Dağları) Tektonik Birliklerin Jeolojik Petrolojik İncelenmesi", İÜ., FBE, Mineraloji-Petrografi Bilim Dalı, "Doktora Tezi", 306 s., İstanbul,1989.

YILDIRIM, M.; ÖZAYDIN, K.; ERGUVANLI, A., "İstanbul Boğazı Güneyi ve Haliç'in Jeolojik Yapısı ve Geoteknik Özellikleri", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası dergisi, sayı: 40, 5-14, 1992.

YILDIRIM, M. "Engineering Geology Evaluation of Solid Waste Landfill Sites: Two Examples from Istanbul, Turkey", No: 55, pp. 151-158, Bulletin of Engineering Geology The International Association of Engineering Geology, Paris-France, 1997.

YILDIRIM, M. "Kemerburgaz ve Şile Örneğinde Çöp Döküm Sahalarının Mühendislik Jeolojisi Açısından İrdelenmesi", Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi (MJTMK) Bülteni, 21. Yıl, sayı 16, sayfa 26-34, İstanbul, 1997.

YILDIRIM, M.; KOÇAK, A.; VARDAR, M.; "Çatlaklı Grovakların Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi", YTÜD, Sayı: 1999-1, Sayfa: 43-53, ISSN: 1300-2120, İstanbul, 1999.

YILDIRIM, M.; ÖZAYDIN, K., "Haliç Islah Projesi Kapsamında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar", Journal Of Qafqaz University, 6 Fall 2000, pp., 79-90, ISSN 1302-6763, Baku-Azerbaijan, 2000.

YILDIRIM, M.; AKGÜNER C.; TONAROGLU M.; SELÇUK, M.E.; YILDIRIM G., "Some Applications Of Wind Turbines In Turkey", The National Technical-Scientific Conference (with international participation)" Modern Technologies For The Third Millennium". The fascicle of" Constructıons And Hydroedilitary Installations, Vol.XIII-2, Page: 359-368, University of Oradea, Romania, Nov. 2010.

YILDIRIM, M.; AKGÜNER, C.; TONAROĞLU, M.; SELÇUK, M.E., "İstanbul Tersiyer Çökellerinin Yeni Stratigrafisi ve Mühendislik Özellikleri", Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, ISSN: 1304-7191, cilt: 28, sayı: 4, sayfa: 323-334, İstanbul, Ekim - 2010.

YILDIRIM, M. "Türkiye Aktif (Diri) Fay Haritası", YTÜ, İnş. Fak. İnş. Müh. Bl., Geoteknik ABD,http://www.yarbis.yildiz.edu.tr/web/userAnnouncementsFiles/dosyace1a46165ff48ca6de5da733d4e7672e.pdf, İstanbul, 15 Mart 2011.

YILDIRIM, M., "Deprem ve Nükleer Santral İlişkisi", Gazi Medya, Gazi Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı Yayın Organı, Çevre, http://medya.gazi.edu.tr/?p=735, Ankara, 21 Mart 2011.

YILDIRIM, M., "Deprem ve Tsunami", İstanbul Memurlar Derneği (İSMED), seminer-söyleşi, http://www.ismed.org.tr/?8,19, İstanbul, 08 Nisan 2011.

YILDIRIM, M., "Deprem Korkusu", İstanbul Memurlar Derneği (İSMED), makaleler, http://www.ismed.org.tr/?6,10, İstanbul, 27 Mayıs 2011.

YILDIRIM, M., "Anı", TMMOB, Jeofizik Mühendisleri Odası Bülteni, Sayı: 67, Sayfa: 39-40, http://www.jeofizik.org.tr, İstanbul, Ağustos-2011.

YILDIRIM, M., "Geoteknik Mühendisliğinde Jeolojik Sorunlar", Prof. Dr. Mahir Vardar Jeomekanik, Tünelcilik ve Kaya Yapılarının Tasarımı Özel Oturumları (Special Sessions, Geomechanics, Tunneling, Design of Rock Constructions), 65. Yıl, 558 sayfa, sayfa No: 371-392, İTÜ-Makaleler, Maden Fak., İstanbul, Eylül 2012.

