

**LAHANOS (GİRESUN) BAKIR-ÇİNKO TESİSİ ATIK
BARAJININ ŞEV DURAYLIĞI AÇISINDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**SLOPE STABILITY EVALUATION OF THE TAILINGS DAM
AT LAHANOS (GİRESUN) COPPER-ZINC PLANT**

NAZLI TUNAR ÖZCAN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Haziran, 2009

LAHANOS (GİRESUN) BAKIR-ÇİNKO TESİSİ ATIK BARAJININ ŞEV DURAYLILIĞI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Nazlı Tunar Özcan

ÖZ

Maden işletmelerinde üretilen ham cevherin işlenmesi sonucu cevherden arta kalan ve ekonomik değeri olmayan atık malzemesinin güvenli bir şekilde depolanması çevresel etkiler açısından önem taşımaktadır. Atıkların kontrolü amacıyla, maden işletmelerinde atık barajları inşa edilmektedir. Ülkemizde atık barajının bulunduğu maden işletmelerinden biri de Espiye ilçesi (Giresun) yakınlarında bulunan Lahanos Yeraltı Bakır-Çinko işletmesidir. Bu işletmede, biri tamamen dolmuş ve diğeri de dolmak üzere olan iki adet atık barajı bulunmaktadır. Dolmak üzere olan barajın yükseltilerek ek hacim sağlanması planlanmıştır. Bu çalışma, söz konusu bu atık barajının yükseltilmesiyle barajın şev duraylılığının nasıl değişeceğinin ve deprem kaynaklı dinamik yükler altında duraylılığının nasıl etkileneceğinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla: (a) baraj ve civarında incelemeler yapılarak ve ölçümler alınarak barajın mevcut durumu değerlendirilmiş, (b) laboratuvar deneyleri yapılarak mevcut baraj gövdesini oluşturan malzeme ile barajın yükseltilmesinde kullanılacak malzemenin ve barajı dolduran atığın jeomekanik özellikleri belirlenmiş, (c) baraj gövdesi şevinin duraylılığı farklı koşullar (farklı baraj yükseklikleri, deprem kaynaklı dinamik yükler, atığın gövdeye yapacağı etki vb.) dikkate alınarak, farklı duraysızlık modelleri için değişik yöntemlerle (limit-denge ve sayısal analizler) değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, baraj rezervuarında depolanan atık miktarının artmasıyla güvenlik katsayılarının azaldığı, en kritik güvenlik katsayılarının dairesel ve birleşik kayma duraysızlık türlerinin esas alındığı koşullarda elde edildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, atık barajları için güvenli tasarım amacıyla önerilen güvenlik katsayısı aralıklarına göre, baraj şevi geometrisinin korunması ve yoğun yağışlar sonrası rezervuarda beklenmeyen ani su basıncı artışı olmaması durumunda baraj gövdesinin mevcut durumuna göre 10 m daha yükseltilmesiyle statik ve dinamik koşullar altında herhangi bir duraysızlık sorununun beklenmeyeceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık barajı, Lahanos Bakır-Çinko işletmesi, fotoanaliz, limit-denge analizi, sayısal analiz, şev duraylılığı.

Danışman: Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı.

SLOPE STABILITY EVALUATION OF THE TAILINGS DAM AT LAHANOS (GIRESUN) COPPER-ZINC PLANT

Nazlı Tunar Özcan

ABSTRACT

Safe disposal of the tailings, which are the non-economic products of the ore-dressing processes, has prime importance in terms of environmental impacts. In mines, tailing dams are being constructed for the purpose of waste control. The Lahanos (Giresun) underground copper-zinc mine is one of the mines in our country where a tailings dam exists. In this mine, there are two tailings dams, one of them is fully filled and the other one is considerably filled. It is planned to increase the height of the second dam in order to provide additional volume. In this study, it is aimed to investigate how the slope stability of the dam will be affected by an increase in its height and by dynamic loads generated by earthquakes. For the purpose, (a) some investigations and measurements were carried out in the vicinity of the dam, and the current situation of the dam was evaluated, (b) geomechanical properties of the material used for the construction of the dam body, the material that will be used to increase the height of the dam, and tailings were determined by carrying out laboratory test, and (c) stability of the dam slope was investigated by considering different conditions (different dam heights, dynamic loads, forces imposed by the tailings reservoir to dam body etc.) and using different methods of analysis (methods of limiting equilibrium and numerical analysis) for different modes of failure. The analysis results revealed that factors of safety decrease with increase in the height of tailings in the reservoir, most critical factors of safety are obtained for circular and non-circular failure surfaces. However, according to the ranges of factor of safety recommended for safe design of tailings dams, any instability is not expected both in static and dynamic conditions, unless the slope geometry recommended in the project is maintained and an unexpected pore pressures which may develop after a rain storm develop.

Key Words: Tailings dams, Lahanos copper-zinc mine, photoanalyses, limit equilibrium analyses, numerical analyses, slope stability.

Advisor: Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University, Engineering Faculty, Department of Geological Engineering, Applied Geology Division

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarına yön veren, ilgi ve katkılarını esirgemeyen ve tezimin şekillenmesinde büyük emeği geçen tez danışmanım Prof. Dr. Reşat Ulusay'a,

Duraylılık analizleri aşamasında görüşlerini aldığım ve önerileriyle katkılarını esirgemeyen jüri üyesi Yrd. Doç. Dr. Nihat Sinan Işık'a,

Fotoanaliz aşamasında görüşlerini aldığım jüri üyesi Doç. Dr. Harun Sönmez'e,

Lahanos Yeraltı Bakır-Çinko İşletme'sinde tez çalışmamı gerçekleştirmem için gerekli izni veren ve desteklerini esirgemeyen Demir Export A.Ş. Genel Müdürlüğü'ne, Genel Müdür Yardımcısı Ayhan Daşkın'a, Genel Müdürlük Teknik Personeli Jeoloji Yük. Müh. Metin Avgan'a ve Meden Mühendisi Onat Başbay'a,

Saha çalışmalarım sırasındaki yardımlarından ve sağladıkları lojistik destekten dolayı Demir Export A. Ş. Lahanos Yeraltı Bakır-Çinko İşletme'sinin tüm yetkililerine ve çalışanlarına,

Tez savunması sırasında katkılarından dolayı diğer jüri üyeleri Prof. Dr. Vedat Doyuran ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali Hindistan'a,

Laboratuvar çalışmaları sırasında göstermiş oldukları yardımlardan dolayı H.Ü. Zemin Mekaniği Laboratuvarı Teknisyenleri Özgür Erol ve Ahmet Bay'a,

Tezin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Elif Avşar, Araş. Gör. Ayşegül Turgut ve Jeoloji Mühendisi Aycan Coşkun'a,

Çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, gösterdikleri sabır ve katkılardan dolayı sevgili eşime ve aileme

İÇTEN TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Önceki Çalışmalar.....	3
1.2.1. Atık barajları ile ilgili uluslararası literatürde yer alan çalışmalar.....	4
1.2.2. Lahanos İşletmesi ve yakın civarında yapılmış çalışmalar.....	10
2. ATIK BARAJLARI VE İLGİLİ MÜHENDİSLİK SORUNLARI.....	11
2.1. Atık Barajı Türleri.....	12
2.1.1. Vadi tipi atık barajları.....	12
2.1.2. Halka-dayk tipi atık barajları.....	15
2.1.3. Çukur tipi atık barajı (In-pit impoundment).....	15
2.1.4.Özel açılmış çukur tipi atık barajı (specialy in-pit impoundment)..	16
2.2. Atık Barajı İnşa Yöntemleri.....	17
2.3. Atık Barajlarında Karşılaşılan Duraysızlıklar	22
2.3.1. Şev duraysızlıkları.....	22
2.3.1.1. Dairesel kayma.....	22
2.3.1.2. Ötelenmeli kayma.....	22
2.3.2. Temel yenilmesi.....	24
2.3.3. Üstten aşma (Taşma).....	25
2.3.4. Erozyon sonucu meydana gelen duraysızlıklar.....	26
2.3.5. Borulanma sonucu meydana gelen duraysızlıklar.....	27
2.3.6. Sıvılaşma sonucu meydana gelen duraysızlıklar.....	28
2.4. Meydana Gelmiş Atık Barajı Duraysızlıklarına İlişkin Genel Değerlendirme.....	29

3. İNCELEME ALANININ TANITIMI VE ATIK BARAJLARININ DURUMU.....	31
3.1. Coğrafi Konum ve Morfoloji.....	31
3.2. İklim ve Bitki Örtüsü.....	31
3.3. Lahanos Atık Barajlarının Genel Durumu.....	34
4. İNCELEME ALANI VE CİVARININ JEOLJİK VE SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ.....	39
4.1. Espiye İlçesi'nin Stratigrafisi.....	39
4.2. İnceleme Alanının Stratigrafik ve Yapısal Özellikleri.....	41
4.3. İnceleme Alanının Depremselliği.....	45
5. JEOTEKNİK AMAÇLI SAHA ÇALIŞMALARI.....	48
5.1. Örneklem Çalışmaları.....	48
5.2. Dasitlerde Süreksizlik Aralığı Ölçümleri.....	52
5.3. Fotoanaliz İçin Kırmataş Yığınlarından Görüntü Alınması.....	54
6. JEOMEKANİK LABORATUVAR DENEYLERİ.....	55
6.1. Baraj Gövde Malzemesinin İndeks ve Jeomekanik Özellikleri.....	55
6.1.1. Birim hacim ağırlık, su içeriği ve tane özgül ağırlığı.....	55
6.1.2. Tane boyu dağılımı çözümlemeleri.....	56
6.1.3. Kıvam limitleri ve zemin sınıflaması.....	56
6.1.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri.....	57
6.2. Dolguda Kullanılacak Kırmataş Malzemesinin Jeomekanik Özellikleri.	60
6.2.1. Birim hacim ağırlık.....	60
6.2.2. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi tayinleri.....	61
6.2.3. Disk makaslama dayanım indeksi deneyi.....	62
6.2.4. Duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü parametrelerinin ve eşdeğer Mohr-Coulomb yenilme zarfının belirlenmesi.....	63
6.3. Atık Malzemesinin İndeks ve Jeomekanik Özellikleri.....	69
6.3.1. Birim hacim ağırlık, nem içeriği ve tane özgül ağırlığı.....	70
6.3.2. Tane boyu dağılımı çözümlemeleri.....	71
6.3.3. Kıvam limitleri ve zemin sınıflaması.....	71
6.3.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri.....	73
7. ATIK BARAJININ DURAYLILIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	75
7.1. Limit-Denge Analizleri.....	75

7.1.1. Statik koşula ilişkin analizler.....	79
7.1.2. Dinamik koşula ilişkin analizler.....	89
7.2. Sayısal Analizler	99
8. SONUÇLAR.....	106
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİş.....	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Maden atıklarının depolanma sistemi (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).....	11
Şekil 2.2. Vadi tabanının eğim yönüne dik konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	13
Şekil 2.3. Highland (Kanada) bakır madenine bağlı vadi tipi atık barajı (www.tailings.info, 2009).....	13
Şekil 2.4. Vadi tabanının eğim yönüne paralel konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	14
Şekil 2.5. Vadi tabanının eğim yönüne paralel konumlu iki basamaklı vadi tipinde inşa edilmiş Stava (İtalya) atık barajının hava fotoğrafından görünümü (www.tailings.info, 2009).....	14
Şekil 2.6. Vadi tabanının eğim yönüne hem paralel hem de dik konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	15
Şekil 2.7. (a) Tek ve (b) segmentli halka-dayk tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	16
Şekil 2.8. Clemows (İngiltere) atık barajı (parçalara ayrılmış akış yukarı basamaklı halka-dayk tipi) (www.cantabkent.co.uk, 2008).....	16
Şekil 2.9. Çukur tipi atık barajı (www.tailings.info, 2009).....	17
Şekil 2.10. Tutma tipi atık barajı (1. Atık su, 2. Çökelmiş maden atığı, 3. Riprap, 4. Geçirimsiz çekirdek, 5. Filtre, 6. Drenaj zone) (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	18
Şekil 2.11. Akış yukarı yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).....	19
Şekil 2.12. Akış aşağı yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).....	19
Şekil 2.13. Merkezden yukarı doğru yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).....	20
Şekil 2.14. Atık barajlarında meydana gelen tipik dairesel kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).....	22

Şekil 2.15. Atık barajlarında meydana gelen tipik dairesel kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).....	23
Şekil 2.16. Atık barajlarında meydana gelen iki yüzeyli ötelenmeli kayma (aktif-pasif kama) kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).....	23
Şekil 2.17. Atık barajlarında meydana gelen birleşik kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).....	24
Şekil 2.18. Los Frailes (İspanya) madenindeki atık barajında gerçekleşen temel yenilmesinin şematik görünümü (www.wise-uranium.org, 2009).....	24
Şekil 2.19. Temelin zayıf olması nedeniyle temel yenilmesi duraysızlığına uğramış Los Frailes (İspanya) madenine ait atık barajı (www.tailings.info, 2009).....	25
Şekil 2.20. Üstten aşma sonucu atık barajı yenilmesi aşamaları (a) duraylı koşul, (b) suyun baraj gövdesinden taşması, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).....	25
Şekil 2.21. Merriespruit (Virginia, Güney Afrika) atık barajının üstten aşma nedeniyle duraysızlığa uğradıktan sonra (a) karşıdan ve (b) yandan görünümü (www.tailings.info, 2009).....	26
Şekil 2.22. Aitik (İsveç) atık barajının erozyon nedeniyle duraysızlığa uğradıktan sonra hava fotoğrafı (www.tailings.info, 2009).....	27
Şekil 2.23. Borulanma nedeniyle atık barajı yenilmesi aşamaları: (a) duraylı koşul, (b) borulanma ile baraj gövdesinden su sızıntısı, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).....	28
Şekil 2.24. Sıvılaşma sonucu atık barajlarında gelişebilen duraysızlık aşamaları: (a) duraylı durum, (b) sıvılaşma, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).....	28
Şekil 2.25. Yıllara göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.....	29
Şekil 2.26. Duraysızlık nedenlerine göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.....	30
Şekil 2.27. İnşa yöntemlerine göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.....	30
Şekil 3.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.....	32
Şekil 3.2. İnceleme alanının uydu görüntüsü (Google Earth, 2009).....	33
Şekil 3.3. Lahanos işletmesindeki atık barajlarının genel bir görüntüsü: (A) dolan eski atık barajı ve (B) bu çalışmada incelenen atık barajı.....	34

Şekil 3.4. Alt kottaki atık barajının gövde dolgusundan bir görünüm.....	35
Şekil 3.5. Alt kottaki ikinci atık barajının inşası sırasında filtre malzemesinin üzerine jeotekstil serilmesi (Lahanos işletmesinden temin edilmiştir).....	36
Şekil 3.6. Baraj gövdesindeki eğim değişikliği.....	36
Şekil 3.7. Sızıntıların baraj gövdesinde neden olduğu erozyon sonucu oluşan kanallar.....	37
Şekil 3.8. Su ile karıştırılmış atık malzemenin cevher zenginleştirme tesisinden doğal topoğrafik eğim boyunca akıtılması.....	38
Şekil 4.1. Espiye ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (JICA and MMAJ, 1998'den düzenlenmiştir).....	40
Şekil 4.2. İnceleme alanının yalınlaştırılmış jeoloji haritası (EN-SU, 2007'den düzenlenmiştir).....	42
Şekil 4.3. Geç Kretase yaşlı ayrıışmış dasitik tüflerden bir görünüm.....	43
Şekil 4.4. Geç Kretase yaşlı dasitik tuf ve dasit arasındaki sınır ilişkisi.....	43
Şekil 4.5. (a) Kolonsal ve (b) ışınsal yapıya sahip dasitlerden bir görünüm.....	44
Şekil 4.6. İşletmenin ve atık barajlarının inşa edilmiş olduğu vadinin yamaçlarında gözlenen yamaç molozundan bir görünüm.....	45
Şekil 4.7. Giresun ilinin depremselliği (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1996'dan derlenmiştir).....	46
Şekil 4.8. Farklı araştırmacıların çalışmalarından düzenlenmiş Türkiye'deki diri fayların konumlarını gösteren harita (Ulusay et al.,2004'ten düzenlenmiştir).....	47
Şekil 5.1. Saha çalışmalarına ilişkin dökümantasyon haritası (EN-SU, 2007'den düzenlenmiştir).....	49
Şekil 5.2. Açılan araştırma çukurlarından birinin ve baraj gövde malzemesinin görünümü.....	50
Şekil 5.3. Araştırma çukurundan kesici metal kalıp ile örselenmemiş örnek alımı.....	50
Şekil 5.4. Atıktan kesici metal kalıplarla örselenmemiş örnek alımı.....	51
Şekil 5.5. Alt kottaki atık barajından örselenmiş örnek alımı.....	51
Şekil 5.6. Alt kottaki atık barajındaki sızıntılarda debi ölçümü.....	52

Şekil 5.7. (a) Kolonsal eklemlili dasitlerde süreksizlik aralığı ölçümü, (b) Dasit kolonları için süreksizlik aralığı histogramı.....	53
Şekil 5.8. Dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan kırmataş yığınının fotoanaliz amacıyla çekilmiş bir görünüm.....	54
Şekil 6.1. Mevcut baraj gövde malzemesinin birim hacim ağırlık değerlerinin frekans dağılımı ve istatistiksel değerlendirmesi.....	56
Şekil 6.2. Gövde malzemesine ait örneklerin tane boyu dağılım eğrileri.....	57
Şekil 6.3. Baraj gövdesinde açılan AÇ2 no.lu araştırma çukurundan alınmış gövde malzemesine ait 2 no.lu örneğin 148.5 kPa'lık normal gerilme (σ_n) altında makaslama gerilmesi-birim deformasyon grafiği.....	59
Şekil 6.4. Gövde malzemesi örneklerine ait tüm makaslama deneyi setlerinin birleştirilmesiyle elde edilmiş doğrusal ve eğrisel yenilme zarfı.....	60
Şekil 6.5. Kırmataş dasitlerin uzun kenar/kısa kenar oranının toplam bağıl sıklığı.....	65
Şekil 6.6. Kırmataş yığınlarının uzun kenar-kısa kenar boyutlarının fotoanaliz yöntemiyle belirlenmesi.....	65
Şekil 6.7. Niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı (Sönmez and Ulusay, 2002) üzerinde kırmataş malzemesinin GSI değerinin belirlenmesi.....	67
Şekil 6.8. Dolgu malzemesi için barajın (a) 7 m ve (b) 10 m yükseltilmesi koşullarında için Hoek-Brown parametrelerinden elde edilmiş eşdeğer Mohr-Coulomb eğrisel yenilme zarfları.....	70
Şekil 6.9. (a) Atık malzemesinin tane boyu dağılımı eğrisi, (b) metal madeni cevher atıkları için tipik tane boyu dağılımı eğrileri (CANMET, 1977).....	72
Şekil 6.10. Atık örneklerinin plastisite abağındaki dağılımı.....	73
Şekil 6.11. Atık malzemesinden alınmış 1 no.lu örneğe ait 39.5 kPa'lık normal gerilme altında makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyon grafiği.....	74
Şekil 6.12. Atık malzemesinin yenilme zarfı.....	74
Şekil 7.1. Şev duraylılığı analizlerinde esas alınan kesitlerin doğrultuları (EN-SU, 2007'den düzenlenmiştir).....	76
Şekil 7.2. Analizlerde dikkate alınan atık barajının mevcut durumundan itibaren yükseltilmesi ve atık kotlarının değişimini gösteren şematik kesit ölçeksiz).....	76

Şekil 7.3. Baraj gövdesinden alınan (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 no.lu kesitler için SLIDE programı kullanılarak belirlenen yeraltısuyu tablası konumları.....	77
Şekil 7.4. Statik koşullar altında atık barajının mevcut durumu için kesit 3'e ait kritik dairesel yenilme yüzeyi ve güvenlik katsayısı konturları.....	79
Şekil 7.5. Statik koşullar altında barajın mevcut duruma göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 468.5 m, (b) 472.5 m, (c) 475.5 m, (d) 478 m kotlarına kadar yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel yenilme yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ve kritik güvenlik katsayısına karşılık gelen dairesel kayma yüzeyleri.....	82
Şekil 7.6. Statik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait şev açısı-güvenlik katsayısı ilişkileri.....	84
Şekil 7.7. Statik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına göre yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel kayma yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ile en küçük güvenlik katsayıları ve bunlara karşılık gelen kritik kayma yüzeyleri.....	85
Şekil 7.8. Statik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) yüksekliğinin mevcut konumuna göre 7 m arttırılması ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi durumunda, (c) yüksekliğinin mevcut konumuna göre 10 m arttırılması ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumunda kesit 3'e ait birleşik kayma türüne göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.....	86
Şekil 7.9. Statik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi durumunda, (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumunda kesit 3'e ait çok yüzeyli ötelenmeli kayma modeline göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayısı.....	88
Şekil 7.10. Fay kırığı uzunluğu ve deprem büyüklüğü (M_s) arasındaki ilişki (Aydan et al., 2002).....	90
Şekil 7.11. Dinamik koşulda, atık barajının mevcut durumu için kesit 3'e ait kritik dairesel yenilme yüzeyi ve güvenlik katsayısı konturları.....	92
Şekil 7.12. Dinamik koşullar altında barajın mevcut duruma göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 468.5 m, (b) 472.5 m, (c) 475.5 m, (d) 478 m kotlarına kadar yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel yenilme yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ve en küçük güvenlik katsayılarına karşılık gelen dairesel kayma yüzeyleri.....	92

Şekil 7.13.Dinamik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait şev açısı-güvenlik katsayısı ilişkileri.....	94
Şekil 7.14.Dinamik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m ve (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel kayma yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ile en küçük güvenlik katsayıları ve bunlara karşılık gelen kritik kayma yüzeyi.....	95
Şekil 7.15.Dinamik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna ve (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumlarında kesit 3'e ait birleşik kayma modeline göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.....	97
Şekil 7.16.Dinamik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna ve (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumlarında kesit 3'e ait çok yüzeyli ötelenmeli kayma türüne göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.....	98
Şekil 7.17.Atık barajının güncel durumu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.....	102
Şekil 7.18.Atık barajının 7m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi koşulu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.....	103
Şekil 7.19.Atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi koşulu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.....	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Atık barajı inşa yöntemlerinin karşılaştırılması (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).....	21
Çizelge 4.1. KAFZ'nun 5.4 no.lu segmenti ve yakın çevresinde gerçekleşmiş depremler (DAD, 2009).....	46
Çizelge 6.1. Baraj gövdesinden alınan örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri....	58
Çizelge 6.2. Kırmataş malzemesine ait örneklerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_d) deneylerinin sonuçları.....	61
Çizelge 6.3. Kırmataş dasit malzemesinin disk makaslama dayanım indeksi (BPI) deney sonuçları ve BPI'dan dolayı olarak belirlenmiş tek eksenli sıkışma dayanımları.....	62
Çizelge 6.4. Kırmataş dasit malzemesine ait Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü parametreleri.....	68
Çizelge 6.5. Atık malzemesinin fiziksel ve indeks özellikleri.....	73
Çizelge 7.1. Duraylılık analizlerinde kullanılan gövde ve atık malzemesine ait jeomekanik özellikler.....	78
Çizelge 7.2. Farklı üç şev duraysızlığı türü için atık barajı şevinin güncel durumu ile 7 m-10 m yükseltilmesi durumlarında farklı atık kotlarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.....	81
Çizelge 7.3. Statik koşulda dairesel kayma için atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda farklı atık kotları (478 ve 480.5 m) ve şev açılarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.....	81
Çizelge 7.4. Dinamik koşulda dairesel kayma için atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda farklı atık kotları (478 ve 480.5 m) ve şev açılarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.....	91
Çizelge 7.5. Sayısal analizlerin c - ϕ azalım ilişkisinden elde edilen 3 no.lu kesite ait güvenlik katsayısı değerleri.....	101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AÇ	Araştırma çukuru
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPI _c	Disk makaslama dayanım indeksi
c	Kohezyon
CANMET	Canada Centre for Mineral and Energy Technology
CPT	Konik Penetrasyon Deneyi
CSAMT	Yapay kaynaklı manyetotellürik yöntem
EPA	United States Environmental Protection Agency
DAD	T.C. Bayındırlık Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi
d _f	Örselenme faktörü
GC	Killi çakıl, killi-kumlu çakıl
G _s	Özgül ağırlık
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
ICME	International Council on Metals and the Environment
ICOLD	International Commission of Large Dams
I _d	Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi
ISRM	International Society for Rock Mechanics
IP	İndüklem polarizasyon
JICA	Japan International Cooperation Agency
J _v	Hacimsel eklem sayısı
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
LL	Likit limit
ML	İnorganik silt ve çok ince kumlar, kaya tozu, düşük plastisiteli siltli veya killi ince kumlar
M _D	Depremi süre büyüklüğü
m _i	Sağlam kaya sabiti
M _L	Yerel deprem büyüklüğü
M _s	Yüzey dalgası büyüklüğü
M _w	Moment büyüklüğü
MMAJ	Metal Mining Agency of Japan
PI	Plastisite indeksi

PGA	En büyük yatay yer ivmesi
PL	Plastik limit
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı
SL	Büzülme limiti
SP	Self potansiyel yöntemi
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
SR	Yapısal Özellik Puanı
UNEP	United Nations Environment Programme
w_n	Su içeriği
ϕ	İçsel sürtünme açısı
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı (kPa)

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Özellikle metal madeni işletmelerinin cevher hazırlama tesislerinde zenginleştirilen cevherden arta kalan ve ekonomik değeri olmayan malzemenin (atıkların) depolanması, çevre kirliliğinin önlenmesi açısından maden işletmeciliğinin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu amaçla işletmelerde atık barajları inşa edilmektedir. Atık barajlarında atık depolama sistemi, zenginleştirilen cevherden ayrılan atığın tesisten suyla baraja iletilerek depolanması, dolan barajın yükseltilmesi veya yükseltmenin uygun olmadığı durumda ise barajın değişik şekillerde çevreye geri kazandırılması esasına dayanmaktadır. Bu tür barajlar açısından en önemli hususlar; gerek kullanım süresi boyunca, gerekse kullanım sonrasında barajın duraylılığının korunması ve çevreyi kirlletici sızıntı ve kaçakların meydana gelmemesidir. Dünya'nın çeşitli bölgelerinde; borulanma, baraj yüksekliğinin hızlı bir şekilde artırılması, suyun baraj gövdesini aşması, barajdaki su seviyesinin kritik bir yüksekliğe ulaşması, dinamik yükler altında atık malzemesinde ve/veya baraj gövdesinde sıvılaşma, barajın temeli boyunca veya gövdenin kendi içinde yenilerek şev duraysızlığına uğraması gibi nedenlerle atık barajı duraysızlıklarının meydana geldiği bilinmektedir. Bu sorunların büyük çapta ekonomik ve çevresel zararlar ile can kayıplarına neden olması, atık barajlarında da jeoteknik açıdan yapılacak çalışmaların önemini arttırmaktadır.

Ülkemizde bazı maden işletmelerinde atık barajları bulunmakla birlikte, yapılan literatür araştırmasında bu atık barajlarının inşasında kullanılan malzemelerin ve barajlara akıtılan atıkların mühendislik özellikleri ile bu barajların duraylılığı konusunda jeoteknik amaçlı çalışmaların son derece sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, uluslararası literatürden; atık barajlarının tasarımı, inşası ve çevresel etkileri konularındaki araştırmaların yoğunlaştığı, buna karşın atık barajlarının jeoteknik karakteristikleri ve duraylılığı ile atığın statik ve dinamik koşullardaki davranışını kontrol eden faktörlerle ilgili çalışmaların göreceli olarak sınırlı sayıda olduğu görülmektedir.