YILDIZ, Ş.; BALAHORLI, V.; SCHONEWILLE, H.; Van ES, M.B., **"**Leachate Treatment By Mbr And Nano-Filtration In Turkey", Iwa Mtwr, Istanbul, 2010.

YILMAZ, I., "Mühendislik Jeolojisi, İlkeler ve Temel Kavramlar", Teknik Yayınevi, Mühendislik Mimarlık Yayınları, 490 s., Kızılay/Ankara, 2007.

YILMAZ, Ö.; ESER, M., "Zemin Sismik Modelinin Tayini İçin Yansıyan, Kırılan ve Yüzey Dalgalarının Entegre Analizi", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Sayfa: 434-443, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2002.

YILMAZ, Ö., ESER, M., "U Unified Worklow for Engineering Seismology", Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Paper No: AE-055, s. 1-7, İstanbul, 2003.

YILMAZ, Y., "Yayılma Merkezleri-Mağmatizma ve Metamorfizma", Sayfa: 415-444, "Levha Tektoniği Ders Notları", Tübitak-İTÜ Maden Fakültesi, Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul, 1983.

YILMAZ, Y.; YİĞİTBAŞ, E.; YILDIRIM, M. "Güneydoğu Anadolu'da Triyas Sonu Tektonizması ve Bunun Jeolojik Anlamı", TPAO Bülteni, Türkiye 7. Petrol Kongresi, sayfa No: 65-77, Ankara, 1987.

YİĞİTBAŞ, E., "Engizek Dağı (Kahraman Maraş) Dolayındaki Tektonik Birliklerin Petrolojik İncelenmesi", İÜ., FBE, Mineraloji-Petrografi Bilim Dalı, "Doktora Tezi", 348 s., İstanbul,1989.

YÜKSEL, Y.; ÇEVİK, E.; ÇELİKOĞLU, Y., "Kıyı ve Liman Mühendisliği", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, Alaz Ofset, 401 s., 1998.

YÜKSEL, Y., "Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Plânlama ve Tasarım)", Arıkan Yayınevi, 424 s., İstanbul, 2005.

YÜZER, E.; VARDAR, M.; ERDOĞAN; M.; ERİŞ, İ., EYÜBOĞLU, R.; ÖZGÜL, A.; MAHMUTOĞLU, Y.; BAYRAKTAR, H.; YALÇIN, T., "İnşaat, Şehircilik, Çevre Jeolojisi", Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı yayını, 107 s., 1991.

YÜZER, N.; AKÖZ, F.; ÖZTÜRK, L. D.; AKBAŞ, B.; KIZILKANAT, A. B.; ÇAKIR, Ö.; KABAY, N., "Yangına Mâruz Kalan Yapılarda Beton Basınç Dayanımı – Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması", TÜBİTAK IÇTAG-1682-1031040 No'lu Proje Sonuç Raporu, 103 s., 2007.

ZARUBA, Q.; MENCL, V., "Engineering Geology", Elsevier, Amsterdam, 1976.

FİHRİST (ALFABETİK İNDEKS)

- A -	SAYFA	- A -	SAYFA
Abatman	485	Apatit	41
Abisal düzlük	29	Aplikasyon	177
Açık havza	194	Ardalanma	424
Açılı diskordans hattı	140	Arduvaz	65, 69, 72
Açısız diskordans hattı	139	Artçı depremler	292
Ada	177	Artezyen	223
Ada yayları	32	Arz tarihi	2
Adhezyon	217	Asılı su tablası	217, 223
Afanatik doku	64	Asimetrik kıvrım	143
Agat	43	Asistematik çatlaklar	154
Aglomera	61	Askıda malzeme yükü	186
Agrega	39	Astenosfer	12
Ağırlık barajlı	487	Aşırı sökülme	542
Akaçlama	194	Ataşman	471
Akarsu	190	Atış uzaklığı	475
Akarsu drenajı	194	Atmosfer	5
Akarsu taraçası	200	Avan proje	177
Akifer	213, 221	Ay Taşı	41
Akifüj	221	Ayrık düzen	177
Akik	42	Ayrışma	96
Akiklüd	221		
Akitard	218, 222	**- B -**	
Akma	347		
Akma göçmesi	311	Baca	55
Aktif fay	289	Balast	73
Aktif kıta kenarı	31	Baraj	483
Alçak kıyı	274	Baraj ekseni	485
Alçalma konisi	236	Baraj tepesi	485
Allokton	159	Baraj topuğu	485
Alt manto	12	Barbakan	369
Alüvyal akifer	222	Basınçlı akifer	223
Alüvyon yelpazesi	203	Baş aşağı	521
Amber	83	Baş yukarı aşınım	188
Ametist	42	Başyukarı	521
Amorf	35	Batardo	487
Amplitüd	302	Batimetri	163
Ana ayna	358	Batimetrik harita	163
Ana kayma yüzeyi	358	Batolit	51
Anaerobik ortam	107	Bazalt	55
Andezit	55	Beril	43
And-tipi levha kenarları	31	Beton	96
Anî oturmalar	362	Beton agregası	95
Ankraj	370	Bina derinliği	177
Ano	522	Bina yüksekliği	177
Anroşman	516	Bindirme	159
Antesedant vâdi	201	Birikinti konisi	202, 350
Antiklinal	143	Birikinti yelpazesi	203
Antitetik faylar	158	Birim deformasyon ölçer	539

- B -	SAYFA	- D -	SAYFA
Birim hacim ağırlığı	416	Dairesel-düzlemsel heyelân	357
Birim kaya elemanı	420	Dalga hızı yayılımı	429
Bitişik düzen	177	Dalga sapması	261
Bitki boşluklu traverten	248	Dalgalılık	435
Biyolojik ayrışma	106	Dalma batma zonu	24
Biyostratigrafi	152	Damar kayaçları	51
Biyostratigrafik birimler	152	Dâne boyutu	417
Blok düzen	177	Dâne özellikleri	309
Bodrum kat	177	Dasit	55
Boksit	78, 110	Dayk	54
Bomba	59	Debi	207
Borulanma	492	Deflasyon	265
Boşluk hacmi	416	Deformasyon	539
Boşluk oranı	417	Delta	204
Boylanma	79	Delta ortamları	118
Boylanmış tabakalanma	134	Demiryolu tünelleri	528
Boylanmış tabakalar	79	Dendritik drenaj sistemi	196
Bozunma, bozuşma	96	Denge profili	190
Bölgesel jeoloji	2	Denge seviyesi	199
Bölgesel metamorfizma	67	Deniz	258
Breş	67	Deniz yığını	268
Budin	145	Denizel çökelme ortamı	118
Budinaj	144	Deplâsman ölçer	385
Budinaj yapısı	147	Deponi alanı	199, 242, 244
Buharlaşma	184	Deprem	289
- C -		Deprem şiddeti	296
Camsal doku	35	Derecelenme	79
		Derin deniz ovaları	29
- Ç -		Derin odaklı depremler	294
Çakıl	77	Derinlik kayaçları	51
Çakıltaşı	61	Derivasyon tüneli	487
Çakmaktaşı	83	Dever	529
Çamur akması	352	Devir	151
Çamurtaşı	145, 517	Devre	151
Çap	177	Devrilme	343
Çapraz tabakalanma	135	Dış çekirdek	11
Çatlak	154	Diatome	82
Çatlak ölçer	385	Dikit	232
Çatlak sıklığı	433	Dinamik su düzeyi	236
Çay	190	Dinamo-metamorfizma	68
Çek-ayır havzaları	162	Dip savak	486
Çekim suyu	217	Diskordan plutonlar	51
Çekirdek taşı	115	Diskordan seri	137
Çektiri	279	Diskordans	137
Çiçeklenme	388	Diskordans hattı	137
Çimento	74	Diverjan levha sınırı	18
Çökme (subsidans)	360	Diyajenez	74, 420
Çökme bölgesi (heyelân)	358	Diyatomit	82
Çöküntü cepleri	137	Diyorit	55
Çört	83	Doğal afet	206
Çözünme	104	Doğal agregalar	96
Çubuk ekstansometre	539	Doğal çimento	418