Ülkemizde atık barajının bulunduğu maden işletmelerinden biri de Giresun'un Espiye ilçesi yakınlarındaki Demir Export A.Ş. tarafından işletilmekte olan Lahanos Yeraltı Bakır-Çinko İşletmesi'dir. Bu işletmede, biri atık malzemesi ile dolarak kullanımı tamamlanmış üst kottaki baraj ve diğeri ise yakında dolması beklenen alt kottaki baraj olmak üzere, iki adet atık barajı bulunmaktadır. Alt kottaki barajın tüm rezervin işlenmesi sonucu açığa çıkacak atığı depolamaya yetecek kadar hacminin olmadığı dikkate alınarak, işletmecisi kuruluş tarafından bu barajın yükseltilerek ek hacim sağlanması planlanmıştır. Dolayısıyla, bu barajın yükseltilmesi halinde duraylı kalabilmesi ve mevcut koşullar altında değişik yükseltme tekniklerinden hangisinin daha uygun olacağı gibi hususlar önem kazanmaktadır. Ayrıca, baraj topuğunun bir miktar ötesinden bir derenin akıyor olması, barajın duraylılığını ve geçirimsizliğini daha da önemli kılmaktadır. Söz konusu alt kottaki bu barajın mevcut durumu ve işletme açısından taşıdığı önem dikkate alınarak, barajın yükseltilmesiyle duraylılığın nasıl etkileneceği, baraj inşasında kullanılacak jeolojik malzemenin mekanik özelliklerinin bu işlem üzerindeki etkilerinin ve deprem kaynaklı dinamik yükler altında barajın duraylılığının nasıl etkileneceğinin araştırılması, bu yüksek lisans tezinin konusu olarak seçilmiştir.

Bu çalışma kapsamında başlıca; (i) Lahanos Yeraltı Bakır-Çinko İşletmesi'nde alt kottaki atık barajının duraylılığını etkileyebilecek jeolojik ve jeoteknik faktörlerin araştırılması, (ii) mevcut baraj gövdesini oluşturan malzeme ile barajın yükseltilmesinde kullanılacak malzemenin ve barajı dolduran atığın jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi, (iii) atık barajının mevcut ve yükseltilmiş haliyle değişik koşullar (statik ve dinamik) altında, çeşitli duraysızlık modellerine göre farklı analiz yöntemleri kullanılarak duraylılığının araştırılması, (iv) elde edilecek sonuçların barajın yükseltilmesi sonucunda baraj duraylılığı açısından değerlendirilmesi aşamalarından oluşan bir araştırmanın gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Yukarıda belirtilen hedeflere ulaşılması amacıyla izlenen yol ve yararlanılan yöntemler aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

- (a) Lahanos atık barajı ve civarında inceleme yapılarak, ayrıca baraj planından da yararlanılarak duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere kesitler hazırlanmıştır.
- (b) Barajın yükseltilmesi sırasında kullanılacak olan dasit bloklarına ait yığınların değişik kesimlerde görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler, yığınların dayanım parametrelerinin görgül bir yenilme ölçütüyle belirlenmesi amacıyla fotoanaliz yöntemiyle değerlendirilmiştir.
- (c) Alınan örnekler üzerinde gövdeye ait malzemenin, yükseltme sırasında kullanılacak malzeme ile atık malzemesinin bu çalışma için gerekli olan indeks ve mühendislik özellikleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Barajın yükseltilmesinde kullanılacak kırmataş dasit bloklarının makaslama dayanımı ise, görgül bir yenilme ölçütü esas alınarak tayin edilmiştir.
- (d) Jeomekanik laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere, mevcut atık barajı gövdesinin değişik kesimlerinde açılan örnekleme çukurlarında baraj gövdesine ait malzemeden, barajı dolduran atıktan ve barajın yükseltilmesi sırasında kullanılacak olan çevredeki dasit bloklarından örselenmemiş ve örselenmiş örnekler alınmıştır.
- (e) Baraj gövdesinde birkaç noktada gözlenen su sızıntı yerleri belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmalardan elde edilen veriler esas alınarak, atık barajının yüksekliğinin arttırılması halinde; barajın duraylılığı değişik yöntemlerle (limit denge analizi ve sayısal model çözümleme'si) farklı koşullar (farklı baraj yükseklikleri, deprem kaynaklı olabilecek dinamik yükler ve atığın gövdeye yapacağı etki vb.) dikkate alınarak analiz edilmiş olup, bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

1.2. Önceki Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırmasında atık barajlarının duraylılığı ile ilgili herhangi bir ulusal yayının (makale, bildiri, rapor veya tez)

bulunmadığı saptanmıştır. Ulaşılabilen bildiri, rapor ve kılavuz türündeki uluslararası yayınların büyük bir kısmının ise; atık barajlarının tanımı, tipleri, inşa yöntemleri, duraysızlık türleri, bunların nedenleri, çevresel etkileri ve risk denetimleri ile ilgili olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, inceleme alanı ve civarında yapılan çalışmalarda bölgenin genel jeolojisi, maden aramaları ve rezerv miktarının belirlenmesi konularını içeren bazı raporlara ulaşılmıştır.

Bu bölümde; atık barajlarının davranışlarının jeoteknik açıdan incelemesi, atık malzemesinin mühendislik özellikleri, duraysızlık vakaları ve bu duraysızlıkların çevresel etkilerini içeren çalışmalar ile Lahanos açık işletmesi ve çevresinin jeolojisi ile maden potansiyelini konu alan çalışmalar derlenerek ayrı başlıklar altında aşağıda sunulmuştur.

1.2.1. Atık barajları ile ilgili uluslararası literatürde yer alan çalışmalar

Atık barajlarıyla ilgili uluslararası kaynakların bir kısmı; bunların güvenliği (Bruce et al., 1997; Alberta Environmental Protection, 1999; Sweedish Mining Association, 2001; DSC, 2005; Witt et al., 2005), tasarımı (CANMET, 1977; EPA, 1994; ICME and UNEP, 1998) ile geliştirilmesi ve denetimi (Department of Minerals and Energy Western Australia, 1998; ICOLD, 2001; Golder Associates, 2001; Robertson Geoconsultants Inc., 2005) ve risk (Robertson and Shaw, 2003) gibi konularda izlenmesi gereken yöntemleri ve dikkate alınması gereken hususları içeren kılavuz niteliğindeki raporlardan oluşmaktadır. Tezin diğer bölümlerinde görüleceği gibi, bu kaynaklardan çalışma sırasında yararlanılmış olmakla birlikte, bunların daha çok birer kılavuz niteliğinde olmaları nedeniyle, söz konusu raporların ayrıntılarına burada değinilmemiştir. Atık barajlarında duraylılık, yer seçimi ve jeoteknik faktörleri konu alan ve ulaşılan uluslararası literatürde yayımlanmış araştırmalar aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

Highter and Vallee (1980), statik gerilmeler altında atık malzemesinin gösterdiği sıvılaşma davranışını incelemek amacıyla, çeşitli atık tipleri üzerinde gerilme kontrollü konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, deneyler sonucunda atıkların indeks özelliklerinin hemen hemen aynı olmasına rağmen kararlı durum eğrilerinin farklılık gösterdiğini saptamışlardır.

Ayrıca, atıkların güncel konsolidasyon gerilmesine karşı boşluk oranı eğrisinin, kararlı durum eğrisinin üzerinde kaldığı koşulda sıvılaşabileceğini belirtmişlerdir. Highte and Vallee (1980), atıkların sıvılaşma potansiyelinin daha iyi değerlendirilebilmesinin değişik örnek hazırlama teknikleri kullanılarak, atığın deformasyon hızı ve konsolidasyon özelliklerindeki yönselliğin (anizotropinin) dikkate alınmasıyla olanaklı olacağını belirtmişlerdir.

Tawil (1997), demir cevheri atıklarının mühendislik özelliklerini atık barajının duraylılığı açısından incelemiştir. Araştırmacı bu çalışma kapsamında indeks-jeomekanik laboratuvar (elek analizi, doğrudan makaslama dayanımı, konsolidasyon, üç eksenli sıkışma) ve arazi (CPT, kanatlı kesici) deneyleri gerçekleştirmiştir. Tawil (1997), bu deneyler sonucunda demir cevheri atığının fiziksel ve indeks özelliklerini, drenajsız dayanım-deformasyon ve konsolidasyon parametrelerini belirlemiş ve bu parametreleri atık barajı duraylılığı açısından değerlendirmiştir.

ICME and UNEP (1998), maden endüstrisinin, atıklar ve atık depolama ile ilgili riskleri nasıl denetlediğini daha iyi anlamak amacıyla 21 vakayı değerlendirmişlerdir. Belirli maden işletmelerindeki atık barajları için yer seçimi, çevresel denetim, acil durum planı ve izleme çalışmalarının nasıl yürütüldüğü gibi hususlar bu vakalarda incelenmiştir. Araştırmacılar ayrıca, Bergama (İzmir)'daki Ovacık altın madenine ait, siyanürlü atıkların depolandığı atık barajında kullanılan kombine güvenlik sisteminin dünyada ilk sistem ve yeraltısu kirlenme riskinin çok düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Manzano et al. (1999), 1998 yılında Aznalcóllar (İspanya) madenindeki atık barajının yenilmesi sonucu yeraltısuyunda meydana gelen kirliliği incelemiştir. Araştırmacılar; duraysızlıktan önce bölgedeki yeraltısuyunun ağırlıklı içeriği kalsiyum-karbonat iken, duraysızlıktan sonra içeriğin sodyum-klorit olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmada, üç ana akifer bölgesinden derlenen 47 adet su örneğinin analizi sonucunda üç örneğin yüksek, dokuz örneğin çok yüksek derecede kirlendiği, diğerlerinin ise etkilenmediği saptanmıştır. Manzano et al. (1999), kirlendiği belirlenen örneklerin baraj yenildikten sonra atığın yayıldığı çevredeki akiferden (Guadiamar akiferi) alındığını belirtmektedirler. Araştırmacılar,

Guadiamar akiferindeki kirlenmiş yeraltısuyunun gelecekte çevre akiferleri de etkilememesi için ayrıntılı hidrojeolojik değerlendirme ve yeraltısuyu kalitesi izleme çalışmalarının yapılmasını önermişlerdir.

Aznalcóllar (İspanya) madenindeki atık barajında 1998'de meydana gelen duraysızlığının nedenleri, çevresel etkileri ve duraysızlıktan sonra barajın kapatılma süreci Eriksson and Adamek (2000) tarafından değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, baraj ve atık malzemesi ağırlığının baraj zeminindeki marnlar tarafından taşınamaması nedeniyle gerçekleşen duraysızlık sonucunda 5.5 milyon m³ metal ve asit içeren atığın çevreye yayıldığını belirtmektedirler. 2600 hektarı tamamen atıkla kaplanan toplam 4634 hektarlık alanın duraysızlıktan etkilendiği saptanmıştır. Erikson and Adamek (2000), çevreye yayılan atığın, 450 kamyon, 26 maden kamyonu ve 250'den fazla ekskavatörün birlikte çalışmasıyla altı ay süren çalışma sonucunda ancak temizlendiğini ifade etmişlerdir.

Dillon et al. (2004), Lisheen (İrlanda) Yeraltı Kurşun-Çinko İşletmesi'ndeki atık barajının tasarım ve inşaat aşamalarında yapılan çalışmalar ve kullanılan yöntemleri sunmuşlardır. Araştırmacılar, barajın tasarım aşamasında öncelikle arazi çalışmaları kapsamında yapılan sondajlar ve SPT-CPT deneyleri sonucunda inceleme alanındaki jeolojik birimlerin profili ortaya konmuş, daha sonra gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile bu jeolojik birimlerin mühendislik özelliklerinin tayin edildiğini belirtmişlerdir. Dillon et al. (2004), statik ve psödo-statik koşullar altında atık barajının duraylılığını, baraj gövdesine yerleştirilmiş piyezometre okumaları sonucu belirlenmiş yeraltısuyu seviyesi koşullarını ve jeolojik birimlerin mühendislik özelliklerini dikkate alarak belirlemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, atık barajı gövdesinde yapılan hareket izleme çalışmaları ve mikro gravite ölçümlerine de değinmişlerdir. Dillon et al. (2004), baraj yerinde yapılan çalışmaların sonucunda barajın duraylılığı açısından herhangi bir sorun olmadığını ifade etmişlerdir.

Hancock and Willgoose (2004), toprak dolgu türünde inşa edilmiş atık barajlarının gövdelerinde meydana gelebilecek aşınmanın sayısal ortamda benzetimini (simülasyonunu) yapmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, aşınmayı incelemek amacıyla aşınmanın benzetiminde dikkate aldıkları koşulların aynısını kullanarak laboratuvar

ortamında model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Hancock and Willgoose (2004), laboratuvar deneyleri ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişler ve sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Bunlara ek olarak araştırmacılar, atık barajı gövdesindeki yoğun yüzey akışlarının barajın duraylılığını önemli ölçüde etkilediğini de vurgulamışlardır.

Bjelkevik (2005), İsveç'te meydana gelmiş 60 atık barajı duraysızlığı vakasını; barajın yenilme nedeni, baraj tipi ve baraj yüksekliğine göre değerlendirmiştir. Araştırmacı, duraysızlıkların en sık yüksekliği 10-19 m arasında değişen aşamalı klasik dolgu (staged conventional embankment) barajlarda, baraj gövdesindeki yapısal bozukluklar ve içsel erozyon nedeniyle gerçekleştiğini belirtmiştir.

Bjelkevik and Knutsson (2005), atık malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, İsveç'te 7 farklı atık barajından atık örnekleri derlemişlerdir. Araştırmacılar, bu örneklerin tane boyu dağılımlarını, yoğunluklarını, su içeriklerini, boşluk oranlarını, sıkışabilirliklerini ve hidrolik iletkenliklerini gerçekleştirdikleri laboratuvar deneyleriyle belirlemişlerdir. Bjelkevik and Knutsson (2005), atık malzemesinin genellikle silt ya da siltli kum tane boyunda malzemedan oluştuğunu, boşluk oranlarının 0.56 ile 0.67 ve sıkışabilirlik oranlarının %71-96 arasında değişim gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Romero (2005), Mike Horse (ABD) atık barajının mevcut durumunun değerlendirilmesi amacıyla Montana Eyalet Üniversitesi'nin desteğinde baraj gövdesinde CPT deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, 1983-2004 yılları arasında Mike Horse atık barajı gövdesinde yapılan piyezometre okumalarını değerlendirmiş ve baraj gövdesindeki sızıntıları sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiştir. Ayrıca Romero (2005), atık barajının duraylılığını ve baraj gövdesinin sıvılaşma potansiyelini inceleme amacıyla, 500-2500 yıllık deprem tekrarlanma aralığını dikkate alarak, dinamik analizler yapmış ve bu analizler sonucunda barajda sıvılaşma olabileceğini saptamıştır. Araştırmacı, gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda baraj gövdesinde boşluklar bulunduğunu ve ani yeraltısuyu seviyesi değişimleri olduğunu belirlemiştir. Romero (2005), bu durumun baraj gövdesinin içsel aşınmasından ya da borulanmadan

kaynaklanabileceğini ifade etmiş ve atık barajının kullanımının durdurulması gerektiğini önermiştir.

Sjödahl et al. (2005), atık barajı gövdesindeki sızıntı anomalilerinin baraj gövdesinin iç kısmının aşınmasına neden olduğunu ve bu durumun da barajın duraylılığını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, Enomossen (İsviçre) atık barajının gövdesinde herhangi bir sızıntı anomalisi olup olmadığını araştırmak amacıyla rezistivite ölçümleri yapmışlar ve bu ölçümlerin sonuçlarına göre, Enomossen atık barajının gövdesinde bazı yerlerde sızıntı anomalileri olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, bu anomalilerin güncel olarak tehlike yaratmadığını, ancak anomalilerin düzenli aralıklarla rezistivite ölçümleri yapılarak izlenmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Mainali (2006), atık barajlarında anormal sızıntıların saptanması ve barajın fiziksel durumunun izlenmesi amacıyla rezistivite ve self-potansiyel (SP) yöntemlerini kullanarak İsviçre'deki Kiruna, Aitik ve Kristineberg atık barajlarının akış potansiyeli, inhomojenlik ve elektriksel özelliklerini belirlemiştir. Araştırmacı ayrıca, laboratuvar deneyleri yaparak farklı tane boyu ve su içeriğine sahip örneklerin elektriksel direncinin nasıl değiştiğini saptamıştır. Mainali (2006) ayrıca, Kristineberg barajının iki yıllık ölçümler boyunca aynı rezistivite ve self-potansiyel özelliklerini gösterdiğini, Kiruna barajının topuğunda belirlenen SP değerinin tepe kısmındakine göre daha yüksek olduğunu, Aitik barajında gözlenen SP anomalilerinin ise gövdedeki sızıntıdan kaynaklandığını belirtmiştir.

Liu et al. (2007), 113.5 m yüksekliğinde akış yukarı yükselen basamaklı tipteki Baizhishan (Çin) atık barajından aldıkları örnekler üzerinde statik ve dinamik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, herhangi bir deprem meydana gelmesi durumunda bu atık barajında sismik tepki sonucu gelişebilecek etkin gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemiyle belirlemişlerdir. Liu et al. (2007), deprem kaynaklı dinamik yükler altında yüksek ve akış yukarı yükselen basamaklı tipteki atık barajlarında meydana gelen duraysızlıkların ana nedeninin sıvılaşma olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, bu tip atık barajlarında sismik duraylılığının ve sıvılaşmaya karşı direncin artırılması gerektiğini önermişlerdir.

Rico et al. (2008a), atık barajı duraysızlıklarının nedenlerini belirlemek amacıyla bilimsel makale, teknik rapor ve gazetelerden derledikleri duraysızlık verilerini istatistiksel olarak değerlendirmişlerdir. Buna göre; dünya genelinde atık barajı duraysızlıklarının en fazla görüldüğü bölge Amerika Birleşik Devletleri (%43) iken, ikinci sırayı Avrupa (%14) almaktadır. Araştırmacılar, Avrupa'da duraysızlığa uğramış atık barajı yüksekliklerinin 45 m'den daha az olduğunu ve genellikle 20-30 m arasında değiştiğini saptamışlardır. Duraysızlık nedenlerinin önem sırasına göre; aşırı yağışlar, sivilaşma, maden işletme faaliyetleri, sızıntı ve temel problemleri olduğunu belirtmişlerdir. Rico et al. (2008) ayrıca, duraysızlığa uğrayan barajların %66 gibi büyük bir kısmının, akış yukarı yükselen set tipi barajlarda gerçekleştiğini ifade etmektedirler.

Rico et al. (2008b), duraysızlık verilerini regresyon analizlerine tabi tutarak atık barajlarının geometrik parametreleri (baraj yüksekliği, atık hacmi vb.) ile duraysızlık sonucu meydana gelen taşkınların hidrolik karakteristikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Araştırmacılar; atık taşkının hacmi, akış mesafesi ve doruk akış boşalımının kestirimi için atık barajlarının fiziksel özellikleri ve atık taşkın karakteristiği arasında istatistiksel analizler yaparak çeşitli görgül eşitlikler elde etmişlerdir.

Zandarín et al. (2009), jeoteknik özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla Küba'da bulunan nikel endüstrisine bağlı bir atık barajını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir. Bu araştırmacılar; atığın hidrolik özelliklerindeki değişimler, atık üzerinde oluşan su birikimlerinin varlığı, atığın kendi yükü altında konsolide olması, atığın baraja boşalımı sırasında sürekli su getirmesi, yağmur sularının derine süzülmesi ve buharlaşmanın etkilerini dikkate alan bir model geliştirmişlerdir. Bu modelle inşaa aşamasından başlamak üzere, söz konusu atık barajının 16 yıllık geçmişinin benzetimini (simülasyonunu) yapmışlardır. Baraj çevresindeki uygun drenaj koşullarının ve yüksek geçirgenlik-alçak yeraltısuyu seviyesinden kaynaklanan yüksek etkin gerilmelerin, atık malzemesinin gözenekliliğinin barajın çevresinde merkeze göre daha hızlı bir düşüş göstermesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, yeraltısuyu seviyesinin üzerinde kapiler suyun varlığına ve atığın düşük hidrolik iletkenliğine bağlı olarak, ani yağmur fırtınalarından sonra yeraltısuyu tablasının hızla yükseldiğini, ancak eski

konumuna ulaşmasının neredeyse 10 günü bulunduğunu saptamışlardır. Modelde ani yağmur fırtınalarından sonra atık barajının güvenlik katsayısının 2.5'dan 1.1'e düştüğü görülmektedir. Zandarín et al. (2009), atık barajlarındaki kapiler su ve doymun olmayan bölgede depolanan atık miktarlarının düzenli olarak izlenmesi gerektiğini önermişlerdir.

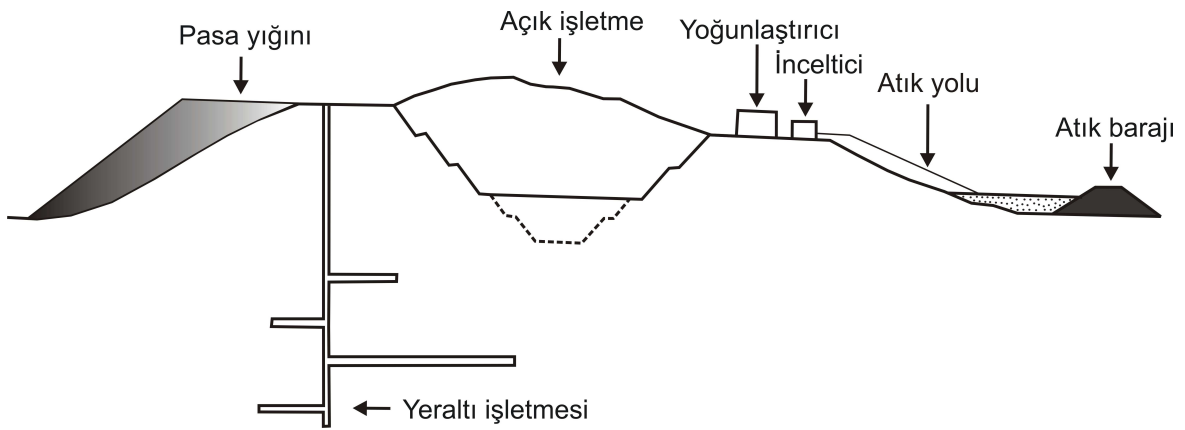
1.2.2. Lahanos işletmesi ve yakın civarında yapılmış çalışmalar

Ulusay (2006), Lahanos madeni alt kottaki atık barajının yükseltmesi işleminin uygulanabilirlik ve planlama aşamalarına yön verecek gözlemler yapmış ve önerilerde bulunmuştur. Araştırmacı, yükseltme işleminden önce baraj gövdesindeki sızıntıların giderilmesi gerektiğini ve yükseltme işleminin akış aşağı yükselen set yöntemi ile yapılmasının uygun olduğunu ifade etmiş, ayrıca eklenecek olan dolgunun akış yukarı kısmının sızdırmazlık özelliğine sahip jeotekstil ile kaplanmasını önermiştir.

JICA and MMAJ (1998), Espiye (Giresun)'de yeni maden yataklarının bulunması amacıyla, önceki çalışmalardan elde edilen verileri de değerlendirerek, bölgede jeolojik ve jeofizik incelemeler (gravite, IP ve CSAMT) yapmışlardır. Bu kuruluşlar, çalışma alanında sırasıyla yaşlıdan gence doğru, Çatak formasyonu (andezitik volkanikler), Kızılkaya formasyonu (dasitik lav, dasitik piroklastik) ve Çağlayan formasyonu (dasitik-riyolitik volkanikler, plütonik kayalar)'nın bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, masif sülfür yataklarının Çağlayan formasyonunun tüfleri tarafından örtülmüş olan Kızılkaya formasyonunun üst serilerinde yer aldığını belirtmişlerdir. İncelemeler sonucunda Lahanos madeni Kızılkaya yatağında 300.000 ton ve Killik yatağında 90.000 tonluk cevher varlığı saptanmıştır.

2. ATIK BARAJLARI VE İLGİLİ MÜHENDİSLİK SORUNLARI

Maden işletmelerinde üretilen ham cevherin eleme, kırma, öğütme, flotasyon ve inceltme işlemlerinden geçirildikten sonra içinden bakır, kurşun, çinko, gümüş, altın, uranyum vb. gibi ekonomik değere sahip olan kısmın ayrılması sonucu geriye kalan malzeme atık olarak adlandırılmaktadır. Atığın kimyasal bileşimi, cevherin ve cevher ayırmada kullanılan kimyasalların bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Maden atıkları; arsenik, barit, kalsit, florit, civa, radyoaktif maddeler, siyanür ve sülfürik asit gibi element, mineral ve bileşikler bünyesinde barındırmaktadır. Örneğin, altın madeni atığı arsenik ve siyanürden oluşurken; bakır-çinko maden atığı ise pirit, galenit ve sülfürik asit içermektedir. Söz konusu element, mineral ve bileşiklerin kimyaları gereği su, hava ve toprak kirlilikleri meydana getirmeleri nedeniyle güvenli bir şekilde depolanmaları maden işletmelerinin en önemli önceliklerinden biridir. Atıkların depolanması amacıyla inşa edilen barajlara atık barajı adı verilmektedir. Atık malzemesi doğal topoğrafik eğim boyunca akıtılarak ya da borular yardımıyla baraja iletilerek atık barajlarında depolanmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Maden atıklarının depolanma sistemi (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).

Bu bölümde; atık barajı türleri, inşa yöntemleri, atık barajlarında meydana gelen duraysızlık türleri ve bunların başlıca nedenleri hakkında genel bilgi verilmiş ve dünyada meydana gelmiş atık barajı duraysızlıkları ana hatlarıyla değerlendirilmiştir.

2.1. Atık Barajı Türleri

Atık barajları; doğal topoğrafya, barajın inşa edileceği alanın özellikleri ve ekonomik koşullar dikkate alınarak, vadi (valley), halka-dayk (ring-dike), çukur (in-pit) ve özel açılmış çukur (specially dug pit) olmak üzere 4 ana türde inşa edilebilmektedirler.

2.1.1. Vadi tipi atık barajları

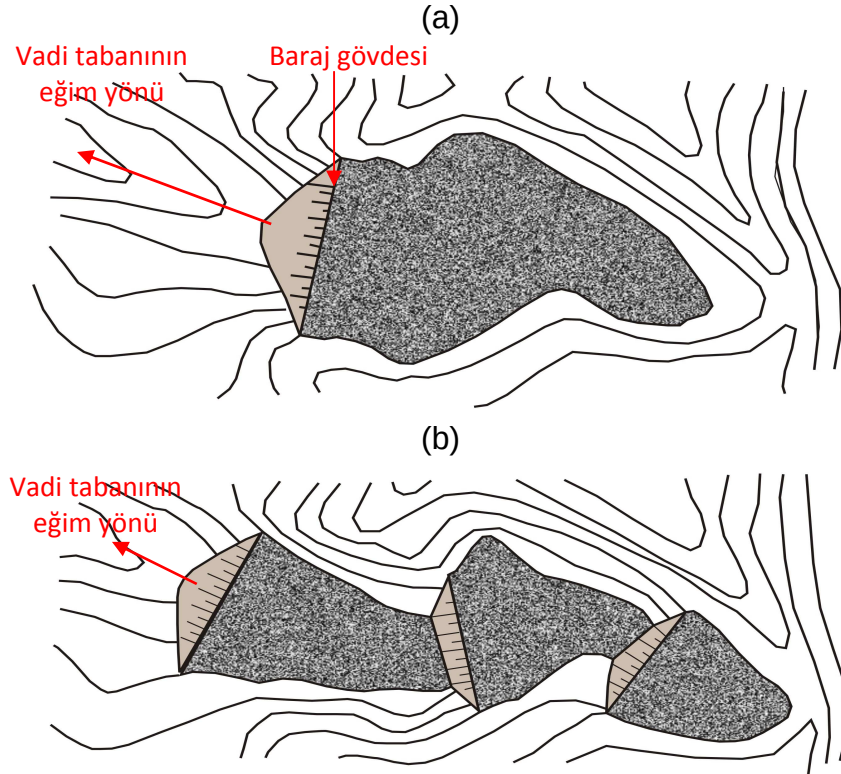
Vadi tipi atık barajları, doğal set görevi görebilecek geçirimsiz vadi yamaçlarının ortasında kalan bölgenin bir rezervuar olarak kullanılabilmesi amacıyla çevresine set, ya da setler inşa edilerek atığın vadi içinde depolanması esasına dayanmaktadır. Bu barajlar, seçilen vadinin topoğrafik özelliklerine göre baraj gövdesi vadi tabanının eğim yönüne dik, paralel ve hem dik hem paralel konumda olacak şekilde üç farklı tipte tasarlanmaktadır. Ayrıca, vadi tipi atık barajları gereksinim duyulan rezervuarın büyüklüğüne göre bir ya da daha fazla basamaklı olacak şekilde inşa edilebilmektedir.