- D -	SAYFA	- E -	SAYFA
Doğal drenaj	194	Evaporimetre	185
Doğal gerilmeler	535	Evaporitler	262
Doğal havalandırma	546		
Doğal puzolan	388	**- F -**	
Doğal şev	114		
Doğrultu	142	Falez	189, 234
Doğrultu açısı	142	Faneretik doku	64
Doğrultu atımlı faylar	160	Farklı oturma	361
Doku	64	Fasiyes	250
Dolgu barajlar	491	Fay	155
Dolgu kalınlığı	436	Fay aynası	155
Dolgu malzemesi	436	Fay breşi	155
Dolin	125, 228	Fay düzlemi	155
Dolomitit	94	Fay killeri	155
Dolotaşı	94	Fay zonu	155
Dolu savak	486	Fayın yüzey kırığı	289
Doymamış bölge	217	Feldspat	41
Doymuş bölge	217	Filler	85, 389
Drenaj	194	Fillit	69
Drenaj havzası	194	Film suyu	217
Drenaj sistemi	194	Firuze	41
Düden	230	Fissür	154
Düşey fay	156	Fiyord	317
Düzeltme	177	Fizibilite	177, 496
Düzenli akış	185	Fiziksel ayrışma	97
Düzenli çatlaklar	154	Fliş	171
Düzensiz akış	185	Flora	184
Düzensiz çatlaklar	154	Fluorit	41
Düzlemsel kayma	353	Fluviyal jeomorfolojik oluşum	190
		Foliasyon	68
- E -		Formasyon	137, 149
		Frekans	302
Eğim	142		
Eğim açısı	142	**- G -**	
Eğim atımlı ters faylar	158	Gabari	177
Eğim yönü	142	Gabro	55
Ekoloji	244	Gayzer	57
Ekolojik denge	244	Gayzerit	83
Ekolojik sistem	244	Geçirgenlik, geçirimlilik	218, 417
Eksen	143	Gel-git	268
Eksen düzlemi	143	Gel-git genliği	268
Elâstik bölge	536	Genel jeoloji	2
Elâstik deformasyon	539	Genlik	302
Elâstisite	539	Gnays	66, 70
Elek analizi	417	Gnays dokusu	70
Elmas	43	Gökyakut	43
Epidot	78	Gölet	494
Epidot grubu	37	Gömülme metamorfizması	67
Episantr	289	Gözeneklilik	218
Erozyon	109	Graben	158
Esas mineraller	36	Granit	55
Eş yükselti eğrileri	163	Grizu	545

- G -	SAYFA	- İ -	SAYFA
Grup	137, 150	İnce mıcır	85
Gutenberg süreksizliği	10, 301	İnfiltrometre	185
Gül kuvars	42	İnklinometre	394, 539
		İnklüzyon	37
- H -		İnovasyon	457
Harç	40	İntrüzif	50
Harita	162, 177	İri agrega	85
Hata	178	İstikşaf	495
Hava fotoğrafı	178	İyi derecelenme	79
Hava kireci	389	İzoklinal kıvrım	143
Havalanma bölgesi	217	İzotropi	418
Havza	194	**- J -**	
Hendekler	25	Jeofon	475
Heterojen tabakalanma	137	Jeokimya	1
Heyelân	356	Jeoloji	1
Hızlı akma	352	Jeolojik harita	164
Hidrat	103	Jeolojik miras	102
Hidratlaşma	103	Jeomorfoloji	259
Hidrojeoloji	213	Jeopark	102
Hidrolik eğim	220	Jeosit	102
Hidrolik güç ve su tünelleri	529	Jeotermik derece	15
Hidrolik iletkenlik	218	Jips	40
Hidrolik iletkenlik katsayısı	218	**- K -**	
Hidroliz	103, 105	Kabarma bölgesi (heyelân)	358
Hidroloji	183	Kadastro adası	178
Hidrolojik döngü	183	Kadastro çapı	178
Hidrometre analizi	417	Kafa hendeği	199
Hidrosfer	5	Kafesli drenaj sistemi	196
Hidrotermal alterasyon	105	Kaide seviyesi	199
Hidrotermal metamorfizma	67	Kaldera	55
Hiposantr	289	Kalıntı zeminler	108
Hipsografik eğri	14	Kaliş	113
Historik jeoloji	2	Kalker tufası	83
Homojen tabakalanma	137	Kalsedon	43
Homojenite	418	Kalsit	40
Horasan harcı	388	Kama tipi kayma	353
Horst	158	Kanal	189
Hum	230	Kanat	143
		Kaolen grubu	37
- I -		Kaolinit	78
Irmak	190	Kapalı havza	194
Islah	207	Kapiler su	216
Işınsal drenaj sistemi	197	Kapiler zon	216
		Kaplan gözü	42
- İ -		Karasal çökelme ortamları	117, 229
İç çekirdek	11	Karayolu tünelleri	528
İllit	78	Karbonatlaşma	103
İmar adası	178	Karbonat grubu	37
İmar çapı	178	Karışık akifer	222
İmar parseli	178	Karışık yelpaze tipi drenaj	197
İmar plânı	178	Karma davranışlar	539
İmar uygulama plânı	178	Karmaşık kütle hareketi	363
İmpakt metamorfizma	66	Karot	419
İnce agrega	85	Karotiyer	430

- K -	SAYFA	- K -	SAYFA
Karst	225	Kilit taşı	88
Karst topoğrafyası	226	Kiltaşı	77
Karstik boşluk	123, 226	Kimberlit bacaları	44
Karstik çukur	125	Kimyasal ayrışma	99
Karstik kaynak	227	Kiraz çekirdeği olayı	541, 542
Karstlaşma	225	Kireç	84
Kat	150	Klip	159
Kat alanları katsayısı (KAKS)	178	Klivaj	70
Kat yüksekliği	178	Klorit	78
Kataklastik metamorfizma	67	Klorit grubu	37
Katı atık	242	Kolüvyon	350
Kavşak	190	Kompost	243
Kaya	420, 425	Kompozit	95
Kaya blok akması	352	Konglomera	61
Kaya dolgu barajlar	492	Konkasör	85
Kaya düşmesi	342	Konkordan plutonlar	51
Kaya kalite göstergesi	433	Konkordan seri	137
Kaya kripi	348	Konservasyon	390
Kaya patlamaları	541	Konsolidasyon oturmaları	362
Kaya stratigrafi birimleri	137	Kontakt metamorfizma	66
Kaya tuzu	83	Kontur	163
Kayaçlar	36	Konveksiyon akımları	8, 16
Kayaçların direnci	417	Konverjan levha sınırları	24
Kayan kütle	358	Korendon	43
Kayma	353	Koruyucu bölge	536
Kayma çizikleri	155	Köşeli drenaj sistemi	196
Kayma kaması	358	Kötü derecelenme	79
Kayma kertikleri	155	Krater	55
Kayrak	65, 69	Kret	485
Kehribar	83	Krip	348
Kemer	522	Kristal	35
Kemer baraj	488	Kristal sistemleri	34
Kemerlenme	534	Kroki	179
Kesit	179	Kum	77
Kırılma bölgesi	261	Kum akması	352
Kırma kum	85	Kum konisi	314
Kırma taş	85	Kumtaşı	75
Kırmızı kot	179	Kurp	529
Kıta eteği, kıta yükselimi	28	Kuru akmalar	352
Kıta kenarı volkanik yay	31	Kuru dere	190
Kıta sahanlığı	28	Kutu menfez	381
Kıta yamacı	28	Kuvars	42
Kıtaların kayması	9	Kuvarsit	66
Kıtasal kabuk	12	Küfeki taşı	91
Kıtasal şelf	28	Kül	59
Kıvrım	143	Küresel ayrışma	101
Kıvrımlanma	143	Küresellik	78
Kıvrımlı yapılar	159	Kütle hareketleri	339
Kıyı	258, 274		
Kıyı çizgisi	273	**-L-**	
Kıyı çökelme ortamları	117		
Kıyı kenar çizgisi	274	Lagün	262
Kıyı oku	262	Lahar	60
Kil	77	Lakolit	53