Baraj gövdesi vadi tabanının eğim yönüne dik konumda olan vadi tipi atık barajları, neredeyse tüm vadi topoğrafyalarına uygulanabilen barajlardır (Şekil 2.2). Bu tipteki atık barajları şekli itibarıyla, inşaat aşamasında daha az miktarda dolgu malzemesi gerektirdiği için diğer barajlara göre ekonomik olup, klasik su depolama barajlarına benzerlik gösterirler (EPA, 1994). Highland (Kanada) bakır madenine ait atık barajı bu atık barajı türünün bir örneğidir (Şekil 2.3).

Baraj gövdesi vadi tabanının eğim yönüne paralel konumda olan vadi tipi atık barajları, vadideki drenaj havzasının çok geniş olması durumunda, optimum 9^0 ve daha düşük eğime sahip yamaçlara inşa edilen barajlardır (Şekil 2.4) (EPA, 1994). Şekil 2.5'te bu atık baraj türünün bir örneği olan Stava (İtalya) atık barajı görülmektedir.

Yamaç eğimlerinin yüksek ve vadi drenaj havzasının çok geniş olduğu topoğrafyalarda ise, yukarıda değinilen iki baraj tipinin kombinasyonu ile

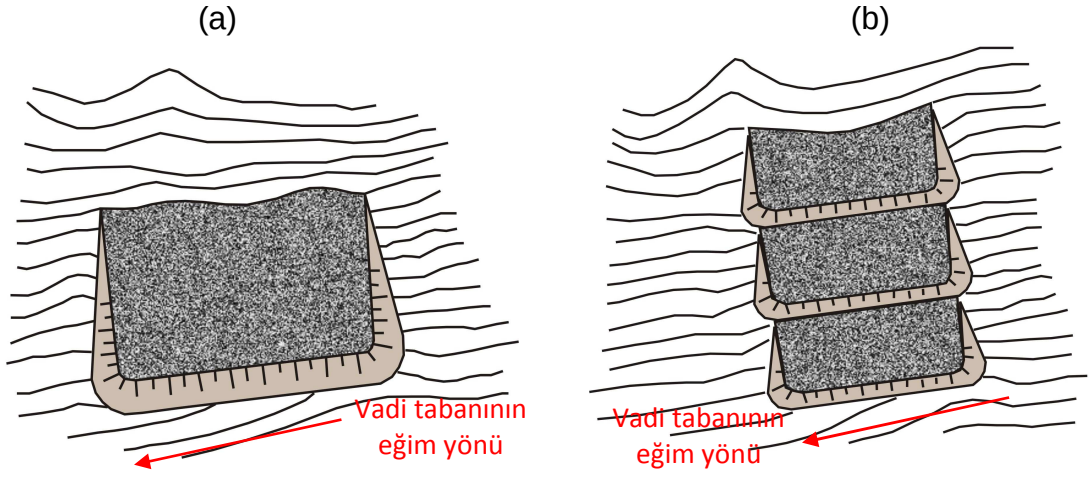
geliştirilmiş ve baraj gövdesi vadi tabanının eğim yönüne hem paralel hem de dik konumda olan atık barajı tasarımı kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



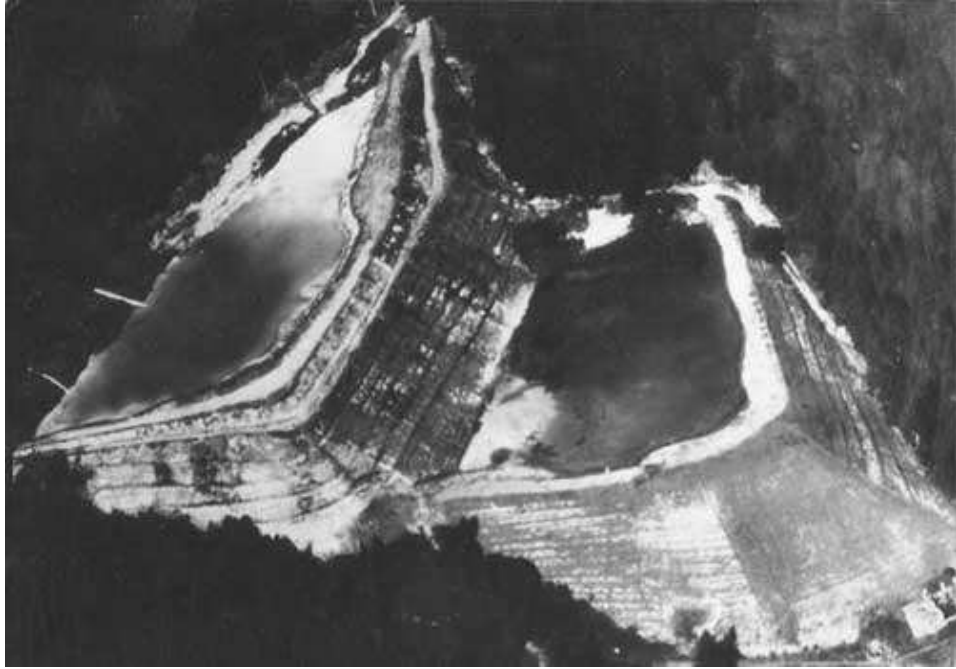
Şekil 2.2. Vadi tabanının eğim yönüne dik konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).



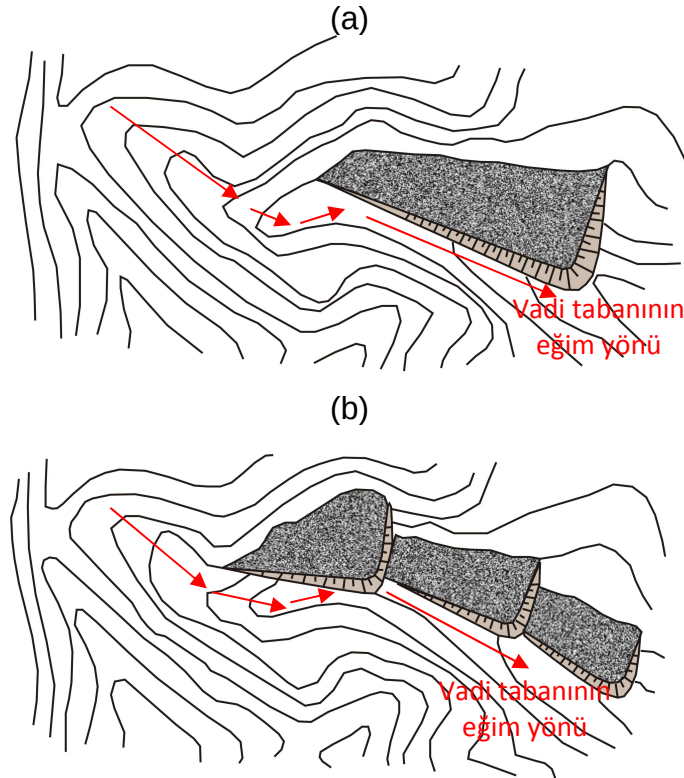
Şekil 2.3. Highland (Kanada) bakır madenine ait vadi tipi atık barajı (www.tailings.info, 2009).



Şekil 2.4. Vadi tabanının eğim yönüne paralel konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).



Şekil 2.5. Vadi tabanının eğim yönüne paralel konumlu iki basamaklı vadi tipinde inşa edilmiş Stava (İtalya) atık barajının hava fotoğrafından görünümü (www.tailings.info, 2009).



Şekil 2.6. Vadi tabanının eğim yönüne hem paralel hem de dik konumlu (a) tek ve (b) üç basamaklı vadi tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).

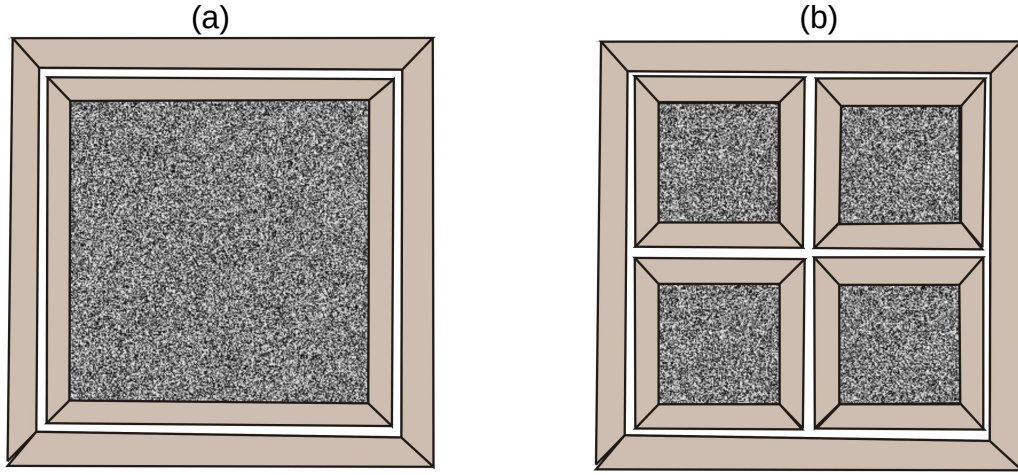
2.1.2. Halka-dayk tipi atık barajları

Halka-dayk tipi atık barajları, vadilerin olmadığı yerlerde, atığı tamamen çevreleyecek şekilde daykların inşa edilmesiyle oluşturulan barajlardır. Baraj gövdesinde kullanılacak dolgu malzemesi miktarı daykların uzunluğuna bağlı olarak artmaktadır. Bu tür barajlar, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, tek veya segmentli şekilde tasarlanabilmektedirler. Segmentli olarak inşa edilmiş Clemows (İngiltere) atık barajı halka dayk tipi atık barajlarına tipik bir örnektir (Şekil 2.8).

2.1.3. Çukur tipi atık barajı (In-pit impoundment)

İşletme faaliyetinin tamamlandığı açık maden ocakları atık depolama amacıyla kullanıldığında çukur tipi atık barajı olarak adlandırılmakta olup, yukarıda değinilen atık barajı tiplerine göre daha az kullanılan bir atık barajı türüdür (Şekil 2.9). Atık malzemesinin maden ocağı çukurunun geçirimsiz şevleri tarafından korunması

nedeniyle borulanma ve erozyon nedeniyle meydana gelen duraysızlıklar bu tip barajlarda gözlenmemektedir (EPA, 1994).



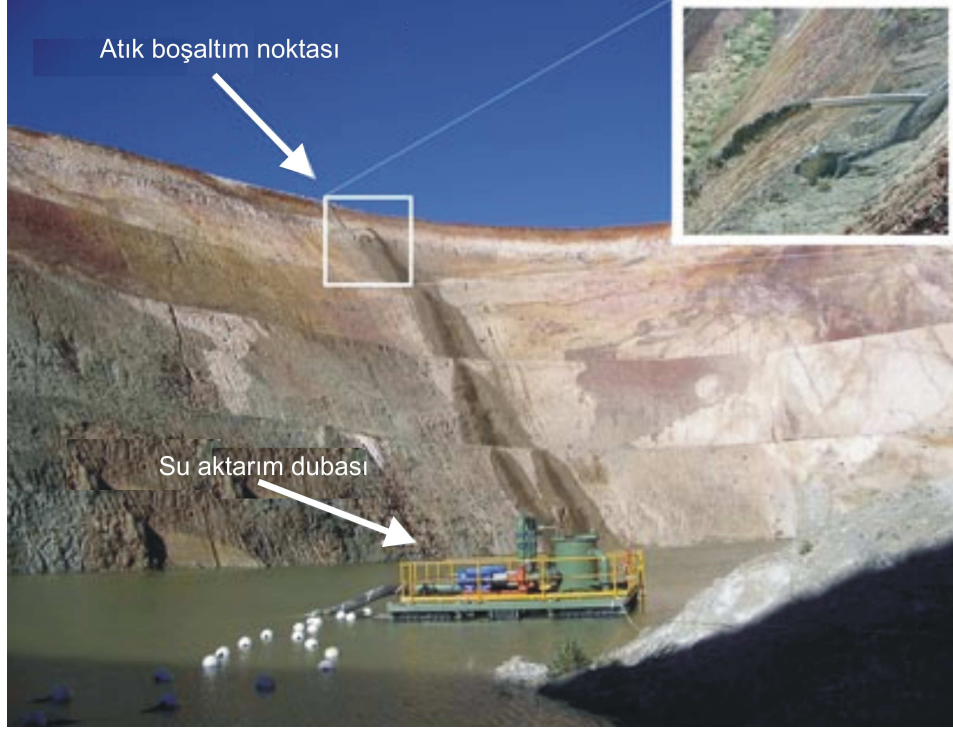
Şekil 2.7. (a) Tek ve (b) segmentli halka-dayk tipi atık barajı (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).



Şekil 2.8. Clemows (İngiltere) atık barajı (parçalara ayrılmış akış yukarı basamaklı halka-dayk tipi) (www.cantabkent.co.uk, 2008).

2.1.4. Özel açılmış çukur tipi atık barajı (Specialy in-pit impoundment)

Özellikle atık depolama amaçlı kazılan çukurlar özel açılmış çukur tipi atık barajıdır (EPA,1994) ve kazılan çukurdan çıkarılan malzemenin baraj inşaatında kullanılabilmesi nedeniyle halka-dayk tipi atık barajına göre daha ekonomik bir atık barajı türüdür.

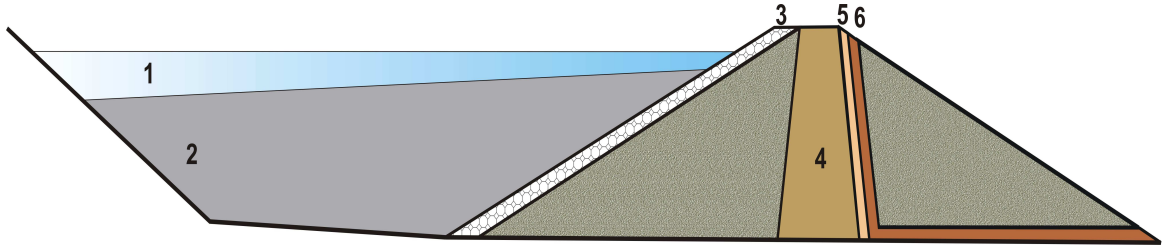


Şekil 2.9. Çukur tipi atık barajı (www.tailings.info, 2009).

2.2. Atık Barajı İnşa Yöntemleri

Atık barajları; atık malzemesinin mühendislik özelliklerine, barajın inşasında kullanılacak yapı malzemesinin türüne, barajın inşa edileceği alanın topoğrafik, jeolojik, hidrojeolojik ve sismik özelliklerine ve ekonomik koşullara bağlı olarak tutma (retention) ve yükselen set (rising embankment) yöntemleri ile inşa edilebilmektedirler. Baraj gövdesinin inşasında dolgu malzemesi olarak yakın çevredeki toprak zeminler ve kaya türleri kullanıldığı gibi, atık malzemesi de tercih edilmektedir.

Atık tutma barajları (Şekil 2.10), yüzeysuyu ve yeraltısuyu denetimi, dolgu malzemesi özellikleri ve duraylılık açısından su tutma amaçlı barajlar ile benzerlik göstermektedirler (EPA,1994). Yükselen set tipi barajlar atık depolanmasıyla rezervuar doldukça yükseltilirken, atık tutma barajları belirli bir yükseklikte inşa edilip, yükseltilmezler. Atık tutma barajları her atık tipi ve depolama şekli için kullanıma uygundur.



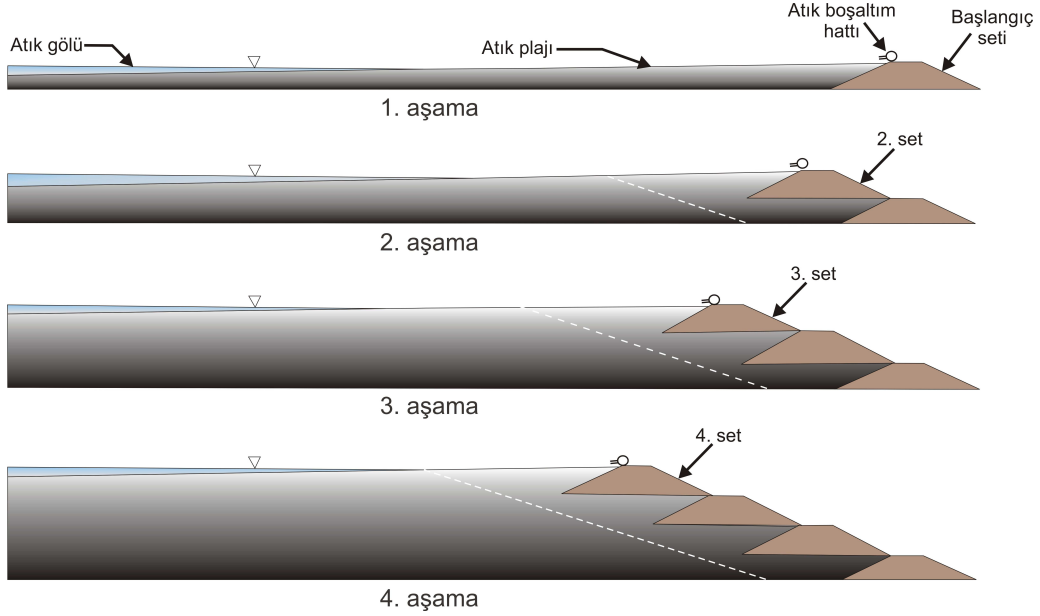
Şekil 2.10. Tutma tipi atık barajı (1. Atık su, 2. Çökelmiş maden atığı, 3. Riprap, 4. Geçirimsiz çekirdek, 5. Filtre, 6. Drenaj zonu) (Vick, 1990; EPA,1994'ten düzenlenmiştir).

Yükselen set tipi atık barajlarının inşası, bir başlangıç seti ile başlar ve depolanan atık miktarının artması nedeniyle rezervuarın dolması sonucu, rezervuara ek hacim kazandırmak amacıyla başlangıç seti üzerine akış aşağı, akış yukarı ve merkezden yukarı doğru olmak üzere üç farklı şekilde yeni setler eklenerek devam eder.

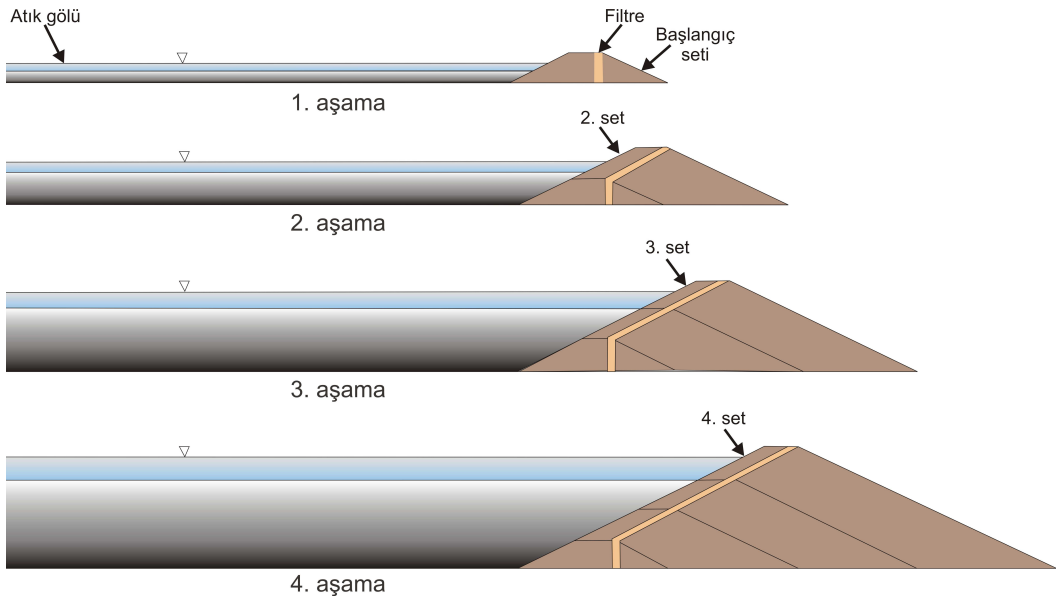
Akış yukarı yükselen set yöntemiyle atık barajının inşasına borulanmaya karşı dayanıklı bir başlangıç setinin yapılmasıyla başlanmaktadır. Atık malzemesinin başlangıç seti kretinden itibaren rezervuara boşaltılarak rezervuarda bir atık plajı oluşturulup, daha sonra bu plaja 2. baraj gövde seti inşa edilir (Şekil 2.11). Gereksinim duyulan rezervuar hacmi elde edilene kadar baraj gövdesine yeni setler eklenir. Akış yukarı yükselen set yöntemiyle inşa edilen atık barajlarının inşaat aşamasında az miktarda dolgu malzemesi kullanılması nedeniyle bu yöntem diğer yöntemlerle göre daha ekonomiktir. Bu yöntemde baraj gövde setlerinin inşasında dolgu malzemesi olarak genellikle ince taneli (ince kum, silt, kil tane boyunda) atık malzemesi kullanılmaktadır. Akış yukarı yükselen set yöntemiyle inşa edilen atık barajı gövdelerinin göreceli yoğunluklarının düşük ve suya doygunluklarının yüksek olması nedeniyle, bu setler herhangi bir deprem anında sıvılaşmaya karşı duyarlıdırlar (EPA, 1994).

Akış aşağı yükselen set yöntemiyle inşa edilen barajlar, su depolama amaçlı inşa edilen barajlara benzerlik göstermektedir. Bu yöntemle atık barajı inşası, akış yukarı yükselen set yönteminde olduğu gibi, bir başlangıç setiyle başlayıp rezervuar hacminin artırılması amacıyla başlangıç setine barajın akış aşağı kısmına doğru yeni setler eklenmesiyle devam etmektedir (Şekil 2.12). Bu yöntemle inşa edilen atık barajlarının gövdesinde dolgu malzemesi olarak

geçirimliği düşük bir malzemenin kullanılması durumunda, baraj gövdesinde drenajın sağlanması için gövdenin iç kısmına filtre malzemesi yerleştirilmesi gerekmektedir. Akış aşağı yükselen set yöntemiyle inşa edilen atık barajı gövdesinde filtre malzemesinin kullanımı sonucunda gövdenin drenajı kontrol altına alınmakta ve gözenek suyu basınçları azaltılmaktadır. Bu durum, barajın duraylılığını arttırmaktadır (EPA,1994).

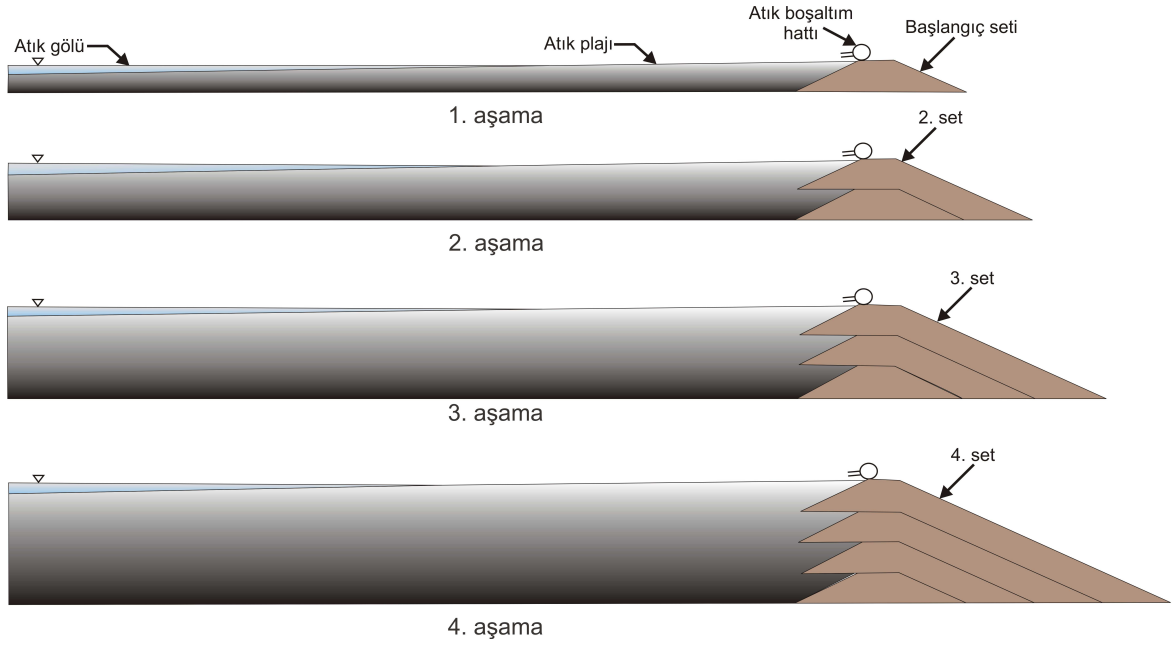


Şekil 2.11. Akış yukarı yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).



Şekil 2.12. Akış aşağı yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).

Diğer yöntemlerde olduğu gibi merkezden yukarı doğru yükselen set yönteminde de başlangıç setinin yapılmasıyla atık barajı inşa edilmeye başlanmaktadır. Atık malzemesi başlangıç seti üzerinden rezervuara boşaltılarak atık plajı elde edilmektedir. Baraj gövdesine ait 2. set atık plajından başlayıp akış aşağı kısma doğru başlangıç setinin üzerine inşa edilmektedir (Şekil 2.13). Gereksinim duyulan rezervuar hacmi sağlanana kadar baraj gövdesine yeni setler eklenmeye devam edilmektedir. Merkezden yukarı doğru yükselen set yöntemiyle inşa edilen atık barajlarında, baraj gövdesinde drenajın sağlanması ve gövdenin inşasının başladığı atık plajındaki atığın düzgün bir şekilde sıkıştırılması halinde baraj duraylılığını olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 2.13. Merkezden yukarı doğru yükselen set yöntemiyle atık barajı inşa aşamaları (Fell et al., 2005'ten düzenlenmiştir).

Vick (1990; EPA, 1994'ten), yukarıda değinilen inşa yöntemlerini birbirleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir (Çizelge 2.1). Buna göre, en ekonomik inşa yöntemi akış yukarı yükselen set yöntemi olmakla birlikte, bu yöntemle inşa edilen barajların sismik direnci çok düşüktür. Tutma yöntemi ile atık barajı inşaatında gövde dolgusu olarak yalnızca doğal toprak ve kaya zeminler kullanılırken, diğer inşa yöntemlerinde atık malzemesi de kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Atık barajı inşa yöntemlerinin karşılaştırılması (Vick, 1990; EPA, 1994'ten düzenlenmiştir).

İnşa yöntemi	Atık tipi	Su depolamaya uygunluk	Sismik direnç	Dolgu tipi	Maliyet	Geçirimsiz çekirdek kullanımı
Atık tutma	Her atık tipi için uygun	Uygun	Yüksek	Doğal toprak ve kaya zeminler	Yüksek	Kullanılabilir
Akış yukarı yükselen set	%60'ı kum tane boyunda olan atık tipi için uygun	Yüksek miktarda su için uygun değil	Sismik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde düşük	Doğal toprak-kaya zeminler ve atık kum	Düşük	Kullanılamaz
Akış aşağı yükselen set	Her atık tipi için uygun	Uygun	Yüksek	Doğal toprak-kaya zeminler, atık kum ve atık kaya	Yüksek	Kullanılabilir (Eğimli çekirdek)
Merkezden yukarı doğru yükselen set	Kum ya da düşük plastisiteli atıklar için uygun	Geçici olarak depolanabilir, ancak kalıcı depolama için uygun değil	Kabul edilebilir ölçüde	Doğal toprak-kaya zeminler, atık kum ve atık kaya	Orta	Kullanılabilir (Merkezi çekirdek)

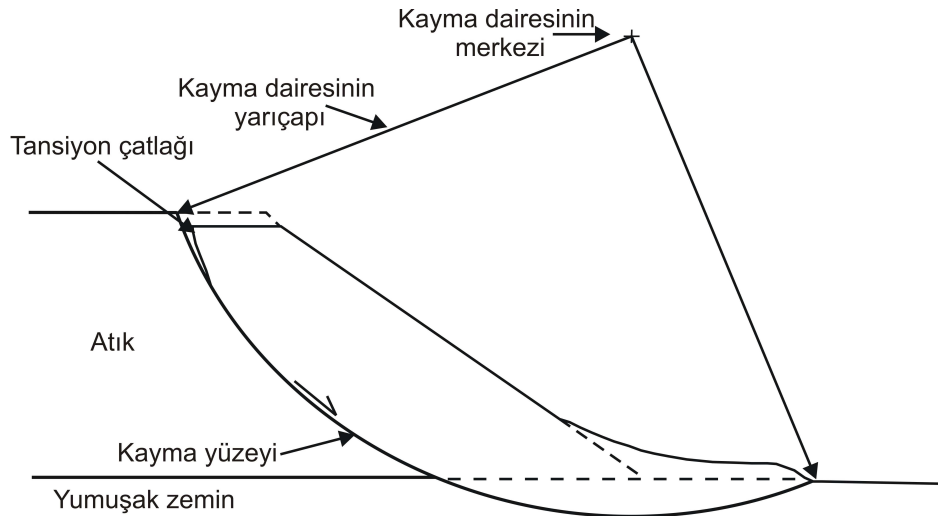
2.3. Atık Barajlarında Karşılaşılan Duraysızlıklar

Atık barajlarında, dairesel kayma, çok yüzeyli ötelenmeli ve birleşik kayma gibi şev duraysızlıkları meydana gelebilmektedir. Ayrıca, temelin zayıf olması, üstten aşma (taşma), erozyon, borulanma ve sıvılaşma nedeniyle de atık barajlarında duraysızlıklar gerçekleşmektedir. Bu duraysızlıklara ve nedenlerine ayrı başlıklar altında aşağıda değinilmiştir.

2.3.1. Şev duraysızlıkları

2.3.1.1. Dairesel kayma

Bu duraysızlık, atık barajı gövde dolgusunun bir kayma yüzeyi boyunca makaslama dayanımını yitirmesi sonucunda meydana gelmektedir. Şekil 2.14'te atık barajlarında meydana gelen dairesel kaymanın bir kesiti görülmektedir.

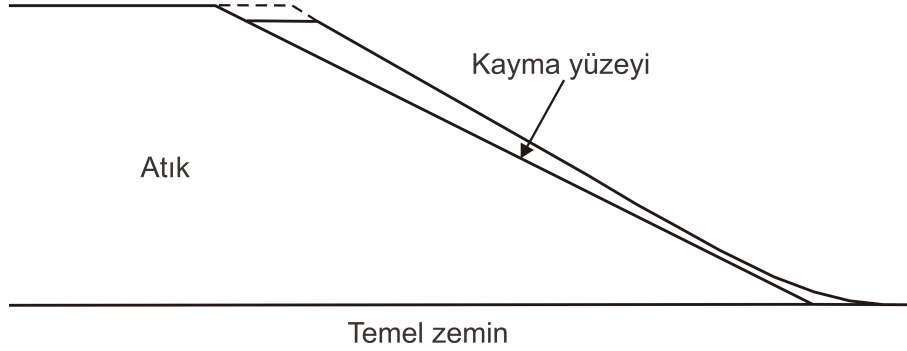


Şekil 2.14. Atık barajlarında meydana gelen tipik dairesel kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).

2.3.1.2. Ötelenmeli kayma

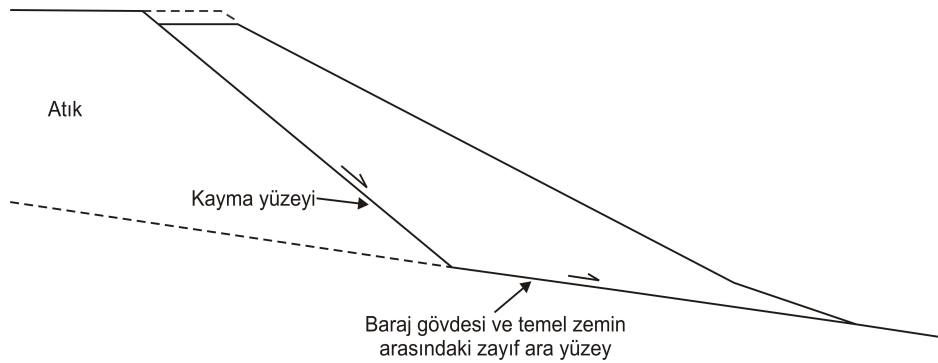
Atık barajlarında, Varnes (1978) şev duraysızlığı sınıflama sisteminde ötelenmeli kayma grubunda yer alan düzlemsel, çok yüzeyli ve birleşik kaymalar da gerçekleşmektedir.

Atık baraj gövdesinin düz bir hat boyunca makaslama dayanımını yitirmesi sonucu düzlemsel kayma meydana gelmektedir. Atık barajlarında gerçekleşen düzlemsel kaymanın bir kesiti Şekil 2.15'te verilmiştir.



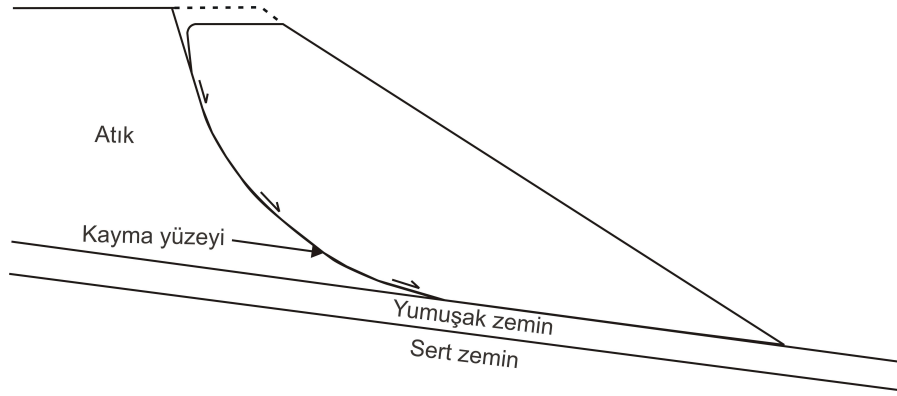
Şekil 2.15. Atık barajlarında meydana gelen düzlemsel kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).

Atık barajlarında, gövde ile atık malzemesi ve gövde ile temel zemin arasındaki zayıf ara yüzey boyunca gövde malzemesinin makaslama dayanımını yitirmesi sonucunda çok yüzeyli ötelenmeli kayma gerçekleşmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Atık barajlarında meydana gelen iki yüzeyli ötelenmeli kayma (aktif-pasif kama) kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).

Yumuşak zemin üzerinde inşa edilen atık barajlarında baraj gövdesinin ya da atık malzemesinin kendi içinde makaslama dayanımını yitirmesiyle dairesel olarak başlayan hareketin baraj ve yumuşak zemin arasındaki ara yüzey boyunca düzlemsel olarak devam etmesiyle birleşik kayma gerçekleşmektedir (Şekil 2.17).

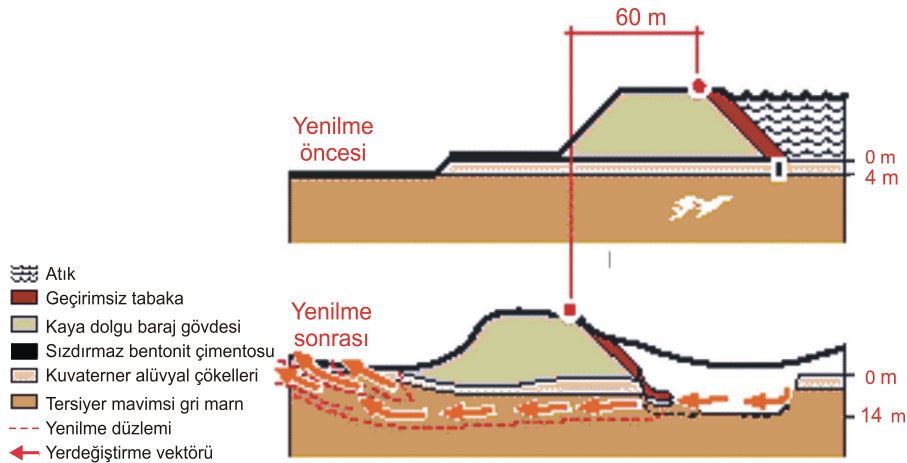


Şekil 2.17. Atık barajlarında meydana gelen birleşik kayma kesiti (CANMET, 1977'den düzenlenmiştir).

2.3.2. Temel yenilmesi

Temel yenilmesi, atık barajlarında yaygın olarak gözlenen bir duraysızlık modelidir. Bu duraysızlık; baraj yüksekliğinin giderek artırılması ve atık depolama işlemleriyle gövde üzerinde artan gerilmeler sonucu, baraj temelının hemen altında bulunan zayıf zeminin ya da kaya katmanının makaslama dayanımını yitirmesiyle gerçekleşmektedir (CANMET, 1977) (Şekil 2.18).

Temel malzemesinin zayıflığı nedeniyle duraysızlığa uğramış atık barajlarından biri de Los Frailes (Aznalcollar, İspanya) kurşun-çinko madenine ait atık barajıdır. 25 Nisan 1998'de gerçekleşen duraysızlık sonucu 4-5 milyon m³ toksik atık çevreye yayılarak, binlerce hektarlık tarım arazilerini ve Birleşmiş Milletler Dünya Kültür Mirası alanı olan Doñana Milli Park'ını etkilemiştir (www.wise-uranium.org, 2009) (Şekil 2.19).



Şekil 2.18. Los Frailes (İspanya) madenindeki atık barajında gerçekleşen temel yenilmesinin şematik görünümü (www.wise-uranium.org, 2009).

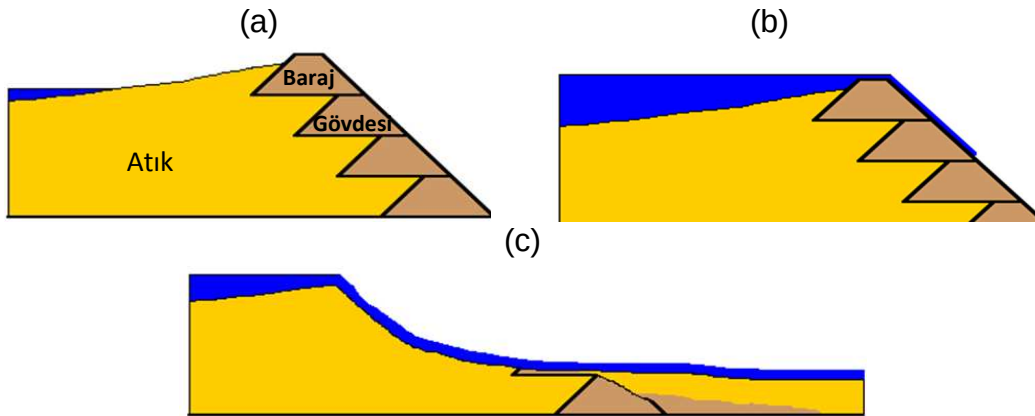


Şekil 2.19. Temelin zayıf olması nedeniyle temel yenilmesi duraysızlığına uğramış Los Frailes (İspanya) madenine ait atık barajı (www.tailings.info, 2009).

2.3.3. Üstten aşma (Taşma)

Atığın baraja boşaltım işlemi sırasında fazla su verilmesi ve tekrarlı yağışlar nedeniyle barajda biriken su miktarının giderek artması sonucunda depolanan suyun baraj gövdesinden taşarak gövdeyi aşındırmasıyla duraysızlık meydana gelmektedir (CANMET, 1977) (Şekil 2.20).

22 Şubat 1994'te tekrarlı yağışlar sonrasında Merriespruit (Virginia, Güney Afrika) atık barajı taşma nedeniyle yenilmiştir. Duraysızlık sonucunda 600000 m³ (1.2 milyon ton) atık çevreye yayılmış, 17 kişi yaşamını yitirmiş ve bir çok ev zarar görmüştür (www.tailings.info, 2009) (Şekil 2.21).



Şekil 2.20. Üstten aşma sonucu atık barajı yenilmesi aşamaları (a) duraylı koşul, (b) suyun baraj gövdesinden taşması, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).

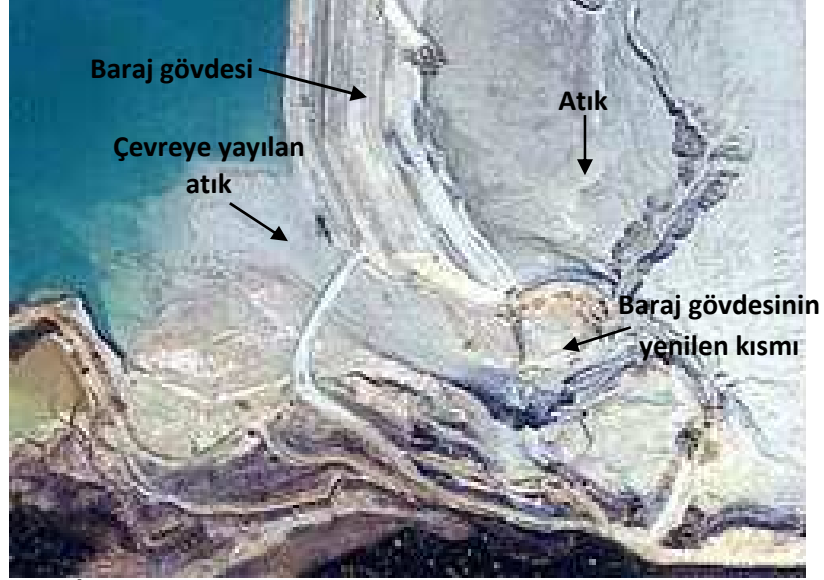


Şekil 2.21. Merriespruit (Virginia, Güney Afrika) atık barajının üstten aşma nedeniyle duraysızlığa uğradıktan sonra (a) karşıdan ve (b) yandan görünümü (www.tailings.info, 2009).

2.3.4. Erozyon sonucu meydana gelen duraysızlıklar

Yoğun yağış alan bölgelerde bulunan atık barajları, abatmanlarda ve gövde aynasında (embankment face) gerçekleşebilen erozyon kaynaklı duraysızlıklara karşı duyarlıdır. Yağmur ya da sızıntı sularının baraj gövdesi üzerinde akışa geçmesiyle gövdede kanallar oluşmakta ve barajın geometrisi değişmektedir. Ayrıca baraj gövdesinde meydana gelen sızıntılar, gövdenin iç kısmının aşınmasına ve gövde malzemesinin makaslama dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum barajın duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Erozyona uğrayan bölgelerin düzenli olarak denetimi ve onarımı ile bu duraysızlığın önüne geçilmesi mümkün olmaktadır (CANMET, 1977).

Aitik atık barajı (Gällivare, İsveç) gövdenin erozyonu nedeniyle 8 Eylül 2000'de duraysızlığa uğramıştır. Duraysızlık sonucunda 1.5 milyon m³ bakır atığı çevreye yayılmıştır (Şekil 2.22).

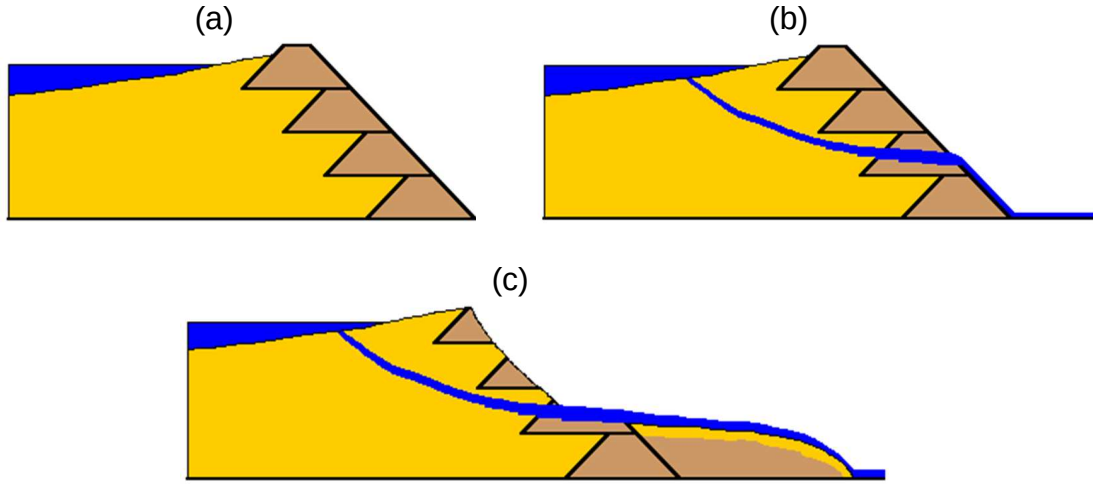


Şekil 2.22. Aitik (İsveç) atık barajının erozyon nedeniyle duraysızlığa uğradıktan sonra hava fotoğrafı (www.tailings.info, 2009).

2.3.5. Borulanma sonucu meydana gelen duraysızlıklar

Barajlardaki suyun gövdede bir yol boyuca ilerleyip barajın akış aşağı kısmından sızmasıyla borulanma gerçekleşmektedir. Borulanma nedeniyle sızıntıların baraj gövdesini aşındırmasıyla bir zayıflık düzlemi oluşmaktadır. Bu düzlem boyunca gövdenin makaslama dayanımını yitirmesiyle duraysızlık meydana gelebilmektedir (CANMET, 1977). Şekil 2.23'te borulanma nedeniyle meydana gelen atık barajı duraysızlığı aşamaları şematik olarak görülmektedir.

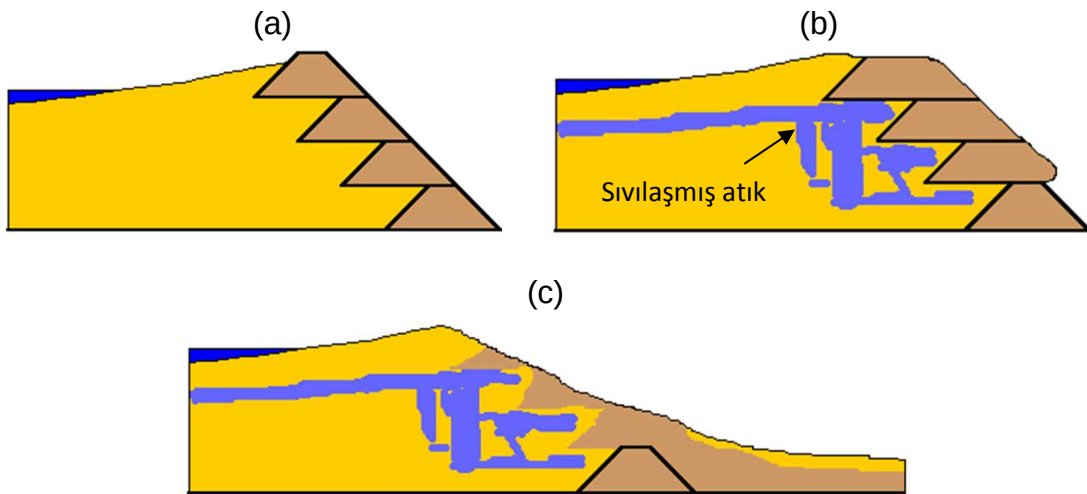
Omai (Guyana) altın madenine ait atık barajı borulanma nedeniyle 1995'te duraysızlığa uğramıştır. Duraysızlık sonucunda 2.9 milyon m³ siyanürlü atık Omai nehrine ulaşmış ve yaklaşık 900 kişi siyanürlü sudan zehirlenerek yaşamını yitirmiştir.



Şekil 2.23. Borulanma nedeniyle atık barajı yenilmesi aşamaları: (a) duraylı koşul, (b) borulanma ile baraj gövdesinden su sızıntısı, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).

2.3.6. Sıvılaşma sonucu meydana gelen duraysızlıklar

Akış yukarı yükselen set yöntemiyle inşa edilmiş vadi tipi atık barajlarında, depolanan atığın konsolide olmamış, ince taneli ve suya doygun olması nedeniyle, atık sıvılaşmaya karşı duyarlı olduğu için sık görülen bir duraysızlık modelidir. Deprem kaynaklı tekrarlı yükler altında atığın ve/veya baraj gövdesinin sıvılaşması sonucu baraj duraylılığını yitirebilmektedir (Şekil 2.24). Atık barajlarındaki dolgu malzemesinin ve atığın yoğunluğu, doygunluk oranı ve tane boyu denetlenerek sıvılaşma önlenabilir (EPA, 1994).



Şekil 2.24. Sıvılaşma sonucu atık barajlarında gelişebilen duraysızlık aşamaları: (a) duraylı durum, (b) sıvılaşma, (c) duraysızlığın gerçekleşmesi (www.wise-uranium.org, 2008).

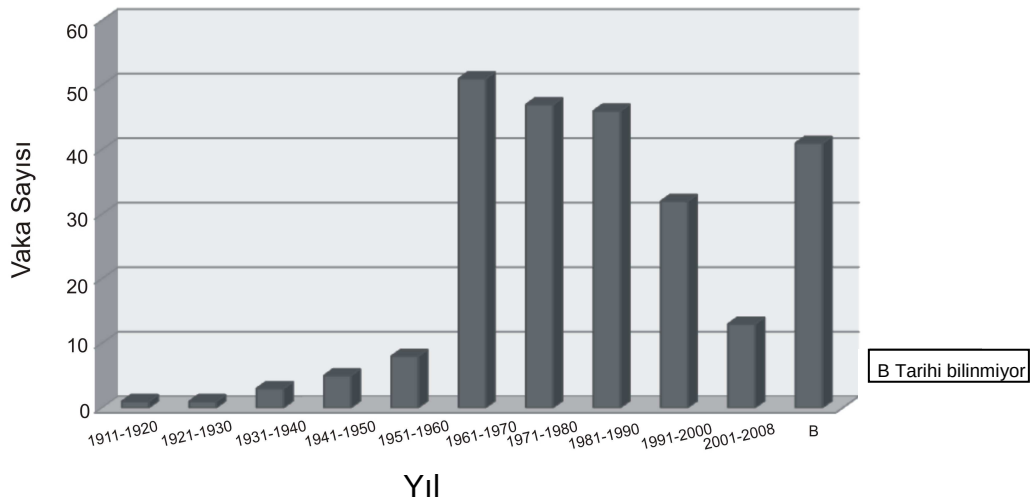
2.4. Meydana Gelmiş Atık Barajı Duraysızlıklarına İlişkin Genel Değerlendirme

Bu tez çalışmasında; atık barajı duraysızlık vaka sayısının duraysızlık nedenlerine, inşa yöntemlerine ve yıllara göre nasıl değişim gösterdiğinin belirlenmesi amacıyla, ICOLD and UNEP (2001) ve www.wise-uranium.org, 2009'dan 248 adet atık barajı duraysızlık verisi derlenmiştir. Bu veriler, atık barajlarının duraysızlık nedenleri, duraysızlıkların yıllara göre dağılımı ve barajların inşa yöntemleri gibi özelliklere göre istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları aşağıda Şekil 2.25, 2.26 ve 2.27'de histogramlar halinde sunulmuştur.

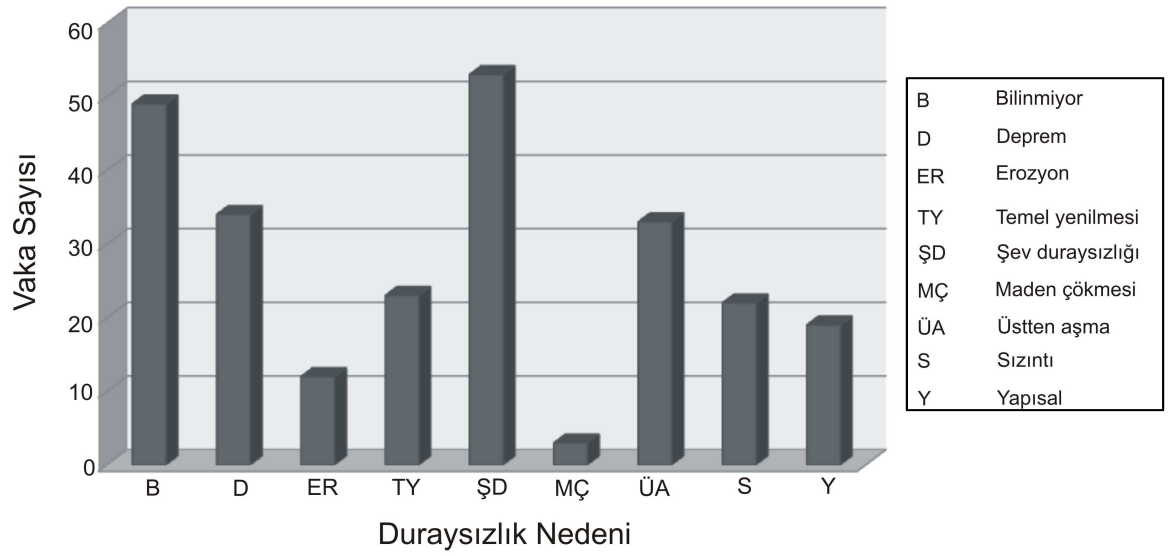
Şekil 2.25'ten ilk atık barajı duraysızlık vakasının 1910'lu yıllarda gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu tarihten sonra, duraysızlık vakalarının 1970 yılına değin giderek arttığı ve en fazla atık barajı duraysızlığının 1961-1970 yılları arasında meydana gelen 51 vakayla gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Vaka sayısı duraysızlık nedenlerine göre değerlendirildiğinde en sık gözlenen duraysızlıkların, baraj gövde şevlerinde meydana gelen duraysızlıklar (daireysel, düzlemsel, birleşik kayma) ile üstten aşma ve deprem kaynaklı duraysızlıklar olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.26).

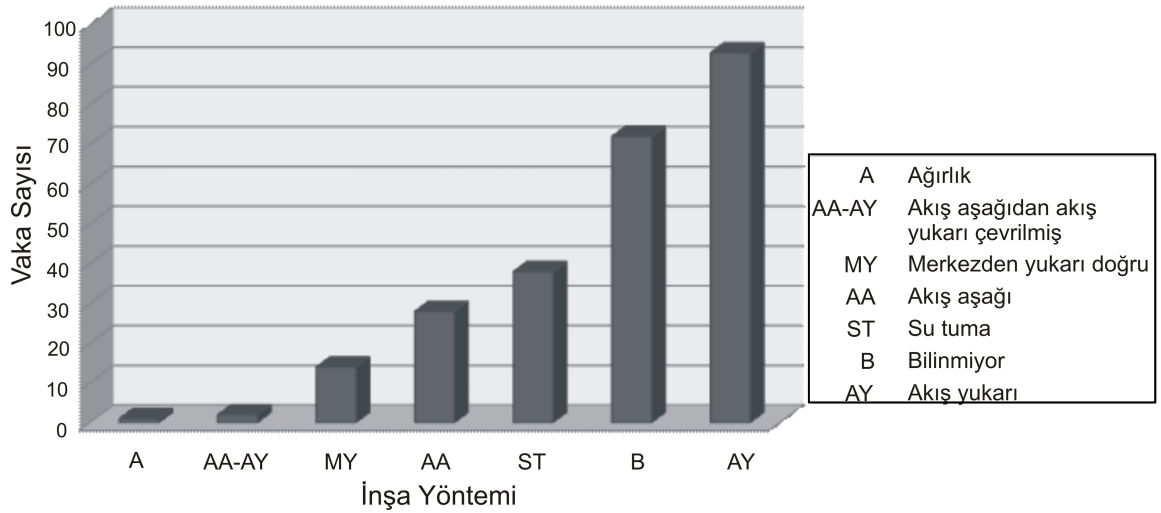
Baraj inşa yöntemi açısından, atık barajı duraysızlıklarının akış yukarı yükselen set yöntemi ile inşa edilmiş atık barajlarında yoğunlaştığı saptanmıştır (Şekil 2.27).



Şekil 2.25. Yıllara göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.



Şekil 2.26. Duraysızlık nedenlerine göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.



Şekil 2.27. İnşa yöntemlerine göre atık barajı duraysızlıklarının dağılımını gösteren histogram.