- L -	SAYFA	- M -	SAYFA
Lamina	131, 133, 149	Mostra	63
Laminar akış	185	Mühendislik jeolojisi	3
Lapilli taş	59	Mühendislik jeolojisi haritaları	164
Lapya	228	Münhani çizgisi	163
Laterit	110, 111		
Lejand	163	- N -	
Levha	17		
Levha tektoniği	17	Nap	159
Lineasyon	69	Nâzım imar plânı	179
Listrik faylar	158	Necef	42
Litosfer	5, 12	Nehir	190
Litosol	109	Nokta yığını	192, 193
Lizimetre	185	Normal fay	156
Love dalgaları	302	Normal kat	179
Lös	265		
		- O -	
- M -		Oblik fay	156
		Obruk	228
Maden yatakları	1	Obsidiyen	57
Magnitüd	295	Oda	521
Mağaralar	231	Oksidasyon	102
Mağma	31, 48	Okyanusal kabuk	12
Mağmatik kayaçlar	48	Oltu taşı	82
Maktra'lı kireçtaşı	91	Oniks	42
Mansap	485	Oolit	84
Matkap	430	Opal	43
Matriks	74, 418	Orojenez	27, 68
Mekanik havalandırma	546	Orta sığ odaklı depremler	294
Melanj	121	Ortalama çatlak sıklığı	421, 434
Memba	485	Ortognays	70
Menderes	192	Oturma	360
Menderesli tip vâdi	192		
Mercek	149	- Ö -	
Mermer	66, 73		
Metamorfik kayaçlar	65	Ölçek	162
Metamorfizma	65	Ölü fay	289
Metapelit	424	Ön çalışmalar (ön etüt)	495
Metro tünelleri	528	Öncü depremler	292
Mıcır tozu	85	Önsüren	526
Mihrap	92	Örgülü tip vâdi	192
Mika grubu	37	Örtü	521
Mikrofissür	154	Örtü fayı	159
Milonit	67, 71, 155	Örtü kalınlığı	521
Mineraller	35	Özgül tutulma	218
Mineraloji	1	Özgül verim	218
Mohorovicic süreksizliği	12		
Mohs sertlik skalası	38	- P -	
Moloz akması	352	P dalgaları	299, 300
Moloz konisi	350	Pafta	179
Moloz rampası	350	Paleontoloji	2
Monolitik	421	Palye	369
Montmorillonit	78	Paragnays	70
Montmorillonit grubu	37	Paralel drenaj sistemi	196
Morfoloji	163	Parsel	179

- P -	SAYFA	- R -	SAYFA
Parsel cephesi	179	Radyal drenaj	197
Parsel derinliği	179	Radyolarit	82
Parselasyon	179	Radyolarya	82
Pasa	522	Rayleigh dalgaları	302
Pasif fay	289	Redüksiyon	103
Pasif kıta kenarı	28, 31	Refü değeri	458
Payandalı ağırlık barajları	488	Regresif deniz	139
Pedalfer toprak	111	Regresif seri	139
Pedokal toprak	112	Regresif tabaka	139
Pegmatit	54	Regresyon	139
Pekştayn	58	Regülâtörler	494
Peliküler su	217	Rejyonal metamorfizma	68
Pennin	78	Rekreaktif alanlar	179
Peri bacası	60	Restorasyon	390
Peridotit	55	Rezidüel gerilme	535
Periglasiyal	347	Rezidüel zeminler	108
Periyot	152, 302	Richter Ölçeği	295
Perlit	57	Rift	18
Permeabilite	215, 218	Rift vâdisi	19
Permeabilite katsayısı	215, 218	Rip akıntısı	263, 264
Permeametre düzeneği	218	Ripaj	409
Petrografi	1	Ripılmark (Ripple mark)	136, 188
Pırlanta	43	Riprap	86, 516
Pikrit	55	Riyolit	55
Pis hava	544	Rotari	471
Piyezometre	224	Rubin	43
Piyezometrik seviye	224	Rüzgâr türbini temeli	122
Plâj	261		
Plâj ortamları	118	**- S -**	
Plâka tektoniği	17	S dalgaları	299, 301
Plân	179	Saçak seviyesi	180
Plânkote	179	Safir	43
Plâstik bölge	536	Sağlam karot verimi	433
Plâstik deformasyon	539	Sağlam kayalar	423
Plâto bazaltları	56	Sahil şeridi	274
Plutonik kayaçlar	51	Saprolit	111
Plüvyograf	184	Sarkıt	232
Plüvyometre	184	Sediment	74
Podzol toprak	112	Sedimentasyon	74
Point bar	192, 193	Sedimenter karasal ortamlar	229
Polye	230	Sedimenter kayaçlar	73
Pomza taşı	60	Sedimenter ortamlar	117
Porfirik doku	54, 64	Sedimenter primer yapılar	133
Porozite	218, 416, 418	Sedimentoloji	2, 74
Portal	92, 522	Sekonder gerilme durumu	536
Primer dalgalar	299	Sekonder mineraller	36
Primer gerilme	535	Sel kapanları	494
Primer gerilme durumu	535	Sellenme	206
Primer mineraller	36	Senklinal	143
Prizlenme	388	Serbest akifer	222
Profilometre	437	Seri	150
Proje	179	Serizit	69, 78
Pürüzlülük	435	Serpantin grubu	37
Püskürtme beton	369	Sertlik	38