3. İNCELEME ALANININ TANITIMI VE ATIK BARAJLARININ DURUMU

3.1. Coğrafi Konum ve Morfoloji

Demir Export A.Ş. tarafından işletilmekte olan Lahanos Bakır-Çinko madeni, Karadeniz Bölgesi'nin Doğu Karadeniz Bölümü'nde bulunan Giresun iline bağlı Espiye ilçesinin yaklaşık 15 km güneyindeki Şahinyuva Köyü'nün idari ve Giresun-G41-a3 topoğrafik haritasının sınırları içinde yer almaktadır (Şekil 3.1). Alana ulaşım, Espiye-Şahinyuva arasındaki 16 km uzunluğundaki stabilize yol ile sağlanmaktadır.

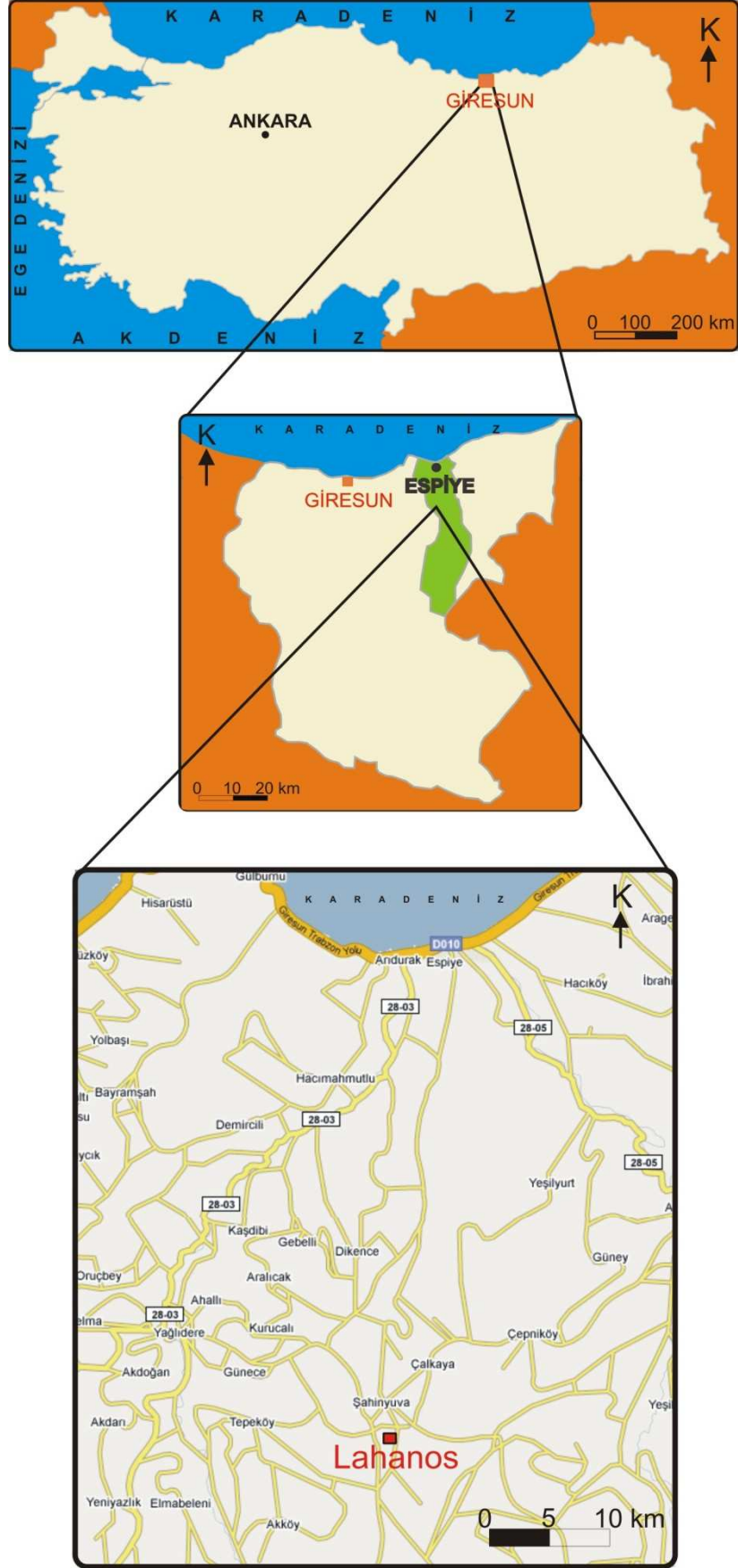
İşletmenin yakın çevresinde bulunan yerleşim birimleri Yağlıdere ilçesi ile Şahinyuva, Akköy, Killik, Kızılkaya, Tepeköy ve Çalkaya köyleridir (Şekil 3.1).

İnceleme alanı dağlık ve engebeli bir topoğrafyaya sahiptir ve işletme güneye bakan yüksek eğimli bir vadi içinde yer almaktadır. İnceleme alanının deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 540 m olup, kuzeybatıya doğru yükseklikler artmaktadır. İşletme sahası, incelenen atık barajları ve yakın civarının uydu görüntüsü Şekil 3.2'de görülmektedir.

3.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanında, ülkemizin en çok yağış alan bölgesi olan Doğu Karadeniz Bölge'sinin tipik iklim özellikleri hüküm sürmektedir. Her mevsim çok yağışlı olmakla birlikte, özellikle Ekim ve Kasım ayları yağışın en yoğun olduğu dönemlerdir. Yazlar sıcak, kışlar ılık geçmektedir. Temmuz ve Ağustos ayları en sıcak, Ocak ve Şubat ayları en soğuk geçen aylardır (T. C. Kültür Bakanlığı, 2009).

İklim, inceleme alanı ve civarındaki bitkilerin yaşayıp gelişmesine çok elverişli olduğundan tüm yerleşim birimleri fındık bahçeleri ve geniş yapraklı ağaçlarla kaplı olup, yüksek kesimlerde ise çam ağaçları ve kayın ormanları bulunmaktadır (T. C. Kültür Bakanlığı, 2009).



Şekil 3.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.



Şekil 3.2. İnceleme alanının uydu görüntüsü (Google Earth, 2009).

3.3. Lahanos Atık Barajlarının Genel Durumu

Demir Export A.Ş. 1989'da Lahanos madeninin işletme hakkını almış ve Lahanos madeni çevresinde toplam uzunluğu 1315.5 m olan 14 adet sondaj yapmıştır. Kuruluş, bu sondajlar sonucunda bölgede yaklaşık % 4.25 Cu, % 3.31 tenörlü 1500000 ton cevher rezervi olduğunu belirlemiştir. Demir Export, Lahanos madeninde yeraltı yöntemiyle üretilen ham cevheri 1995 yılında işlemeye başlamıştır (JICA and MMAJ, 1998). Kuruluş tarafından, işlenen cevherden arta kalan atık malzemesini depolamak amacıyla tesisin de üzerinde bulunduğu doğuya eğimli vadinin güney yamacına bir atık barajı inşa edilmiştir (Şekil 3.3 A barajı). İşletme yetkililerinden alınan bilgilere ve sahada yapılan gözlemlere göre bu atık barajı dolgu baraj türünde ve yakın çevredeki dasitik tüfler ile pembe dasitler kullanılarak inşa edilmiştir. 535 m kotunda bulunan bu atık barajının tamamen dolmasıyla 1995 yılında EN-SU ve ERA (1995) tarafından yeni bir barajın inşası projelendirilmiştir. 1996 yılında inşası tamamlanan yeni atık barajı bu tez çalışmasına konu olmuş olup, aşağıda bu barajın mevcut durumu değerlendirilmiştir (Şekil 3.3 B barajı).



Şekil 3.3. Lahanos işletmesindeki atık barajlarının genel bir görüntüsü: (A) dolan eski atık barajı ve (B) bu çalışmada incelenen atık barajı.

Yeni atık barajı, kullanımı durdurulmuş eski atık barajının yaklaşık 320 m doğusunda bulunmaktadır. Barajın kaya dolgu şeklinde inşa edilmesi planlanmış (EN-SU ve ERA, 1995), ancak gövde inşaatında işletme ve yakın civarında bozunarak yer yer killeşmiş dasitik tüflerle pembe dasit parçalarının karıştırılmasıyla elde edilen dolgu malzemesi kullanılmıştır. Vadi tipinde inşa edilen atık barajının gövde dolgusunda çakıldan kil tane boyuna kadar değişen farklı malzemelerin olduğu tez çalışması sırasında gövdenin üst kesiminde açtırılan araştırma çukurlarından birinden alınan görüntüden (Şekil 3.4) görülmektedir. İşletme yetkililerinden alınan bilgiye göre, projeye uygun olarak baraj gövdesinin akış aşağı (memba) şevine filtre malzemesi yerleştirilmiş ve bu malzemenin üzerine de jeotekstil serilmiştir (Şekil 3.5). Bu jeotekstil malzemesinin hidrolik iletkenliği Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Hidrojeoloji Laboratuvarında Johnson tipi permeametre ile ölçülerek, geçirgenliğin 2.8×10^{-2} cm/s olduğu saptanmıştır (Ulusay, 2006). Bu değer 18 no.lu (1 mm) elekten geçirilmiş kumun 4×10^{-2} cm/s olan hidrolik iletkenliğine oldukça yakın olup, söz konusu yaygının suyun yanı sıra, kolloid ve kil, hatta silt tane boyundaki malzemeyi de geçirebileceğine işaret edilmektedir (Ulusay, 2006). Buna göre, gövde inşasında kullanılan jeotekstil gövde dolgusunun geçirimsizliğinin azaltılması amacına uygun değildir.



Şekil 3.4. Alt kottaki atık barajının gövde dolgusundan bir görünüm.



Şekil 3.5. Alt kottaki ikinci atık barajının inşası sırasında filtre malzemesinin üzerine jeotekstil serilmesi (Lahanos işletmesinden temin edilmiştir).

EN-SU ve ERA (1995) tarafından hazırlanan projede barajın akış yukarı şevi 1:1.5 (34^0), akış aşağı şevi ise 1:2 (26.5^0) eğimli olacak şekilde projelendirilmiştir. Ancak, sahada yapılan incelemelerde akış aşağı gövde şevinin belirli bir kottan itibaren önerilen eğimden biraz farklı olarak daha dik bir eğimle (yer yer değişen) inşa edildiği belirlenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Baraj gövdesindeki eğim değişikliği.

Saha gözlemlerinde, baraj gövdesinde herhangi bir hareketin göstergesi olabilecek tansiyon çatlağı vb. gibi deformasyonlar izlenmemiştir. Ancak, baraj gövdesinin akış aşağı şevinde birkaç noktada su sızıntılarının varlığı saptanmıştır. İşletme yetkililerinden alınan bilgilere göre baraj gövdesinden sızan sular temiz olup, herhangi bir katı malzeme taşımamaktadır. Bu sızıntıların baraj gövdesinde erozyona neden olarak kanallar oluşturduğu ve baraj gövde geometrisini bozduğu gözlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Sızıntıların baraj gövdesinde neden olduğu erozyon sonucu oluşan kanallar.

Atık barajına ait dolusavaktan çıkan sular gövde ve yamaç arasında aktığı için gövde dolgusuna zarar vermesi nedeniyle, EN-SU (2007) çıkış kanalı yamaç üzerinde olacak yeni bir dolusavak inşa edilmesini önermiştir.

Lahanos Bakır-Çinko flotasyon tesisinde işlenen ham cevherden arta kalan atık malzeme, flotasyon tesisinden su ile karıştırılıp bir borudan doğal topoğrafik eğim boyunca akıtılarak atık barajlarına iletilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Su ile karıştırılmış atık malzemenin cevher zenginleştirme tesisinden doğal topoğrafik eğim boyunca akıtılması.

Alt kottaki yeni atık barajının 2006'da rezervuar hacminin azalması nedeniyle Demir Export A.Ş. tarafından baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesi planlanmıştır. Baraj şevi EN-SU (2007) tarafından hazırlanan Lahanos atık barajı yükseltme projesine göre dolgu hacmini azaltmak amacıyla 470 m kotuna kadar 1 düşey/2.25 yatay, 470 m kotundan kret kotuna kadar olan kısmın ise 1 düşey/1.68 yatay olacak şekilde tasarlanmıştır. Barajın yükseltilmesi sırasında işletme yakınlarında bulunan dasitlerin kırılmasıyla elde edilen kırmataş malzemesinin kullanılması planlanmaktadır. EN-SU (2007) tarafından işletmeye 18 km uzaklıkta olan Yağlıdere ırmağından getirilecek olan malzemenin eski gövde dolgusu ile yeni gövde dolgusu arasına filtre malzemesi olarak serilmesi önerilmiştir. Daha büyük bir rezervuar hacminin elde edilmesi amacıyla barajın akış aşağı yükselen set yöntemine göre yükseltilmesi öngörülmüştür (EN-SU, 2007).

4. İNCELEME ALANI VE CİVARININ JEOLJİK VE SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ

Tez çalışmasının amacı bölgenin jeolojik özelliklerinin belirlenmesi olmamakla birlikte, atık barajının inşasında kullanılması ve barajın bu birimler üzerinde inşa edilmiş olması nedeniyle, inceleme alanındaki jeolojik birimlerin litolojik özellikleri de çalışmada dikkate alınmıştır. Bu özelliklerin belirlenmesinde önceki çalışmalardan ve saha çalışmaları sırasında işletme ve yakın civarında yapılan gözlemlerden yararlanılmıştır.

Bölgede MTA, Demir Export ve JICA tarafından maden arama amaçlı ayrıntılı jeolojik ve jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Aktimur vd. (1993) tarafından MTA adına hazırlanan Giresun İli Arazi Kullanım Potansiyeli Raporu'na, özel izin gerektirdiği için ulaşılamamıştır. Bu nedenle, inceleme alanının jeolojik özelliklerinin belirlenmesinde JICA and MMAJ (1998)'nin çalışması dikkate alınmıştır.

Bu bölümde, önce işletmenin de sınırları içinde yer aldığı Espiye ilçesinin stratigrafisi, daha sonra işletme ve yakın çevresinde gözlenen birimlerin jeolojik özellikleri ana hatlarıyla sunulmuştur. Bunun yanı sıra, atık barajının duraylılığıyla ilgili analizlerde dinamik koşullar, dolayısıyla en büyük yatay yer ivmesi de dikkate alınacağı için, inceleme alanının da bulunduğu bölgenin depremselliği de değerlendirilmiştir.

4.1. Espiye İlçesinin Stratigrafisi

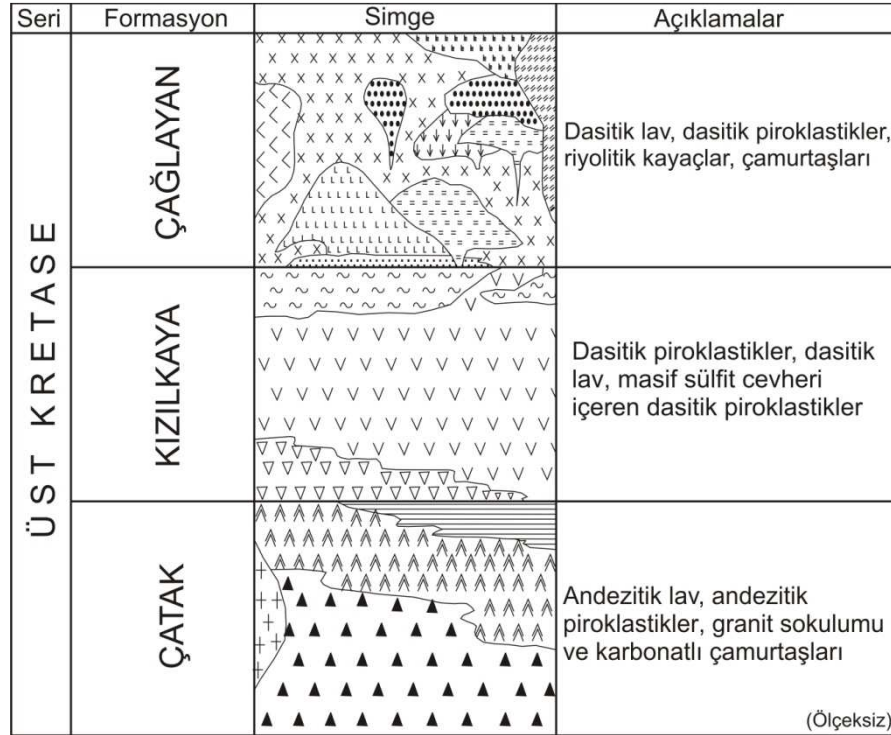
Espiye ve çevresindeki Geç Kretase yaşlı kayaçlar, Güven et al. (1992; JICA and MMAJ, 1998'den) tarafından Çatak, Kızılkaya ve Çağlayan formasyonu olmak üzere 3 farklı stratigrafik birim şeklinde ayırtlanmıştır (Şekil 4.1).

Çatak formasyonu genel olarak otobreşik andezit lavları ve çamurlu-kalkerli ara katkılı piroklastiklerden oluşmaktadır (Şekil 4.1). Kalınlığı yaklaşık 1000 m olan formasyon, Espiye ilçesinin batı ve güney kısımlarından geçen Yağlıdere boyunca izlenmektedir. Formasyonu oluşturan kayaçlarda tipik olarak kloritleşme ve epidotlaşma gözlenmekte olup, bölgesel ölçekte hidrotermal ve/veya düşük

dereceli metamorfik alterasyonların varlığı saptanmıştır (Güven et al., 1992; JICA and MMAJ 1998'den).

Kızılkaya formasyonu otobreşik dasit lavlar ile dasitik piroklastik kayalardan meydana gelmekte (Şekil 4.1) olup, bölgenin doğu kesimlerinde Çağlayan formasyonu tarafından üzerlenmiş halde izlenmektedir. Lahanos, Killik ve Ağalık masif sülfür cevheri yatakları bu formasyonun üst seviyelerinde bulunmaktadır. Lahanos ve Çalkaya bölgesinde Kızılkaya formasyonunun kalınlığı 1000 m'ye ulaşmaktadır. Formasyonda kloritleşme, serisitleşme ve bölgesel hidrotermal alterasyon gözlenmekte, ancak metamorfizmaya rastlanmamaktadır (Güven et al., 1992; JICA and MMAJ 1998'den).

Çağlayan formasyonu bölgede otobreşik-masif dasit lavları, dasitik piroklastikler, riolitik kayalar ve çamurtaşları ile temsil edilmekte (Şekil 4.1) olup, Espiye'nin kuzey kesimlerinde yer almaktadır. Formasyonun kuzeye doğru artmakta olan kalınlığının yaklaşık 1000 m olduğu belirlenmiştir. Çatak ve Kızılkaya formasyonlarındaki gibi, Çağlayan formasyonundaki kayalar da hidrotermal alterasyonun izlerini taşımaktadır (Güven et al., 1992; JICA and MMAJ 1998'den).



Şekil 4.1. Espiye ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (JICA and MMAJ, 1998'den düzenlenmiştir).

4.2. İnceleme Alanının Stratigrafik ve Yapısal Özellikleri

İnceleme alanında;

- (i) Kızılkaya formasyonuna ait Geç Kretase yaşlı dasitik tüfler,
- (ii) Kızılkaya formasyonuna ait Geç Kretase yaşlı dasitler,
- (iii) Kuvaterner yamaç molozu

olmak üzere üç ana litolojik birim ayırtlanmıştır. Bu birimlerin inceleme alanındaki konumları Şekil 4.2’de verilen jeoloji haritasında gösterilmiştir.

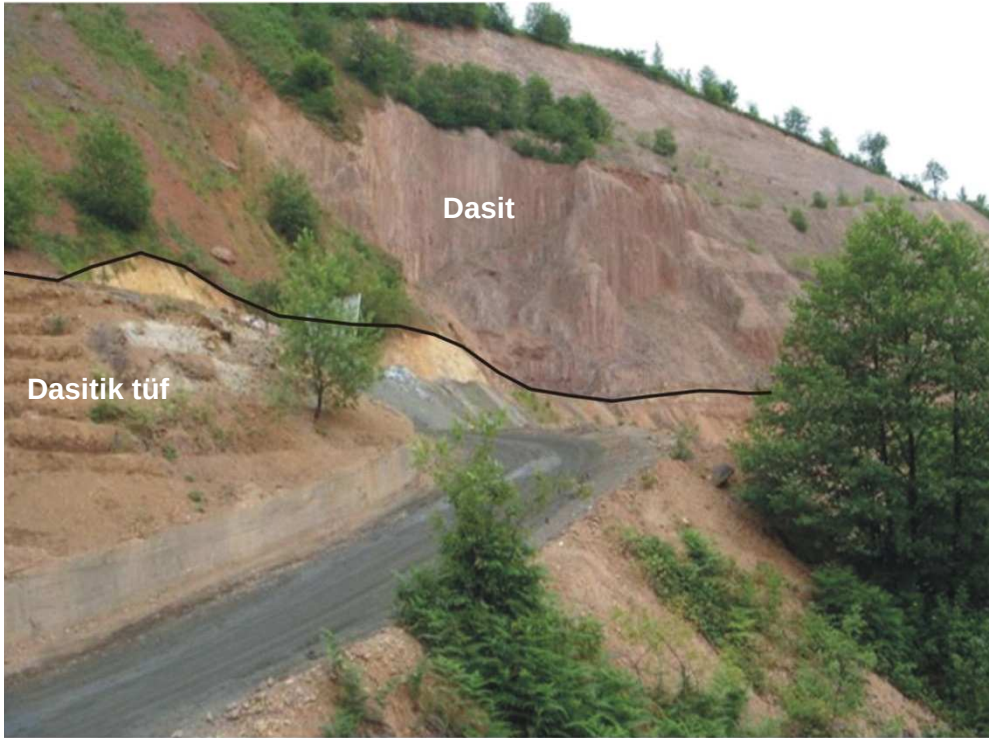
İşletme ve atık barajlarının üzerinde kurulu olduğu Kızılkaya formasyonuna ait Geç Kretase yaşlı dasitik tüfler bölgede en yaygın litolojik birim olarak izlenmektedir (Şekil 4.2). Yeşil ve açık yeşil olan bu birim yüzeyden bir kaç metre derinliğe kadar orta-ileri derecede bozunmuştur. Dasitik tüfler, killeşme nedeniyle yüzeyde sarımsı kahverengi renklerde görülmektedir (Şekil 4.3). Bu birimin hemen üzerine Geç Kretase yaşlı dasitler gelmektedir. İki birim arasındaki sınır, işletmenin kuzeyinden geçen KD-GB uzanımlı stabilize yol boyunca belirgin şekilde görülmektedir (Şekil 4.4).

Kızılkaya formasyonuna ait Geç Kretase yaşlı dasitler, işletmenin kuzeyinde yüzeylenmektedir (Şekil 4.2). Sert yapılı pembemsi bu birim soğuma çatlakları nedeniyle altıgen ve beşgen kolonsal bir yapı göstermektedir (Şekil 4.5a). İşletmenin kuzeydoğusunda işinsal yapıya sahip dasitler de yer almaktadır (Şekil 4.5b). Dasitler, az-orta derecede bozunmuş olup, eklem yüzeyleri düz ve az pürüzlüdür.

Yamaç molozu (Şekil 4.2), dasitik tüflerin ayrışmasıyla meydana gelmiştir. Bu birimin içerisinde kil boyutundan blok boyutuna kadar değişen tane boyuna sahip dasitik tüf ve dasit parçaları bulunmaktadır (Şekil 4.6). Yamaç molozu, atık barajlarının içinde inşa edildiği vadinin yamaçlarında gözlenmektedir. Birimin kalınlığı 0.50-2.50 m arasında değişmektedir.



Şekil 4.3. Geç Kretase yaşlı ayrıışmış dasitik tüflerden bir görünüm.



Şekil 4.4. Geç Kretase yaşlı dasitik tüf ve dasit arasındaki sınır ilişkisi.

Bitki örtüsünün yoğunluğu nedeniyle yapısal unsurlar kolaylıkla ayırt edilememekle birlikte, işletme ve yakın çevresinde herhangi bir fay gözlenmemiş olup, önceki çalışmalarda da bu civarda herhangi bir fayın varlığı rapor edilmemiştir.

(a)



(b)



Şekil 4.5. (a) Kolonsal ve (b) ışınsal yapıya sahip dasitlerden bir görünüm.



Şekil 4.6. İşletmenin ve atık barajlarının inşa edilmiş olduğu vadinin yamaçlarında gözlenen yamaç molozundan bir görünüm.

4.3. İnceleme Alanının Depremselliği

Doğu Karadeniz tektonik kuşağının (Pontid) kuzeydoğusunda bulunan inceleme alanı, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Dairesi (DAD)'nin (1996) deprem bölgeleri haritasına göre 4. derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır (Şekil 4.7). DAD'nin verilerine göre inceleme alanının bulunduğu bölgede önemli bir deprem meydana gelmemiş olup, inceleme alanının yakınlarında herhangi bir diri fay da bulunmamaktadır. Bununla birlikte, inceleme alanına en yakın konumdaki diri fay 90 km uzaklıkta olup, bu fay Şekil 4.8'de gösterilen Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun yaklaşık 310 km uzunluğunda olan 5.4 no.'lu segmentidir.

Deprem Araştırma Dairesi'nin verileri incelendiğinde, aletsel dönemde bu segmentle ilişkili olarak meydana gelmiş en etkili deprem 1939 yılında Erzincan'da gerçekleşmiş olup, büyüklüğü (M_s) 7.9 (Şiddet: X-XI)'dur. KAFZ'nun 5.4 no.'lu

segmenti ve yakın çevresinde meydana gelmiş depremler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

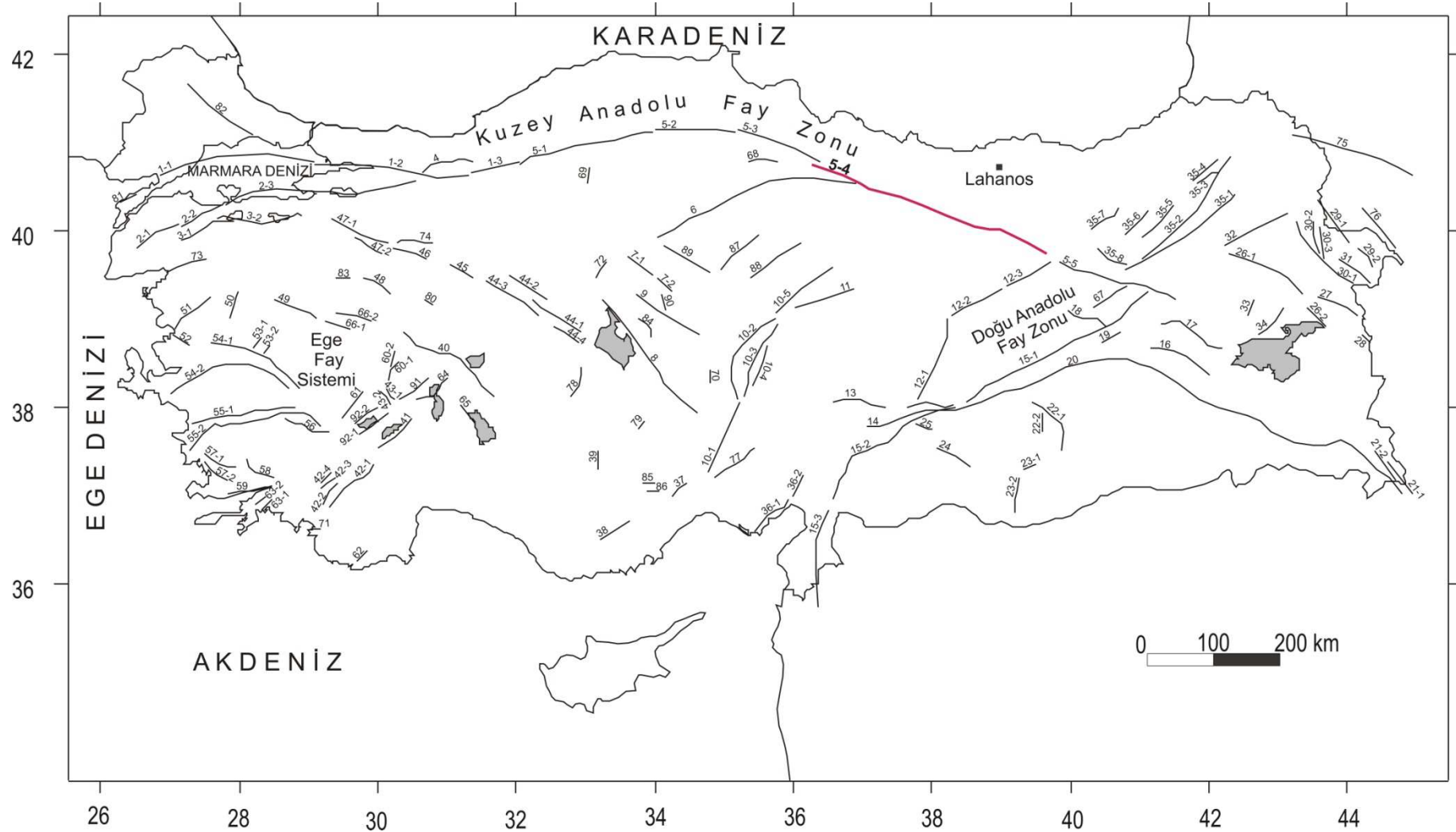
Çizelge 4.1. KAFZ'nun 5.4 no.lu segmenti ve yakın çevresinde gerçekleşmiş depremler (DAD, 2009).