- S -	SAYFA	- S -	SAYFA
Setaltı	205	Süreksizlik aralığı	421
Setönü	205	Süt kuvars	42
Setüstü	204		
Sıcak nokta	32	**- Ş -**	
Sığ odaklı depremler	294		
Sıkılık derecesi	309	Şaft	521
Sıvılaşma	308	Şaryaj	159
Sızdıran akifer	224	Şelf düzlüğü	28
Sızma	185	Şeyl	69, 145, 518
Sızma kapasitesi	185	Şiddet	296
Sileksit	83	Şist	66, 70
Sill	54	Şistozite	69
Silt	77	Şok metamorfizma	66
Siltlenme	497		
Silttaşı	77	**- T -**	
Simetrik kıvrım	143		
Sintetik faylar	158	Tabaka	131, 149
Sismik dalga	298	Tabaka altı yapılar	136
Sismik stratigrafi	152	Tabaka içi yapılar	133
Sismograf	295	Tabaka üstü yapılar	136
Sismogram	299	Tabakalanma	130
Sismoloji	299	Tabakalanma düzlemi	131
Sismometre	299	Taban alanı	180
Sistem	150	Taban alanı katsayısı (TAKS)	180
Sistematik çatlaklar	154	Taban bloğu	156
Sitrin	42	Taban çakıltaşı	138
Siyah kot	180	Tabiî afet	206
Siyenit	55	Taç	357
Sleyt	65, 68, 69, 72	Tahkimat	523
Soliflüksiyon	347	Tâli mineraller	36
Son kat	180	Talk	39
Sondaj	430	Talus	203, 349
Sondaj logu	434	Taluviyum	349
Sömel	393	Tane boyu	417
Sörf bölgesi	259, 261	Tane özellikleri	309
SPT darbe sayısı	432	Tarihsel Jeoloji	2
Stabilize malzeme	85	Tasman (subsidans)	360
Statik su düzeyi	236	Taş	420
Stok	51	Taş kolon	466
Stratigrafi	2, 148	Taş tozu	545
Strato tipi volkanlar	56	Taş unu	85
Strato volkan	56	Taşınmış zeminler	109
Strengeç	539	Taşkın	206
Stros	522	Taşkın bazaltları	56
Strut	531	Taşkın bölgesi	207
Su bilimi	183	Taşkın ovası	206
Su kireci	389	Taşlı topraklar	109
Subsidans	360	Tatbikî Jeoloji	2
Sulu dere	190	Tatlı su	81
Sunî drenaj	197	Tavan bloğu	156
Sünger taşları	58, 60	TBM	529, 530, 531
Sünme	539	Tektonik	2, 141
Süreksizlik	419, 421, 428	Tektonik deformasyon	141
Süreksizlik açıklığı	421	Tektonik pencere	159

- T -	SAYFA	- V -	SAYFA
Tepe (heyelân)	357	Vâdi şekli faktörü	498, 499
Terleme	184	Vâdi yatak yükü	186
Terra-rosa	105, 112, 226,	Vadoz bölge	217
Ters fay	156	Vahşi çöp sahaları	242
Tersiyer gerilme durumu	536	Verev atımlı fay	156
Tıbbî atıklar	242	Vermikülit	78
Tij	430	Viskoz davranış	539
Tombolo	263	Volkan	55
Topaz	43	Volkan bombası	59
Toplam karot verimi	432	Volkanik çamur akıntısı	60
Toplam oturma	361	Volkanik kayaçlar	31, 55
Topoğrafik haritalar	163	Volkanizma	55
Topoğrafya	163		
Toprak	83, 107	**- Y -**	
Toprak akması	352		
Toprak barajlar	491	Yabancı mineraller	37
Toprak kısımları	110	Yağış	184
Toprak kripi	348	Yakınlaşan levha sınırları	24
Toprak suyu	217	Yakut	43
Topuk taşı	60	Yamaç molozları	351
Toz	59	Yamaç molozu konisi	202
Tozlu hava	545	Yanal akma	311
Trakit	55	Yanardağ	55
Transform faylar	21	Yapay agragalar	96
Transform levha sınırları	21	Yapay şev	114
Transgresif deniz	138	Yapı	63
Transgresif seri	138	Yapısal dönme	362
Transgresif tabaka	138	Yapısal jeoloji	2
Transgresyon	138	Yapraklanma	69
Transpirasyon	184	Yarı basınçlı akifer	225
Traverten	83, 233	Yarık	154
Tsunami	314	Yaş	151
Tufa	83, 233	Yatay destek boruları	531
Turkuaz (Türk Taşı)	41	Yavaş akma	348
Tüf	59	Yellowstone süper volkanı	56
Tüfit	59	Yeraltı barajları	494
Tünek akifer	217, 227	Yeraltı su seviyesi	216, 217
Tünek su	217	Yeraltı su tablası	217
Türbülent akışlar	185	Yeraltı suları	213
Tüvenan agrega	85	Yeraltı suyu	217
		Yerel metamorfizma	67
- U -		Yerinde oluşmuş zeminler	108
Uç set	192, 193	Yerli topraklar	109
Uvala	229	Yerşekil bilimi	259
Uyumlu seri	137	Yumurta taşı	84
Uzaklaşan levha sınırı	18	Yuvarlaklık	78
		Yük kalıbı	137
- Ü -		Yükseklik (kot)	180
		Yükseklik eğrili harita	180
Üst manto	12	Yüzey bilimi	259
Üst sistem	150	Yüzey dalgaları	302
Üye	137, 149	Yüzey kayaçları	55
Üzengi	522	Yüzeysel akış	183

- Z -	SAYFA
Zaman	152
Zayıf kayalar	423
Zemin	420, 424, 425
Zemin büyütmesi	304, 306
Zemin kat	180
Zemin nemi	217
Zeminlerin kütlesel özellikleri	426
Zeolit grubu	37
Zımpara taşı	43
Zonal topraklar	109
Zümrüt	43



Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM

Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM, lisans, yüksek lisans ve doktorasını İstanbul Üniversitesi'nde tamamladı. 1990 yılında Yardımcı Doçent, 1996 yılında Doçent oldu. 1980 yılından itibaren çalışmaya başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı'na 2002 yılında Profesör olarak atandı. Yazar, 1990-2013 yılları arasında İnşaat Mühendisliği lisans öğrenim programında yer alan "Genel Jeoloji", lisansüstü Geoteknik programında "Mühendislik Jeolojisi" ve "Kaya Mekaniği" derslerini vermiş, 2013 yılından itibaren ise lisans programında "Mühendislik Jeolojisi", "Çevre Jeolojisi"; Lisansüstü Geoteknik programında ise "Mühendisler için Jeoloji" ve "Kaya Mekaniği" derslerini vermektedir.



Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN

Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN, lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans ve doktorasını ise İstanbul Üniversitesi'nde tamamladı. 2000 yılında Yardımcı Doçent, 2003 yılında Doçent, 2009 yılında Profesör oldu. 2005 yılında görev aldığı Yıldız Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi'nde çalışmalarını sürdürmüş ve 2005-2006 öğretim yılından itibaren ise İnşaat Mühendisliği lisans öğrenim programında yer alan "Genel Jeoloji" dersini vermiştir. Prof. Dr. Erkan GÖKAŞAN 29 Mart 2011 tarihinde vefât etmiştir.