Tarih	Yer	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklik		
					M _L	M _D	M _S
24.01.1916	Tokat	40.27	36.83	-	-	-	7.1
18.05.1929	Sivas (Suşehri)	40.2	37.9	10	-	-	6.1
26.12.1939	Erzincan	38.9	39.51	20	-	-	7.9
12.11.1941	Erzincan	39.74	39.43	70	-	-	5.9
20.12.1942	Tokat (Niksar-Erbaa)	40.87	36.47	10	-	-	7.0
12.07.1993	Erzincan	39.75	39.55	-	3.3	-	-
01.12.1996	Tokat (Reşadiye)	40.44	37.24	10	4.0	-	-
12.11.2001	Tokat (Almus)	40.36	36.83	-	-	3.1	-
19.05.2004	Erzincan	39.80	39.54	6.8	-	3.4	-
12.05.2005	Tokat (Reşadiye)	40.38	37.34	5.6	-	4.9	-
14.04.2006	Tokat	40.29	36.55	18.4	-	3.4	-

M_L: Yerel deprem büyüklüğü, M_D: Depremin süre büyüklüğü, M_S: Yüzey dalgası büyüklüğü.



Şekil 4.7. Giresun ilinin depremselliği (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1996'dan derlenmiştir).



Şekil 4.8. Farklı araştırmacıların çalışmalarından düzenlenmiş Türkiye'deki diri fayların konumlarını gösteren harita (Ulusay et al., 2004'ten düzenlenmiştir).

5. JEOTEKNİK AMAÇLI SAHA ÇALIŞMALARI

İncelenen atık barajının inşasında kullanılmış ve barajın yükseltilmesi sırasında kullanılacak olan malzemelerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla veri toplamak üzere inceleme alanında saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; laboratuvar deneyleri için gerek baraj gövdesinden ve atıktan, gerekse barajın yükseltilmesi amacıyla kullanılacak dasitlerden örnekler alınmış, ayrıca gövdede birkaç noktada gözlenen küçük sızıntıların yeri belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, barajın yükseltilmesi sırasında gövde dolgu malzemesinde kırmataş olarak kullanılacak dasitlerin değerlendirilmesi amacıyla, bu birimde süreksizlik aralığı ölçümleri alınmış ve fotoanalize yönelik görüntüler çekilmiştir. Bu çalışmaların gerçekleştirildiği yerler Şekil 5.1'deki tesis ve atık barajlarının konumlarının da verildiği plan üzerinde gösterilmiştir. Ancak süreksizlik aralığının belirlenmesi amacıyla seçilen hat etüdü yerlerinin bir kısmı, haritanın sınırlarının dışında kaldığı için Şekil 5.1'de gösterilememiştir.

5.1. Örneklem Çalışmaları

Yükseltilecek olan alt kottaki barajın gövdesini oluşturan malzemenin mühendislik özelliklerinin tayini amacıyla gereksinim duyulan örneklerin derlenmesi için baraj gövdesi üzerinde yaklaşık 20 m aralıklarla 6 farklı yerde araştırma çukurları (AÇ) ekskavatör yardımıyla açılmıştır (Şekil 5.2). Söz konusu çukurların genişlikleri 2-2.8 m, uzunlukları 3.5-4.9 m ve derinlikleri ise 1.7-2.3 m arasında değişmektedir. Baraj gövdesine zarar verilmemesi için çukur derinliklerinin nispeten sığ olmasına özen gösterilmiştir. Bu çukurlardan, gövdeyi oluşturan çakıl, kum, silt, kil tane boyunda, yer yer plastik ve az-orta derecede bozunmuş dasitik tuf-dasit blokları içeren malzemenin indeks ve dayanım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak olan laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınmıştır. Gövde malzemesinin yer yer iri çakıllar içermesi örselenmemiş örnek alımını sınırlandırmıştır. Açılmış olan 6 araştırma çukurunun her birinden 3'er adet olmak üzere toplam 18 adet örselenmemiş örnek 10x10 cm'lik kesici metal kalıplar yardımıyla elde edilmiştir (Şekil 5.3). Bunun yanı sıra, yerleri Şekil 5.1'de gösterilen AÇ 1, AÇ 3, AÇ 4 ve AÇ 6 no.lu araştırma çukurlarından örselenmiş örnekler alınmıştır.



Şekil 5.2. Açılan araştırma çukurlarından birinin ve baraj gövde malzemesinin görünümü.



Şekil 5.3. Araştırma çukurundan kesici metal kalıp ile örselenmemiş örnek alımı.

Baraj gövdesinden derlenen örneklerin yanı sıra, barajın duraylılık analizlerinde girdi parametresi olarak gereksinim duyulan atık malzemesinin makaslama dayanımının (kohezyon, c - içsel sürtünme açısı, ϕ) belirlenmesi amacıyla üst kottaki barajda depolanan atıktan, (Şekil 5.4), ayrıca indeks özelliklerinin tayini için de alt kottaki atık barajından örselenmiş örnek alınmıştır (Şekil 5.5). Alt kottaki barajda depolanan atığın yüzeyinde su birikintisinin olması nedeniyle, atık malzemesine ait örselenmemiş örnekler artık kullanılmayan üst kottaki atık barajında depolanan atıktan alınmıştır.



Şekil 5.4. Atıktan kesici metal kalıplarla örselenmemiş örnek alımı.



Şekil 5.5. Alt kottaki atık barajından örselenmiş örnek alımı.

Dasitlerin tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi amacıyla taş ocağı yakınlarından 3 adet blok örnek alınmıştır (bkz. Şekil 5.1). Buna ek olarak, kırmataş şeklindeki dasitlerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin belirlenmesi için kırmataş yığınlarından örselenmiş örnekler derlenmiştir.

Baraj gövdesi üzerinde konumları Şekil 5.1’de gösterilen sızıntılar belirlenmiştir. Gövdedeki 2 ve 7 no.lu sızıntıların debileri sırasıyla 0.025 ℓ/s (25 m $\varnothing$), 0.1 ℓ/s (100 m $\varnothing$) olarak ölçülmüştür. Bu değerler oldukça düşük olarak değerlendirilmiştir.

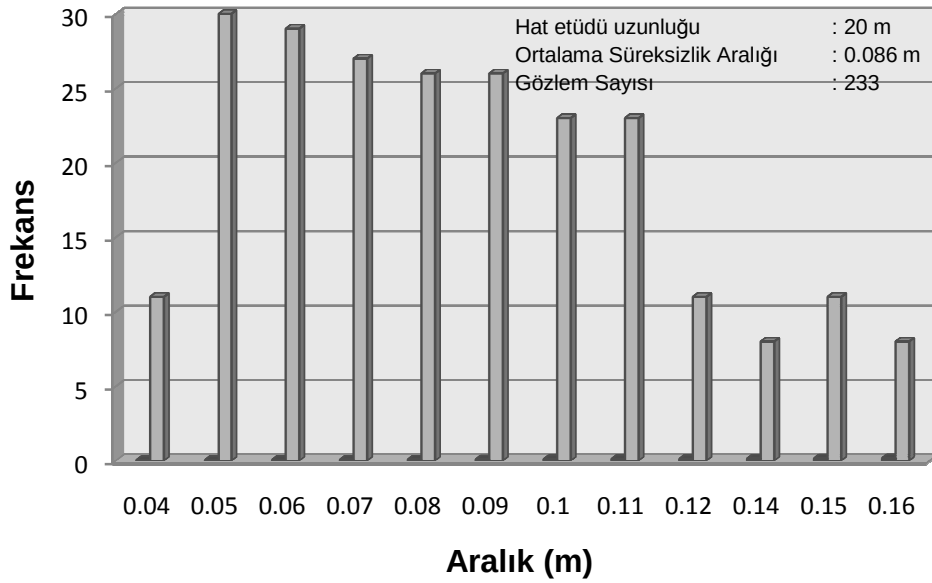
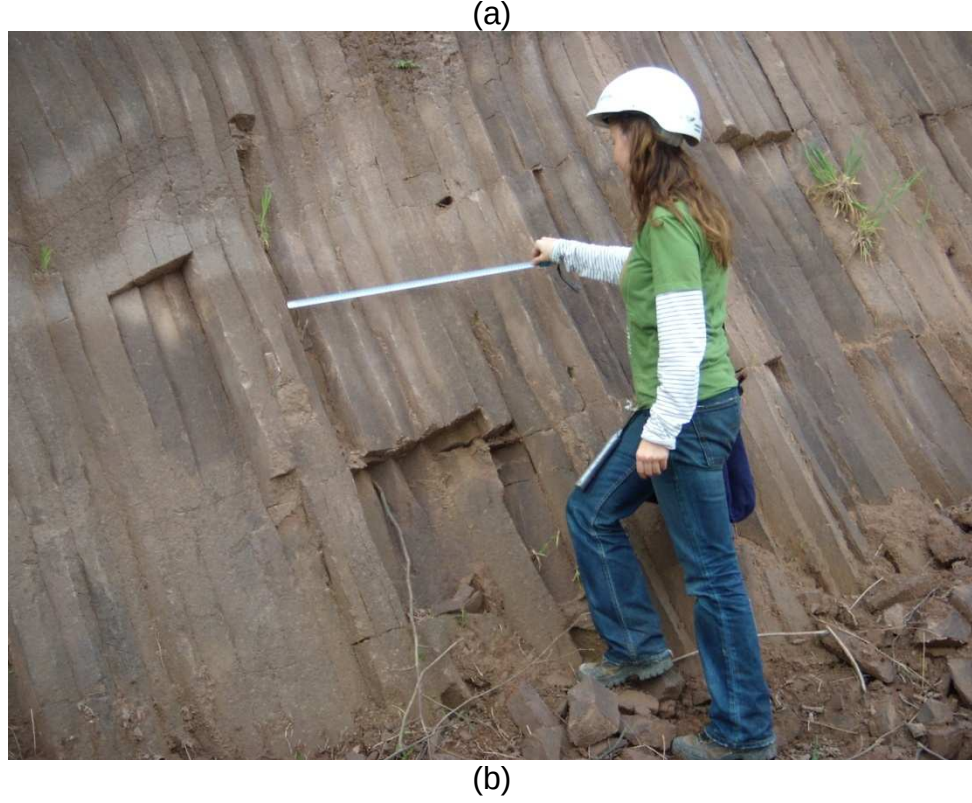


Şekil 5.6. Alt kottaki atık barajındaki sızıntılarda debi ölçümü.

5.2. Dasitlerde Süreksizlik Aralığı Ölçümleri

Alt kottaki atık barajının yükseltilmesi sırasında dolgu malzemesi olarak kırılmış dasitlerin kullanılması öngörülmüştür. Bu malzeme yığıldığında, çok kırıklı-parçalı bir kaya kütlesi olarak düşünülebilir. Bu durumda gövdenin duraylılık analizlerinde söz konusu malzemenin Hoek-Brown görgül yenilme ölçütüne göre davranması söz konusu olacağından bu ölçüt açısından süreksizlik aralığının belirlenmesine gereksinim duyulmuştur. Bu amaçla, sık aralıklı soğuma çatlaklarının gözlemlendiği dasitlerde inceleme alanı civarında yüzlek veren dasit yarmaları boyunca seçilmiş yerlerde hat etütleri yapılarak eklem sıklığı belirlenmiştir (Şekil 5.7a). Eklem

sıklığının saha genelinde fazla değişmediği gözlemlenerek, bu ölçümler 4 ayrı yerde ve 5'er m'lik hatlar boyunca alınmıştır. Alınan ölçümlerin istatistiksel değerlendirmesi sonucunda ortalama eklem aralığı 8.6 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 5.7b).



Şekil 5.7. (a) Kolonsal eklemli dasitlerde süreksizlik aralığı ölçümü, (b) dasit kolonları için süreksizlik aralığı histogramı.

5.3. Fotoanaliz İçin Kırmataş Yığınlarından Görüntü Alınması

Kırılarak gövde dolgusunda kullanılacak olan dasit kolonlarının süreksizlik aralığı yapılan hat etütleri ile belirlenmiş, ancak dasitlerin süreksizlik aralığının kırma işlemi sonucunda değişebileceği öngörülmüştür. Bu nedenle, kırmataş malzemesinin süreksizlik aralığını belirlemek için yapılacak fotoanaliz çalışmasında kullanılmak üzere kırmataş yığınlarının farklı yerlerde fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.8). 6. Bölümde fotoanaliz çalışmaları ve hat etütlerinden elde edilen süreksizlik aralıkları değerlendirilmiş olup, kırmataş malzemesinin makaslama dayanımının Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden belirlenmesi için bu ölçütün bir girdi parametresi olan hacimsel eklem katsayısının tayin edilmesi amacıyla bu değerlerden hangisinin kullanılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5.8. Dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan kırmataş yığınının fotoanaliz amacıyla çekilmiş bir görünüm.

6. JEOMEKANİK LABORATUVAR DENEYLERİ

Lahanos işletmesinde alt kottaki atık barajının yükseltilmeden önceki ve gövdenin yükseltilmesi işleminden sonraki duraylılığının nasıl değişeceğinin araştırılmasına ilişkin analizler ile gövde, dolgu ve atık malzemelerinin mühendislik sınıflamasında ve davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere bu malzemelerin indeks ve dayanım özellikleri belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda baraj gövdesi ve yakın çevresinden alınan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde aşağıda belirtilen laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

- (a) Birim hacim ağırlık, su içeriği ve özgül ağırlık tayinleri,
- (b) Tane boyu dağılımı analizleri,
- (c) Kıvam (Atterberg) limitleri tayinleri,
- (d) Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri,
- (e) Disk makaslama deneyleri,
- (f) Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyleri.

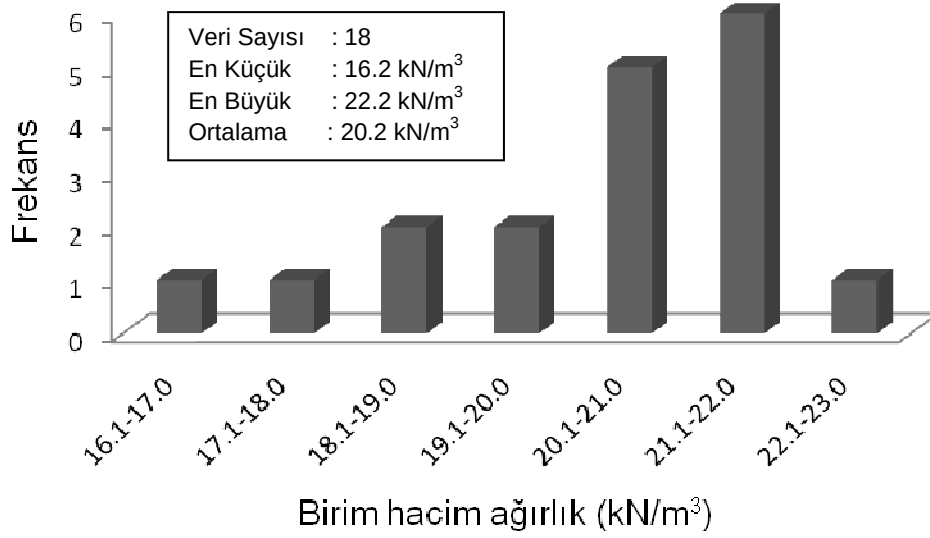
Kaya türü malzemeler için ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemlere ve toprak zemin özelliğindeki malzemeler için ise ASTM (2000) standartlarına göre yapılan deneylerin sonuçları aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

6.1. Baraj Gövde Malzemesinin İndeks ve Jeomekanik Özellikleri

6.1.1. Birim hacim ağırlık, su içeriği ve tane özgül ağırlığı

Baraj gövdesinde açılmış olan araştırma çukurlarından kesici metal kalıplar ile derlenmiş 18 adet örselenmemiş örneğin birim hacim ağırlığı tayin edilmiştir. Mevcut gövdeyi oluşturan malzemenin birim hacim ağırlığı 16.2 ile 22.2 kN/m³ arasında değişim göstermekte olup, ortalama birim hacim ağırlık 20.2 kN/m³ olarak belirlenmiştir (Şekil 6.1). Ayrıca deney sonuçları Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Gövdeden alınan 18 adet örselenmiş örneğin su içerikleri ve özgül ağırlıkları ASTM (2000)'ye göre tayin edilmiş ve deney sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Mevcut baraj gövde malzemesinin birim hacim ağırlık değerlerinin frekans dağılımı ve istatistiksel değerlendirmesi.

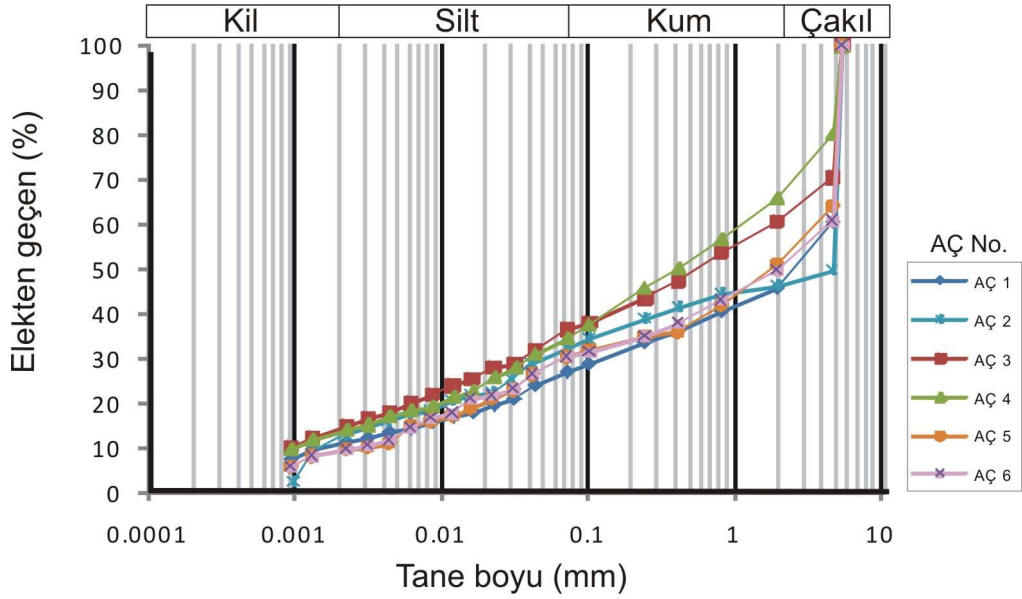
6.1.2. Tane boyu dağılımı çözümleri

Baraj gövdesinden alınmış örselenmiş örneklerin tane boyu dağılımı analizleri kuru iri elek, kuru ince elek ve hidrometre olmak üzere üç farklı aşamada ASTM (2000) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Bu üç aşama sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı eğrileri Şekil 6.2'de ve tüm örneklerle ait tane boyu yüzdeleri ise Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Buna göre, incelenen örneklerin ağırlıklı olarak çakıl ve kum tane boyutundaki malzemeden (%60) oluştuğu, ayrıca silt ve kil tane boyutunda malzemeyi (%40) de içerdiği belirlenmiştir.

6.1.3. Kıvam limitleri ve zemin sınıflaması

Gövdeyi oluşturan malzemenin mühendislik sınıflamasının yapılması amacıyla, 18 örnek üzerinde kıvam limitleri (likit limit, plastik limit, büzülme limiti) tayin edilmiştir. Buna göre, gövde malzemesinin ince taneli fraksiyonunun likit limitinin %44 ile %52, plastik limitinin %18 ile %26, plastisite indeksinin %20 ile %31 ve büzülme limitinin ise %17 ile %29 arasında değiştiği belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Örneklerin tane boyu dağılımları ve kıvam limitleri dikkate alınarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması Sistemi'ne göre sınıflandırılması amacıyla US Interior Bureau of Reclamation (1974) tarafından önerilmiş olan sınıflama ölçütleri kullanılmıştır. İncelenen örneklerin iri tane içeriğinin %50'den, ince tane içeriğinin %12'den ve plastisite indeksinin de %7' den büyük olması nedeniyle gövde malzemesi çakıl, kum ve kil karışımları ile temsil edilen GC grubu zemin olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 6.1). Tane boyu açısından değerlendirildiğinde, atık malzemesinin sivilaşmaya karşı duyarlı olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.2. Gövde malzemesine ait 6 adet araştırma çukurundan (AÇ) alınmış örneklerin tane boyu dağılım eğrileri.

6.1.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri

Barajın gerek mevcut, gerekse gövdenin yükseltilmesinden sonraki duraylılığı ile ilgili analizlerde girdi parametresi olarak kullanılacak gövde malzemesine ait kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin belirlenmesi amacıyla, örselenmemiş 18 örnekten oluşan 6 deney seti üzerinde doğrudan makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ASTM (2000) standartlarına uygun şekilde, konsolidasyonlu-drenajlı koşullarda, deformasyon kontrollü doğrudan makaslama cihazı kullanılarak yapılmıştır.

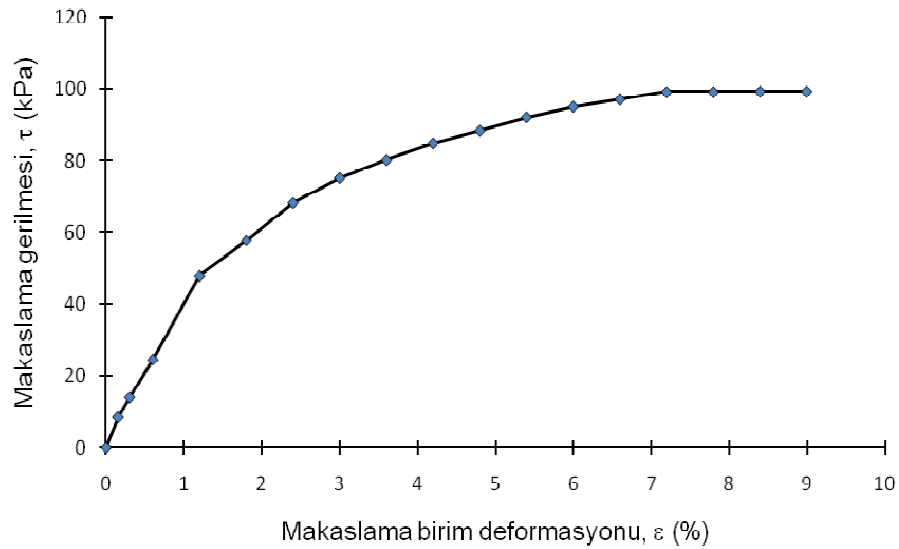
Çizelge 6.1. Baraj gövdesinden alınan örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri.

*Araştırma Çukuru No.	Örnek No.	w_n (%)	γ_n (kN/m ³)	G_s	Tane Boyu Yüzdesi				Kıvam Limitleri (%)				Zemin Sınıfı
					Çakıl	Kum	Silt	Kil	LL	PL	PI	SL	
AÇ 1	1	17.8	20.5	2.60	53	19	16	12	49	25	24	28.1	GC
	2	16.2	19.5	2.59					48	26	22		
	3	16.4	19.9	2.59					45	25	20		
AÇ 2	4	20.5	20.1	2.61	54	14	19	13	52	24	28	29.5	GC
	5	21.3	20.2	2.58					49	22	27		
	6	19.6	18.5	2.59					48	25	23		
AÇ 3	7	17.6	20.7	2.58	39	24	22	15	49	18	31	19.1	GC
	8	18.9	21.8	2.58					47	19	28		
	9	18.7	22.2	2.61					45	18	27		
AÇ 4	10	20.8	17.2	2.61	34	31	21	14	52	26	26	22.4	GC
	11	21.6	20.3	2.70					51	24	27		
	12	19.8	21.2	2.53					49	25	24		
AÇ 5	13	19.9	19.0	2.59	46	22	20	12	50	25	25	23.3	GC
	14	17.8	16.2	2.62					47	18	29		
	15	18.9	21.9	2.60					48	23	25		
AÇ 6	16	17.7	21.8	2.65	49	19	20	12	46	23	23	17.2	GC
	17	18.0	21.7	2.66					44	22	22		
	18	17.4	21.4	2.64					48	25	23		

w_n : Su içeriği (ağırlıkça); γ_n : Doğal birim hacim ağırlık; G_s : Özgül ağırlık; LL: Likit limit, PL: Plastik limit; SL: Büzülme limiti; PI: Plastisite indeksi; * Bakınız Şekil 5.1.

Baraj gövdesinin kesitleri incelenerek, gövde malzemesine etkimesi düşünülen güncel normal gerilmelerin 20 kPa - 300 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Araştırma çukurlarından (10x10x2) cm boyutlarında kesici kalıplar ile alınmış örselenmemiş örnekler (6x6x2) cm boyutlarındaki makaslama kutusuna örselenmeden aktarılarak, bu örnekler yukarıda belirtilen normal gerilme aralıklarını sağlayacak düşey yükler altında yaklaşık 15 saatlik süreyle konsolidasyona maruz bırakıldıktan sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Deneyler sırasında drenajın sağlanması için çok düşük bir makaslama hızı (0.05 mm/dak) uygulanmıştır.

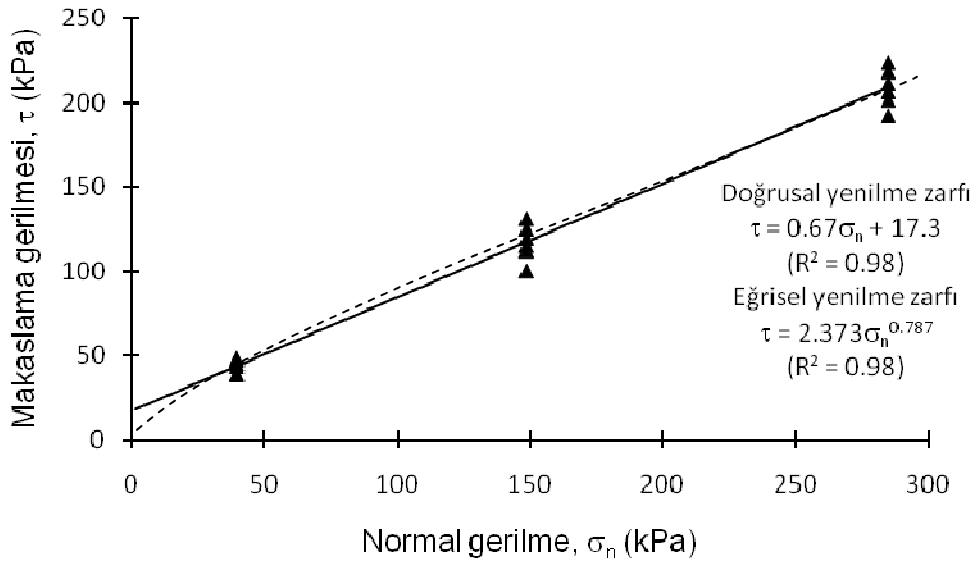
Deney sonucunda elde edilen makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyonu grafikleri incelendiğinde, doruk ve artık makaslama dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir (Şekil 6.3). Bunun nedeni olarak, ayrılmış malzemenin kazılıp taşındıktan sonra baraj yerine yığılması, dolayısıyla bu süreç içinde önemli düzeyde örselenmeye maruz kalarak dayanımının büyük ölçüde artık dayanım değerlerine yakın bir değer almış olması şeklinde düşünülmüştür.



Şekil 6.3. Baraj gövdesinde açılan AÇ2 no.lu araştırma çukurundan alınmış gövde malzemesine ait 2 no.lu örneğin 148.5 kPa'lık normal gerilme (σ_n) altında makaslama gerilmesi-birim deformasyon grafiği.

Tüm deney setleri için doğrusal (Mohr-Coulomb) ve eğrisel yenilme ölçütlerine göre yenilme zarfları çizilmiş olup, bunlar Şekil 6.4'te sunulmuştur. Taneli

zeminlerin daha çok eğrisel yenilme ölçütüne göre davrandığı bilinmekle birlikte, bu iki yenilme zarfının korelasyon katsayılarının aynı ve baraj gövdesi için belirlenen normal gerilme aralıklarında neredeyse birbirleriyle çakışıyor olmalarının yanı sıra, kullanımda pratiklik sağlaması nedeniyle makaslama dayanım parametreleri doğrusal yenilme ölçütü kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre, gövde malzemesinin makaslama dayanımı parametreleri olan kohezyon 17 kPa, içsel sürtünme açısı ise 34^0 olarak tayin edilmiştir.



Şekil 6.4. Gövde malzemesi örneklerine ait tüm makaslama deneyi setlerinin birleştirilmesiyle elde edilmiş doğrusal ve eğrisel yenilme zarfı.

6.2. Dolguda Kullanılacak Kırmataş Malzemesinin Jeomekanik Özellikleri

6.2.1. Birim hacim ağırlık

Barajın yükseltilmesi sırasında dolguda dasit kırmataş malzemesi kullanılacaktır. İşletme yakınından alınan dasit bloklarından disk makaslama deneyinde kullanılmak için hazırlanmış 15 örneğin birim hacim ağırlıkları, hacim-ağırlık ilişkisinden yararlanılarak ve kırmataş malzemesinden alınan şekilsiz 20 örneğin birim hacim ağırlıkları ise ISRM (2007)'nin önerdiği yöntem esas alınarak civa taşıma yöntemi ile belirlenmiştir. Belirlenen değerlere göre kırmataş dasit malzemesinin ortalama birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 olarak saptanmış olup, bu değer şev duraylılığı analizlerinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

6.2.2. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi tayinleri

Barajda dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan dasitlerin atmosferik koşullarda ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı göstereceği direncin belirlenmesi amacıyla suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kırmataş malzemesinden alınan örneklerden dört set oluşturacak şekilde hazırlanarak deneyler yapılmıştır. ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem, örneğin iki kez ıslanma ve kuruma çevrimine tabi tutulması esasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, bir kömür işletmesindeki marnlı toprak harmanlarında Ulusay et al. (1995)'ın ve çeşitli kaya türleri üzerinde Gökçeoğlu (1997) ile Gökçeoğlu et al. (2000)'un yaptıkları çalışmalarda, özellikle kil içeren zayıf kayalarda ve suda dağılmaya karşı duraylılığı çok yüksek olan kayalarda iki çevrim uygulanmasının söz konusu kaya davranışını karakterize etmede yetersiz kaldığı belirlenmiş olup, bu araştırmacılar iki çevrim yerine dört çevrim uygulanmasını önermişlerdir. Bu araştırmacıların çalışmaları da dikkate alınarak, deneyler dört çevrim uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Kırmataş malzemesine ait örneklerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_d) deneylerinin sonuçları.

Örnek No.	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	I_{d3} (%)	I_{d4} (%)
1	98.5	97.6	96.7	96.0
2	97.7	96.6	95.7	95.2
3	98.9	98.3	97.6	97.1
4	99.3	99.1	98.9	98.8

Çizelge 6.2'deki sonuçlar incelendiğinde; kırmataş malzemesinin ıslanma-kuruma süreçlerine karşı son derece yüksek bir dirence sahip oldukları ve dördüncü çevrim sonunda bile I_d değerlerinin ancak %95.2'ye düştüğü görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, yalnızca atmosferik etkiler dikkate alındığında kırmataş malzemesinin atık barajının yükseltilmesi sırasında dolgu olarak kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.

6.2.3. Disk makaslama dayanım indeksi deneyi

Dasitlerden alınan blok örneklerin süreksizlik düzlemleri ve mikro kırıklar içermesi nedeniyle, örneklerden tek eksenli sıkışma dayanımının tayini için önerilmiş deney yöntemine uygun boyutlarda karot örnekleri alınamamıştır. Bu nedenle, tek eksenli sıkışma dayanımının dolaylı yoldan belirlenmesi öngörülmüştür. Diğer indeks deneylere göre tek eksenli sıkışma dayanımını daha düşük hata payıyla belirleyebilen ve ISRM (2007) tarafından önerilmiş disk makaslama dayanım indeksi (BPI) deneyi (Ulusay et al., 2001) uygulanmıştır. Deneylerden belirlenen BPI_c değerleri esas alınarak ve Eşitlik 6.1'de verilen görgül ilişki kullanılarak örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları hesaplanmıştır (Çizelge 6.3). Buna göre, söz konusu dasit örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımları (σ_c) 50.8 ile 88.5 MPa arasında değişmektedir.

$$\sigma_c = 5.1 BPI_c \quad (6.1)$$

Çizelge 6.3. Kırmataş dasit malzemesinin disk makaslama dayanım indeksi (BPI) deney sonuçları ve BPI'dan dolayı olarak belirlenmiş tek eksenli sıkışma dayanımları.

Örnek No.	Disk makaslama dayanım indeksi BPI_c (MPa)	Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_c (MPa)
1	14.4	73.4
2	10.0	50.8
3	10.7	54.7
4	14.2	72.5
5	13.2	67.4
6	15.8	80.4
7	17.3	88.5
8	13.9	71.1
9	14.2	72.3
10	13.2	67.3
11	15.2	77.5
12	16.3	83.2
13	13.9	70.9

Tüm deney sonuçları istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, kırmataş malzemesinin BPI_c 'inin ortalama 14 MPa, tek eksenli sıkışma dayanımının ise 71.5 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu verilere göre dasitlerin, kaya malzemesi için disk makaslama dayanım indeksi sınıflamasında (Ulusay et al., 2001) 'orta-yüksek'

dayanım sınıfına girdiği saptanmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı bir sonraki alt bölümde sunulan ve kaya kütlesinin makaslama dayanımının belirlendiği Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünde girdi parametrelerinden biri olarak dikkate alınmıştır.

6.2.4. Şev duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü parametrelerinin ve eşdeğer Mohr-Coulomb yenilme zarfının belirlenmesi

Baraj gövdesinin yükseltilmesi sırasında kullanılacak olan kırmataş dasitler üst üste yığılacaktır. Bu parçaların yığılması sonucunda köşeli kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan zayıf kenetlenmiş ve aşırı derecede kırıklı bir kaya kütlesi görünümü elde edilecektir. Bu tür kaya kütleleri aynı zamanda pasa yığınlarına da benzemekte olup, bunların makaslama dayanımlarının laboratuvar ölçeğinde yapılacak deneylerle belirlenmesi olanaklı değildir. Ayrıca bu tür malzemelerin dayanım zarfları da doğrusal olmaktan çok eğriseldir. Bu husus dikkate alınarak, kırmataşların Hoek ve Brown (1997) tarafından tanımlanan parçalanmış kaya kütlesi olarak değerlendirilmesi ve makaslama dayanımlarının da Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü kullanılarak belirlenmesi öngörülmüştür.

Hoek-Brown ölçütünün en son versiyonuna (Hoek et al., 2002, Sönmez and Ulusay, 2002) göre, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin yanı sıra, kaya kütlesi sabitleri (a , s , m_b , b_m , b_s) ile örselenme faktörünün (d_f) tayin edilmesi gerekmektedir. GSI'nin ve örselenme faktörünün daha gerçekçi belirlenmesi amacıyla bu çalışmada, ölçütün Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen versiyonunda belirtilen aşamalar izlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle; GSI'nin tayininde hacimsel eklem katsayısı (J_v) ve yapısal özellik puanı (SR), daha sonra süreksizlik yüzey koşulu puanı belirlenmiştir. Bunu izleyen aşamalarda ise, ölçütün gerekli kıldığı diğer parametreler hesaplanarak kırmataşlara ait yenilme zarfı çizilmiştir.

Bir kaya bloğunda aynı süreksizlik setine ait iki süreksizlik, çoğu kez bloğun karşılıklı iki yüzeyinde gözlenmektedir. Birbirine yaklaşık dik konumlu 3 eklem setini içeren bir kaya kütlesinde, altı yüzeyli prizmatik bloklar gelişecektir. Bu

düşünceden hareketle ve pratik bir yaklaşımla bir kaya kütleğinde süreksizlik takımı sayısı, Eşitlik 6.2'den tahmin edilebilir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

$$D_n = N/2 \quad (6.2)$$

Burada;

D_n : Tahmini süreksizlik seti sayısı,

N : Kaya bloğunun yüzey sayısıdır.

Sık eklemlili kaya kütleğinin J_v değeri; kaya kütleğinin homojen ve izotrop olduğı kabul edilerek ve ortalama süreksizlik aralığı (S) esas alınarak Eşitlik 6.3'ten belirlenmektedir (Sönmez and Ulusay, 2002).

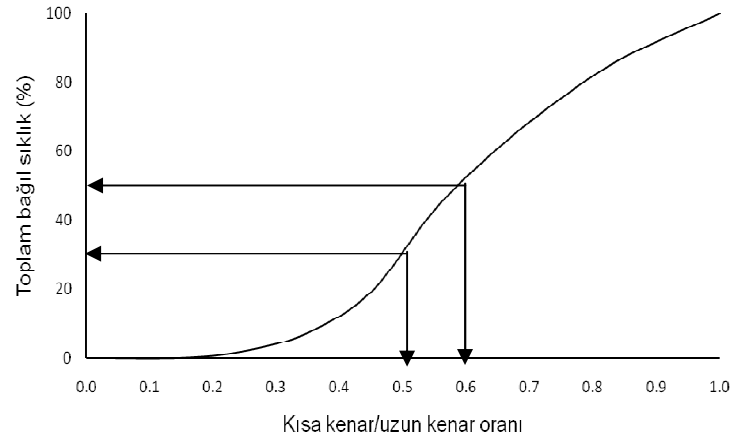
$$J_v = D_n(1/S) \quad (6.3)$$

İşletme civarından alınan 53 adet dasit örneğinin karşılıklı yüzey sayısı belirlenmiştir. Örneklerin karşılıklı yüzey sayısının 3 ile 4 arasında değışmekte olduğı, ancak ağırlıklı olarak 4 yüzeyden oluştğıu saptanmıştır. Buna göre, tahmini süreksizlik seti sayısı (D_n) 4 olarak tayin edilmiştir.

Pasa yığını malzemeleri ve kırmataş yığınlarında GSI için gerekli parametrelerin belirlenmesi amacıyla Sönmez and Ulusay (1999) bu tür yığınlardan alınmış görüntülerin fotoanaliz yöntemiyle değeriendirilmesini önermişler ve uygulamaya yönelik örnekler de vermişlerdir. Bu çalışmada söz konusu yaklaşımdan yararlanılmış ve 5. Bölüm'de değinilen görüntüler fotoanalize tabi tutulmuştur. Kırmataş yığınlarından alınmış ölçekli 6 fotoğrafta 151 adet kaya parçasının “kısa kenar/uzun kenar” oranları saptanmıştır. Oranlar incelendiğinde, parçaların %70'inden fazlasının “kısa kenar/uzun kenar” oranının 0.5'den büyük olduğı belirlenmiştir (Şekil 6.5). Şekil 6.5'ten de anlaşıldığı gibi, oranların büyük bir kısmının 1'e yakın olması nedeniyle, kırmataş malzemesinin homojen olduğı varsayılmıştır. Homojen olduğı varsayılan bu kırmataşların iki boyuttaki kenar uzunluklarının yaklaşık olarak üçüncü boyutta da aynı olduğı kabul edilmiştir. Buna göre, kırmataşların ortalama süreksizlik aralığı (S) yine iki boyutlu fotoanaliz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemde, fotoğraflarda yere paralellik gösteren parçalara numaralar verilerek, uzun kenar-kısa kenar ortalamaları

belirlenmekte (Şekil 6.6) ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalamasının süreksizlik aralığına eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu çalışmada, kırmataşlardan alınan 6 görüntünün değerlendirilmesi sonucunda, uzun kenar-kısa kenar ortalaması olan 0.066 m değeri ortalama süreksizlik aralığı olarak kabul edilmiştir.

Bölüm 5'te değinilen ve dasit kolonlarının kaya yüzleklerinden belirlenen süreksizlik aralığı değerleri kırmataş malzemesinin süreksizlik aralığı değerleriyle karşılaştırıldığında, kırmataş dasit malzemesinin süreksizlik aralığının daha düşük olduğu görülmektedir. Barajın yükseltilmesinde kullanılacak malzemenin dasit kolonlarından elde edilen kırmataş olması nedeniyle, bu çalışmada yapılan duraylılık analizlerde kırmataş malzemesinin fotoanaliz yönteminden elde edilen süreksizlik aralığı değeri esas alınmıştır.



Şekil 6.5. Kırmataş dasitlerin kısa kenar/uzun kenar oranının toplam bağıl sıklığı.



Şekil 6.6. Kırmataş yığınlarına ait parçaların uzun kenar-kısa kenar boyutlarının fotoanaliz yöntemiyle belirlenmesi.

Kırmataş yığınlarının hacimsel eklem sayısı (J_v), belirlenen süreksizlik aralığı ve süreksizlik seti sayısı değerleri kullanılarak Eşitlik 6.3'den 60.6 eklem/m³ olarak saptanmıştır. Sönmez and Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel GSI abağında verilen hacimsel eklem sayısı (J_v)-yapısal özellik puanı (SR) ilişkisinden yararlanılarak SR=8 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.7).

Arazi gözlemlerinde dasitlerin içerdikleri süreksizliklerin az pürüzlü, az-orta derecede bozunmuş, 5 mm'den ince yumuşak kil dolgulu oldukları gözlenmiştir. Bu özellikler dikkate alınarak, dasitlerin süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR) niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'ndan 9 olarak tayin edilmiştir (Şekil 6.8). Süreksizlik yüzey koşulu ve yapısal özellik puanlarına göre Şekil 6.7'deki abaktan GSI 29.5 olarak belirlenmiştir.

Kırmataşların örselenme faktörü (d_f), Kendorski et al. (1983) tarafından tanımlanan örselenme koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Kırmataş malzemesi dasit kolonlarının ekskavatör ile kazılması ve daha sonra kazılan malzemenin kırıcıdan geçmesi sonucu elde edilmektedir. Bu işlemler sonucunda kırmataşlar bir miktar örselenmektedir, ancak kırmataşların gövde dolgu malzemesi olarak kullanımları sırasında sıkıştırılmaktadır. Bu durum, Kendorski et al. (1983)'nin önerdiği örselenme koşullarına göre orta derecede örselenme grubunda yer almakta olup, örselenme faktörü 0.9'dur.

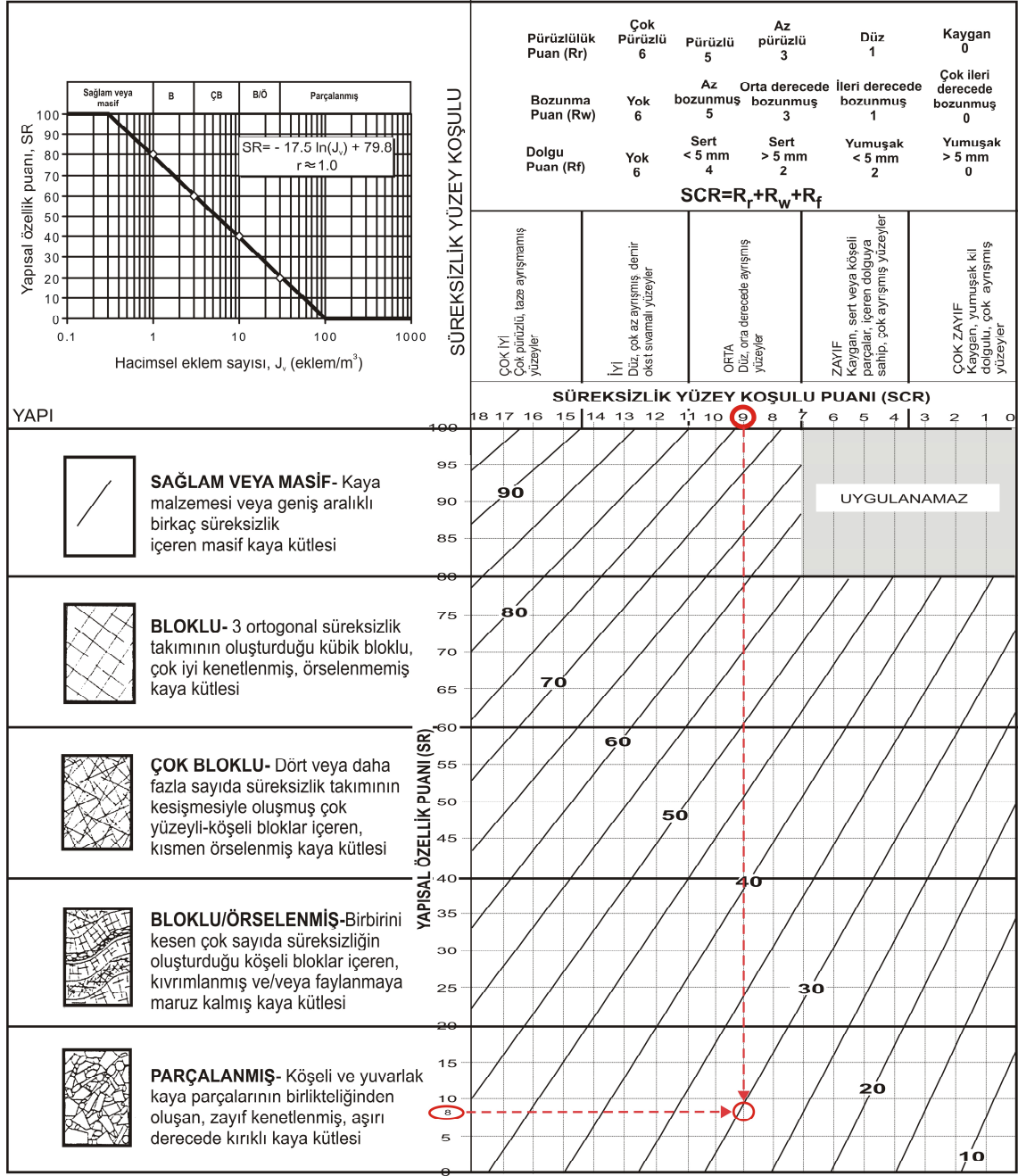
Sönmez ve Ulusay (2002), GSI değerinin 30'dan küçük olması durumunda "a" sabitinin Eşitlik 6.4'ten hesaplanmasını önermişlerdir. Buna göre Eşitlik 6.4 kullanılarak a sabiti 0.5 olarak saptanmıştır.

$$a=65-(GSI/200) \quad (GSI<30) \quad (6.4)$$

b_m ve b_s sabitleri Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen Eşitlik 6.5 ve 6.6'dan yararlanılarak, sırasıyla 16.5 ve 6.55 olarak hesaplanmıştır.

$$b_m= 3.14\ln(d_f/d_f+340(1-d_f))+28 \quad (6.5)$$

$$b_s= 0.67\ln(d_f/d_f+340(1-d_f))+9 \quad (6.6)$$



Şekil 6.7. Niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı (Sönmez and Ulusay, 2002) üzerinde kırmataş malzemesinin GSI değerinin belirlenmesi.

Sönmez and Ulusay (2002) tarafından önerilen Eşitlik 6.7 kullanılarak boyutsuz kaya kütlesi sabiti 's' 2.1×10^{-5} olarak hesaplanmıştır.

$$s = \exp((GSI - 100)/b_s) \quad (6.7)$$

Ölçütün girdi parametrelerinden biri ve kaya malzemesi sabiti olan m_i , üç eksenli deneylere ait σ_1 ve σ_3 veri setlerinin regresyon analizine tabi tutulmasıyla

belirlenmektedir. Ancak, dasitler için tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde uygun örnek hazırlanması ile ilgili sorun üç eksenli deney örnekleri için de geçerli olmuştur. Bu nedenle, söz konusu parametrenin belirlenmesinde yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olan ve Hoek (2007) tarafından önerilmiş m_i çizelgesinden yararlanılmıştır. Bu çizelgede değişik kaya türleri için m_i değerleri verilmiş olup, dasitler için önerilen $m_i=25$ değeri esas alınmıştır. Belirlenen m_i değeri kullanılarak, m_b parametresi Eşitlik 6.8'den 0.35 olarak hesaplanmıştır.

$$m_b = m_i \exp((GSI-100)/b_m) \quad (6.8)$$

Kırmataş malzemesi için belirlenen Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü sabitleri için hesaplan değerler Çizelge 6.4'te verilmiştir. Bu parametreler Niceliksel GSI Sınıflama Sistemi Abağı'na (Şekil 6.7) göre değerlendirildiğinde, kırmataş malzemesi; parçalanmış, köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş ve aşırı derecede kırıklı bir kaya kütlesi olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 6.4. Kırmataş dasit malzemesine ait Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü parametreleri.

Hoek- Brown görgül yenilme ölçütü Parametresi	Değer
J_v (eklem/ m^3)	60.6
SR	8
SCR	9
GSI	29.5
a	0.5
d_f	0.9
b_m	16.5
b_s	6.55
s	2.1×10^{-5}
m_i	25
m_b	0.35

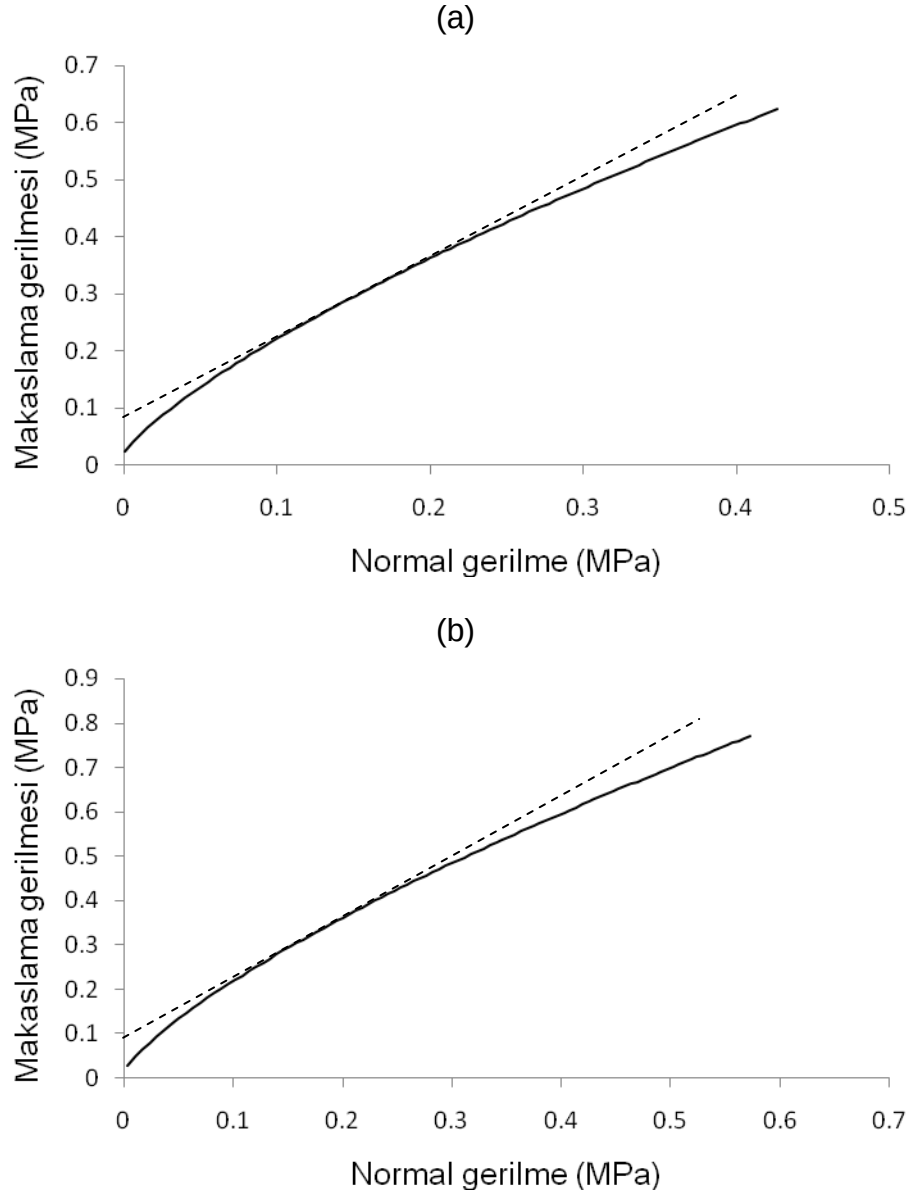
Belirlenen parametreler, atık barajının duraylılığının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen limit-denge analizlerinde kullanılan programın analiz seçeneklerinde bu yenilme ölçütünün yer alması nedeniyle doğrudan girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Aynı amaçla gerçekleştirilen sayısal analizlerde kullanılan program ise, Hoek-Brown yenilme ölçütü parametrelerini kullanarak makaslama dayanımı azalım ilişkisinden güvenlik katsayısını belirleyemediği için, bu parametrelerin kullanılmasıyla belirlenen eşdeğer Mohr-Coulomb yenilme zarfından elde edilen makaslama dayanımı parametreleri girdi parametresi olarak esas alınmıştır.

Dolgu malzemesi için eşdeğer kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri; Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden belirlenen s , m_b , a sabitleri ile laboratuvar deneylerinden belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak, ayrıca dolgu malzemesinin yüksekliği de göz önünde bulundurularak, RockLab v.1.007 (2002) programından tayin edilmiştir. Buna göre, dolgu malzemesinin eşdeğer kohezyonu ve içsel sürtünme açısı eğrisel yenilme zarflarına çizilen teğetlerden, barajın 7 m yükseltilmesi durumunda 80 kPa ve 54° , barajın 10 m yükseltilmesi durumunda 99 kPa ve 52° olarak belirlenmiştir. Dolgu malzemesinin Hoek-Brown parametreleri kullanılarak RockLab 1.0 (2002) programından elde edilmiş normal gerilme-makaslama gerilmesi ilişkisi Şekil 6.8'de sunulmuştur.

6.3. Atık Malzemesinin İndeks ve Jeomekanik Özellikleri

Tez çalışması kapsamında atık barajının mevcut durumunda ve yükseltilmesi koşulunda duraylılığın incelenmesi amaçlandığı için, öncelikle gövdeyi oluşturan malzeme ile yükseltme işleminde kullanılacak malzemenin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, baraj duraylılığı açısından, gövdenin gerisinde biriktirilmekte olan atık malzemesinin gövdeye yapacağı etkinin de şev duraylılığı analizlerinde dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, atık malzemesinin özellikle birim hacim ağırlığının ve makaslama dayanımının bilinmesi, dolayısıyla malzeme özelliklerinin tayin edilmesi gerekli olmaktadır. Bu husus gözetilerek, gevşek zemin malzemesi niteliğine sahip atık malzemesinden alınmış örnekler

üzerinde ASTM (2000) standardında verilen deney yöntemleri izlenerek atığın aşağıda belirtilen bazı indeks ve mühendislik özellikleri tayin edilmiştir.



Şekil 6.8. Dolgu malzemesi için barajın (a) 7 m ve (b) 10 m yükseltilmesi koşullarında için Hoek-Brown parametrelerinden elde edilmiş eşdeğer Mohr-Coulomb eğrisel yenilme zarfları.

6.3.1. Birim hacim ağırlık, nem içeriği ve tane özgül ağırlığı

Atığın makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla üst kottaki atık barajından kesici kalıplar ile alınan örselenmemiş 3 adet örneğin doğal birim hacim ağırlıkları belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 6.5'te verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, atık malzemesinin doğal birim hacim ağırlığının 31.4 ile 34 kN/m³ arasında

değişim gösterdiği saptanmış ve ortalama birim hacim ağırlık 32.6 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. Belirlenen birim hacim ağırlık değerinin yüksek olmasının nedeni atık malzemesinin ağır metal içermesi olduğu düşünülmektedir. Atığın nem içeriği değerleri % 20.1 ile % 25, özgül ağırlık değerleri ise 4.1 ile 4.2 arasında değişim göstermektedir.

6.3.2. Tane boyu dağılımı çözümlmeleri

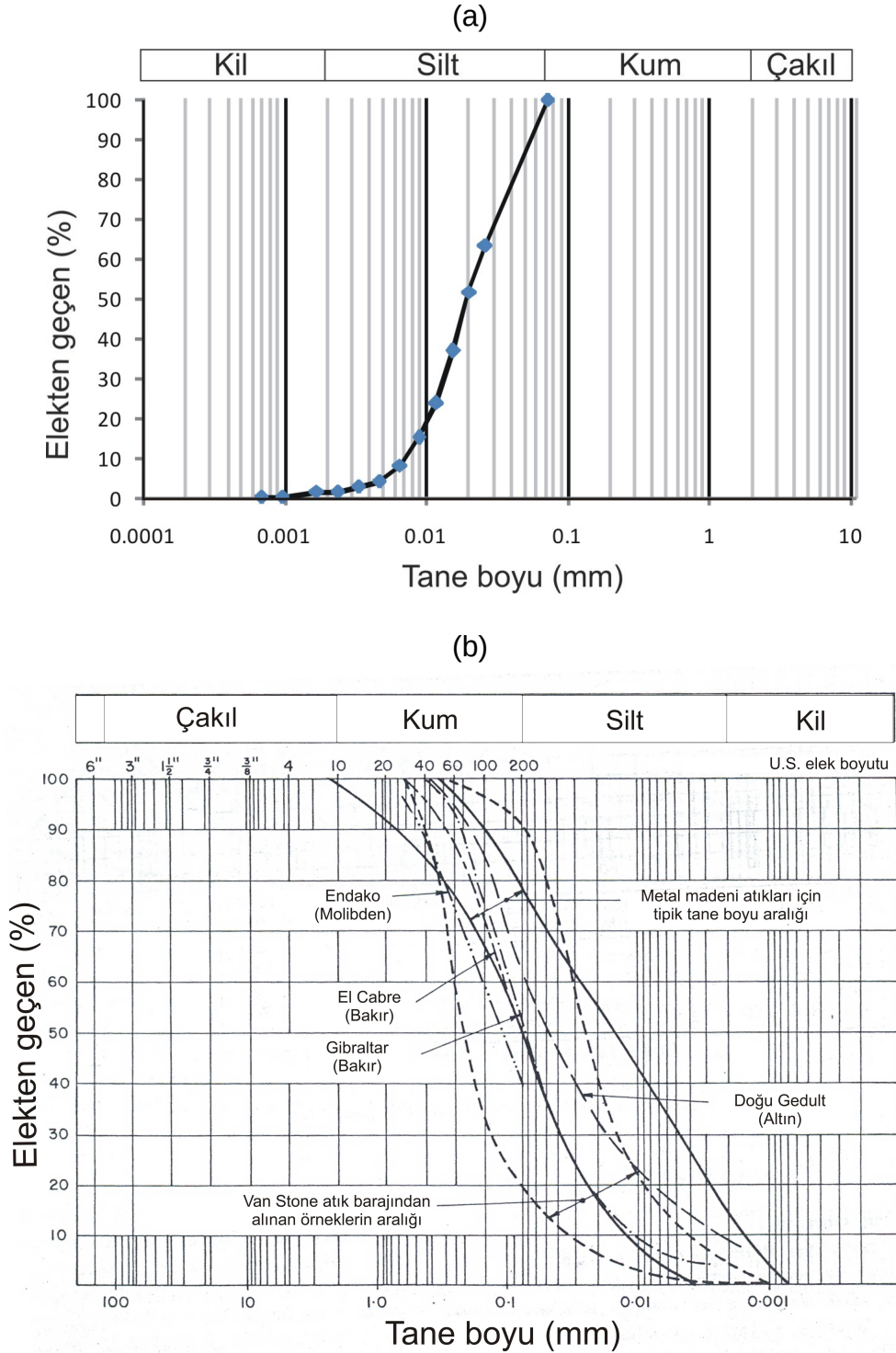
Üst kottaki barajdan alınmış örselenmiş atık örneğinin tane boyu dağılım analizi kuru ince elek ve hidrometre olmak üzere iki farklı aşamada ASTM (2000) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalara göre elde edilen tane boyu dağılımı eğrisi Şekil 6.9a'da sunulmuştur. Buna göre, atığın % 98.4 silt ve %1.6 kil tane boyutunda malzemeden oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 6.9b'de verilen metal madeni cevher atıklarına ait tipik tane boyu dağılımı eğrileri ile karşılaştırıldığında, Şekil 6.9.a'daki Lahanos atık barajı malzemesinin bu eğrilerin alt sınırını temsil eden eğrilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

6.3.3. Kıvam limitleri ve zemin sınıflaması

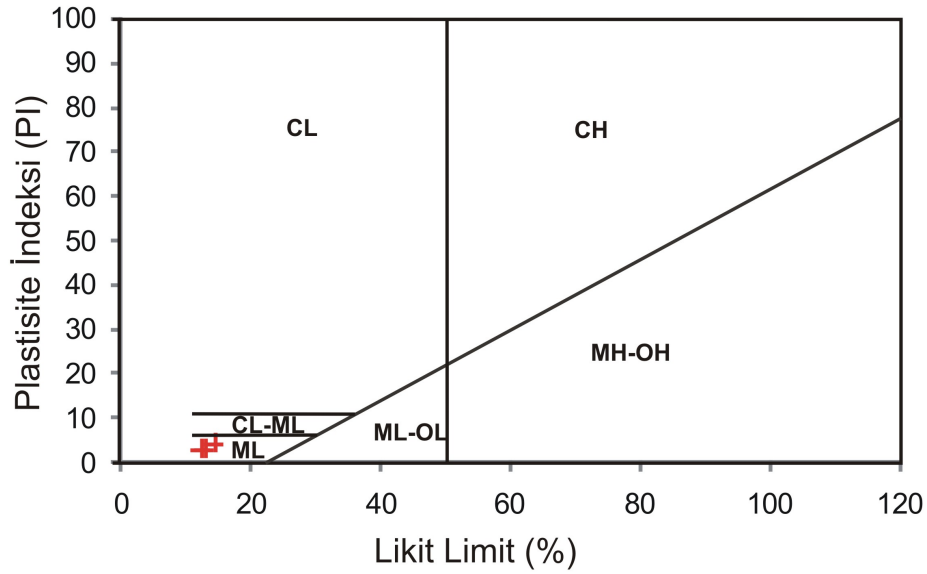
Atık malzemesinin mühendislik sınıflamasının yapılması amacıyla, 3 örnek üzerinde kıvam limitleri (likit limit, plastik limit, plastisite indeksi) tayin edilmiştir. Buna göre, atık malzemesinin likit limitinin %12 ile %15, plastik limitinin %9 ile %10, plastisite indeksinin %3 ile %4 arasında değiştiği ve büzülme limitinin %15 olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.5'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, atık malzemesi plastik olmayan (non-plastic) bir malzemedir.

Atık malzemesinin Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması Sistemi'ne göre sınıflandırılması amacıyla US Interior Bureau of Reclamation (1974) tarafından önerilmiş olan sınıflama ölçütleri kullanılmıştır. Atığın ince tane içeriğinin %50'den fazla olması nedeniyle atık, US Interior Bureau of Reclamation (1974) tarafından önerilen plastisite abağı kullanılarak sınıflandırılmıştır. Örneklerin plastisite abağı üzerindeki dağılımları Şekil 6.10'da verilmiştir. Buna göre, Çizelge 6.5'ten de görüldüğü gibi, atık malzemesi inorganik silt ve çok ince kumlar, kaya tozu, düşük

plastisiteli siltli veya killi ince kumlar olarak tanımlanan ML zemin grubunda yer almaktadır.



Şekil 6.9. (a) Atık malzemesinin tane boyu dağılımı eğrisi, (b) metal madeni cevher atıkları için tipik tane boyu dağılımı eğrileri (CANMET, 1977).



Şekil 6.10. Atık örneklerinin plastisite abağındaki dağılımı.

Çizelge 6.5. Atık malzemesinin fiziksel ve indeks özellikleri.

Örnek No.	w_n (%)	γ_n (kN/m ³)	G_s	Tane Boyu (%)		Kıvam Limitleri (%)			Zemin Sınıfı
				Silt	Kil	LL	PL	PI	
1	20.1	31.4	4.1			14.6	10.3	4.3	ML
2	23.4	32.3	4.2	98.4	1.6	13	10.1	2.9	ML
3	25	34	4.1			12.3	9.3	3.0	ML

w_n : Doğal su içeriği; γ_n : Doğal birim hacim ağırlık; G_s : Özgül ağırlık; LL: Likit limit, PL: Plastik limit; PI: Plastisite indeksi

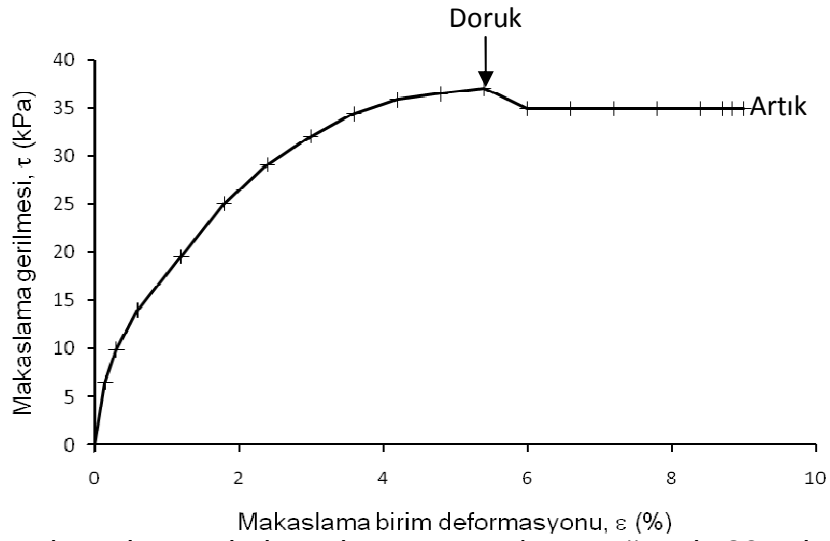
6.3.4. Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri

Atık barajı şevinin duraylılık analizlerinde girdi parametresi olarak kullanılacak atık malzemesine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin belirlenmesi amacıyla, üst kottaki atık barajından alınmış 3 adet örselenmemiş örnek kullanılarak deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Deneyler, deformasyon kontrollü doğrudan makaslama cihazı kullanılarak ve ASTM (2000) standartları dikkate alınarak, konsolidasyonlu-drenajlı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında drenajın sağlanması amacıyla makaslama hızı 0.05 mm/dak olacak şekilde seçilmiştir.

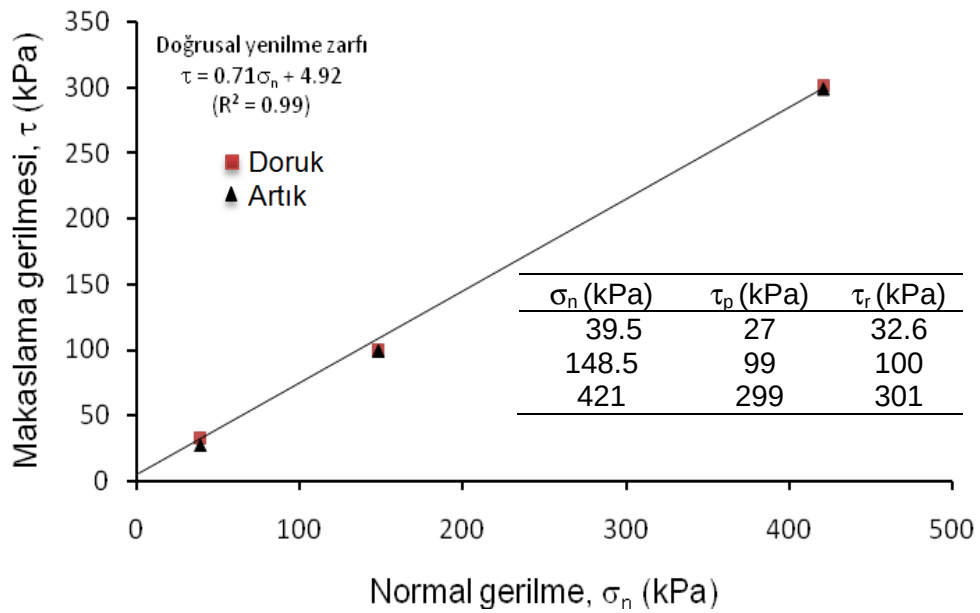
Atık malzemesine ait makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyonu grafiği incelendiğinde, artık makaslama gerilmesinin doruk makaslama gerilmesinden

düşük, ancak bu değere çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 6.11). Tüm örneklerde bu değerlerin birbirine çok yakın olması nedeniyle doruk ve artık makaslama dayanımı zarfları birbirleriyle çakışmıştır (Şekil 6.12).

Elde edilen yenilme zarfına göre, atık malzemesinin kohezyonu 5 kPa, içsel sürtünme açısı 35° olarak belirlenmiştir. Literatürde atık malzemelerinin genellikle kohezyonlu olup, 30° - 36° arasında değişen sürtünme açlarına sahip oldukları belirtilmektedir (CANMET, 1977). Bu çalışmada belirlenen atık malzemesine ait değerler de bu aralıklar içinde yer almaktadır.



Şekil 6.11. Atık malzemesinden alınmış 1 no.lu örneğe ait 39.5 kPa'lık normal gerilme altında makaslama gerilmesi-makaslama birim deformasyon grafiği.



Şekil 6.12. Atık malzemesinin yenilme zarfı.

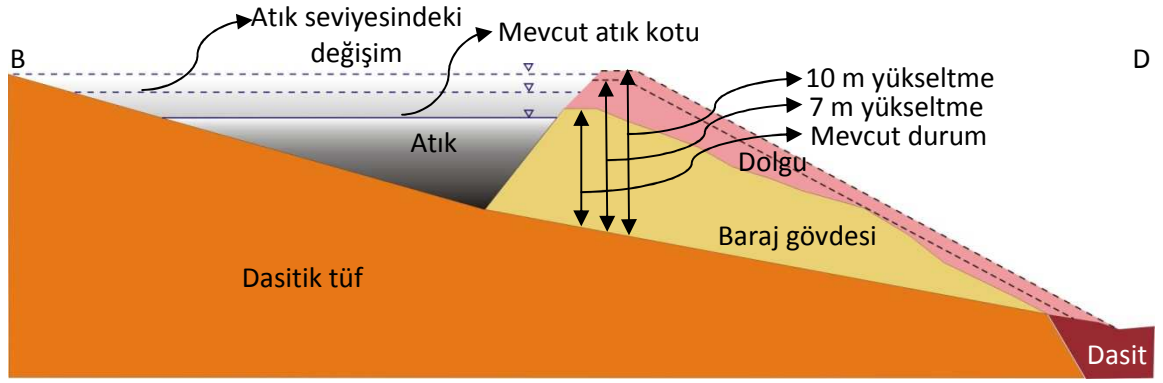
7. ATIK BARAJININ DURAYLILIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Lahanos işletmesinde alt kotta bulunan ikinci atık barajının yüksekliğinin artırılması halinde ve herhangi bir dinamik yük (örneğin deprem) etkisi altında baraj şevinin duraylılığının nasıl değişeceğinin araştırılması amacıyla limit-denge ve sayısal analiz yöntemleri kullanılarak duraylılık analizleri yapılmıştır. Öncelikle, atık barajının mevcut durumunun duraylılığı, daha sonra atık baraj gövdesinin işletmeci kuruluş tarafından 7 m yükseltilmesi düşünülen durumundaki duraylılığı incelenmiştir. Ayrıca, barajın yükselmesiyle artan hacmin gelecekte yetersiz kalması durumunda, gövdenin 3 m daha (toplam 10 m) yükseltilmesiyle duraylılığının nasıl değişeceği de araştırılmıştır. Analizlerde, baraj gövdesinin yükseltilmesinin yanı sıra, rezervuarda depolanan atık miktarının artmasına koşut olarak, atık seviyesinin kotundaki değişim de göz önünde bulundurulmuştur. Doğrultuları Şekil 7.1’de gösterilen ve baraj gövdesinden alınmış 4 kesit üzerinde gerçekleştirilen limit-denge analizlerinde SLIDE v.5.014 (2004), sayısal analizlerde ise PLAXIS V.8.2 (2002) programları kullanılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda verilen alt bölümlerde ayrıntılarıyla sunulmuştur.

7.1. Limit-Denge Analizleri

Atık barajının akış aşağı şevinin eğimi, 3. Bölüm’de değinildiği gibi, belli bir kottan sonra düzensiz olarak artmaktadır (bkz. Şekil 3.6). Bu nedenle, limit-denge analizlerinin tüm baraj gövdesinin duraylılığını yansıtması amacıyla, baraj gövdesinden 20 m aralıklarla 4 kesit alınmıştır (Şekil 7.1). Bu kesitler kullanılarak baraj gövdesinin mevcut durumu ile 7 m ve 10 m yükseltilmesi durumları ve bu koşullarda atık seviyesinin kotundaki değişimler de dikkate alınarak oluşturulan yeni kesitlere “model” adı verilmiştir. 1, 2, 3 ve 4 no.lu kesitler kullanılarak ilk olarak barajın mevcut durumunda atık seviyesinin 468.5 m kotu için 4 model hazırlanmıştır. Daha sonra, bu 4 kesit kullanılarak baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesi durumunda atık kotları 468.5 m, 472.5 m, 475.5 m, 478.5 m için 16 model ve 10 m yükseltilmesi durumunda atık kotları 478 m, 480 m için 8 model oluşturulmuştur. Limit-denge analiz modellerinin oluşturulma aşamaları Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Limit-denge analizleri kapsamında, en kritik şev duraysızlığı türünü belirlemek amacıyla barajın mevcut durumundaki ve yükseltilmesi halindeki akış aşağı şevinin duraylılığı dairesel, çok yüzeyli ötelenmeli ve birleşik kayma olmak üzere farklı duraysızlık türüne göre değerlendirilmiştir. Analizlerde; dairesel kaymalar için Bishop (Bishop, 1954) ve birleşik kaymalar için ise basitleştirilmiş Janbu (Janbu, 1973) yöntemleri kullanılmıştır. Çok yüzeyli ötelenmeli kaymaların (aktif-pasif kama) analizi için U.S. Army Corps. of Engineers (1970), Sarma (1979) ve Huang (1983) tarafından önerilmiş yöntemler kullanılmaktadır. Ancak tez çalışmasında analizler için yararlanılan SLIDE programının analiz yöntemleri seçeneğinde U.S. Army Corps. of Engineers (1970) tarafından çok yüzeyli kaymalar için önerilen yöntem bulunmakta olup, bu yöntem kullanılmıştır.



Şekil 7.2. Analizlerde dikkate alınan atık barajının mevcut durumundan itibaren yükseltilmesi ve atık kotlarının değişimini gösteren şematik kesit (ölçeksiz).

Duraylılık analizlerinde, baraj gövde malzemesi ile atık malzemesinin laboratuvar deneylerinden belirlenmiş olan birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri kullanılmıştır (Çizelge 7.1). Ayrıca, barajın yükseltilmesinde kullanılacak dasit kırmataş malzemesinin deneylerle belirlenen birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ile Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden belirlenen s , m_b , a sabitleri de girdi parametreleri olarak esas alınmıştır (bkz. Çizelge 6.4). Şekil 7.2'den görüleceği gibi, baraj gövdesi dasitik tüflerin üzerinde oturmakta ve barajın topuk kısmı sağlam dasitlere dayanmaktadır. Atık barajının inşası öncesinde baraj alanında dasitik tüflerde ve dasitte herhangi bir sondaj çalışması yapılmamıştır. Bununla birlikte, gerek baraj çevresindeki doğal yamaçlarda yapılan gözlemlere, gerekse işletme yetkililerinden alınan bilgilere göre dasitik tüflerin üst kesimleri kısmen ayrıışmış olup, baraj gövdesinin inşasında

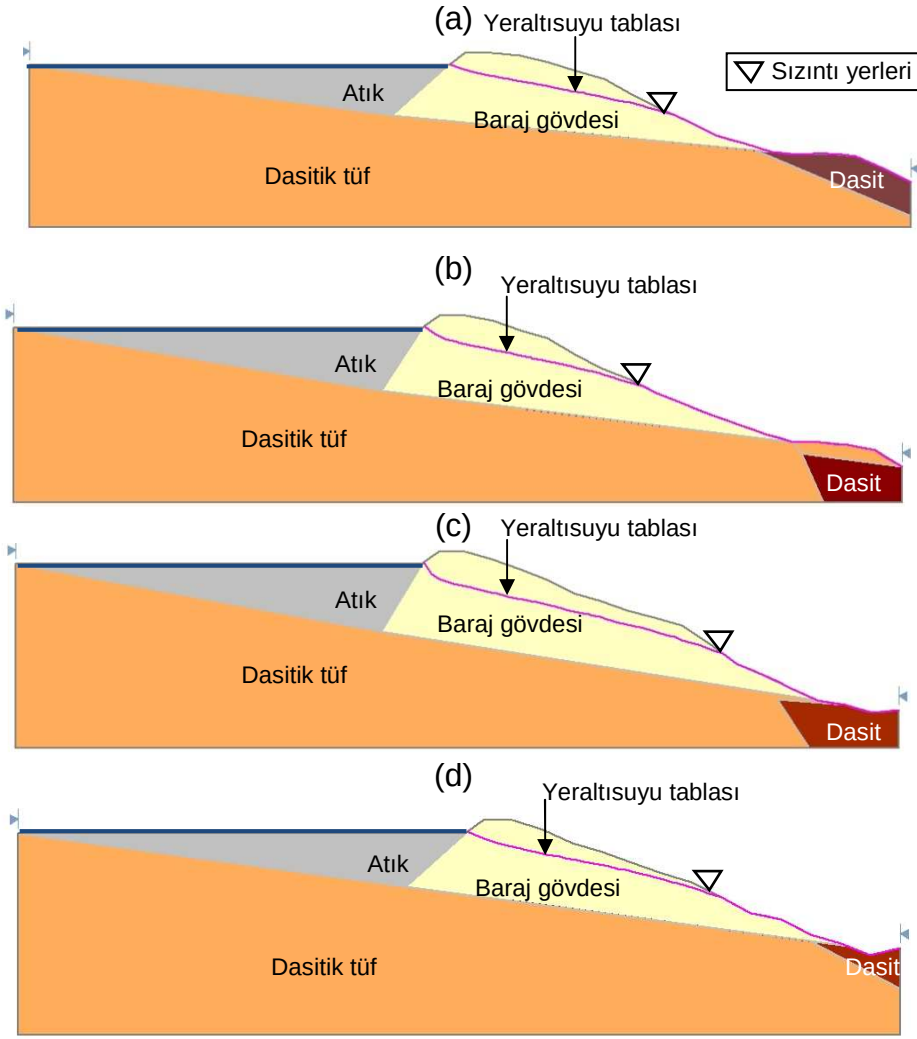
kullanılan dasitik tüflerle benzer özelliğe sahiptirler. Bu durum dikkate alınarak, kayma yüzeyinin baraj gövdesiyle tabandaki dasitik tüf arasındaki dokanaktan geçecek kısımları için Çizelge 7.1’de verilen baraj gövde malzemesine ait jeomekanik parametreler analizlerde dikkate alınmıştır. Barajın topuk kesimindeki çok ufak sağlam dasit kesimi için ise, bu kaya biriminin sağlam kaya niteliğini taşıması nedeniyle SLIDE programının seçeneklerinden biri olan “sonsuz dayanımlı (infinite strength)” seçeneğinden yararlanılmıştır.

Çizelge 7.1. Duraylılık analizlerinde kullanılan gövde ve atık malzemesine ait jeomekanik özellikler.

	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)
Atık malzemesi	32.6	5	35
Gövde malzemesi	20.2	17	34

Baraj gövdesinde daha önce su tablasının konumunu belirleme amaçlı herhangi bir sondaj çalışması yapılmadığı için, yeraltısuyu seviyesinin konumu SLIDE v.5.0 programının sonlu elemanlar yöntemine göre çalışan ‘yeraltısuyu seviyesi analiz’ (groundwater analysis mode) seçeneği kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, analizlerde dikkate alınacak her atık kotu için farklı yeraltısuyu tablası konumları modellenmiştir. Buna göre belirlenen ve Şekil 7.3’te verilen yeraltısuyu tablası konumları incelendiğinde, su tablasının baraj gövdesindeki sızıntıların konumlarıyla (Şekil 7.1) genel olarak uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 7.1 ve 7.3). Ayrıca atık seviyesi yükseldikçe, yeraltısuyu tablasının da yükselmekte olduğu, barajın mevcut durumuna ilişkin analizlerin verildiği Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’ten görülmektedir.

Limit-denge analizleri kapsamında barajın duraylılığı, statik ve dinamik olmak üzere iki farklı koşul için ayrı ayrı incelenmiş ve baraj gövdesi şevi için güvenlik katsayıları belirlenmiştir. Kanada’da madencilik ve atık barajları konusunda yetkili kuruluş olan CANMET (1977), atık barajlarının yenilmesi durumunda çevrenin zarar görmeyeceği bölgelerde, statik ve dinamik koşullar için akış aşağı atık barajı şevlerinin tasarımında kullanılacak güvenlik katsayılarının sırasıyla en az 1.2 ve 1.1 olacak şekilde seçilmesini önermektedir. Belirlenen güvenlik katsayıları CANMET (1977)’e göre değerlendirilmiştir.



Şekil 7.3. Baraj gövdesinden alınan (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 no.lu kesitler için SLIDE programı kullanılarak belirlenen yeraltısuyu tablası konumları.

7.1.1. Statik koşula ilişkin analizler

Baraj gövdesinin mevcut durumu ile gövdenin 7 m ve 10 m yükseltildikten sonraki durumu, değişen atık seviyeleri de dikkate alınarak oluşturulan 28 modelin statik koşullarda limit-denge analizleri yapılarak değerlendirilmiştir. Bu modellerin tümü dairesel kayma türü duraysızlığa göre analiz edilmekle birlikte, en kritik güvenlik katsayısı değerlerini vermesi nedeniyle 3 no.lu kesite ait 7 model çok yüzeyli kayma ve birleşik kayma türlerine göre de analiz edilmiştir. Modellerin analizi sonucunda baraj gövdesi için güvenlik katsayıları hesaplanmış olup, baraj gövdesinden alınan tüm kesitler için belirlenen güvenlik katsayıları Çizelge 7.2’de sunulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde en kritik güvenlik katsayıları 3 no.lu kesit için elde edilmiştir. Bu nedenle, 3 no.lu kesit için yapılan analizlerin sonuçlarına

aşağıda ayrıntılı olarak değinilmiş olup, bu sonuçlar ve diğer kesitlerin analiz sonuçları Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Dairesel kayma türü duraysızlığa göre gerçekleştirilen analizlerde, barajın mevcut durumunda en kritik güvenlik katsayısının 1.15 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kritik kayma dairesinin, baraj gövdesinin planlanandan daha dik bir eğimle inşa edilen kısmından geçtiği Şekil 7.4’ten görülmektedir. Baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesi durumunda, barajda atık depolanmaya başlamadan (atık seviyesi 468.5 m kotu için) önceki güvenlik katsayısı 1.57 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.5a). Barajda atık malzemesinin depolanmaya başlamasıyla güvenlik katsayısının giderek azaldığı ve atık malzemesin 478 m kotuna yükselmesi durumunda güvenlik katsayısının 1.2’ye kadar düştüğü saptanmıştır (Şekil 7.5d). Baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesiyle, barajın mevcut durumuna ilişkin güvenlik katsayısıyla karşılaştırıldığında güvenlik katsayısının artması, yükseltme işlemi sonrası baraj gövdesinin eğiminin mevcut durumdaki baraj gövdesinin eğiminden daha yatık bir açıyla tasarımlanacak olmasından kaynaklanmaktadır. İşletmecî kuruluşun 7 m yükseltme işlemi için hazır bir projesinin bulunması nedeniyle şev açısı bu projede önerildiği gibi alınarak analizlerde kullanılmıştır.

Baraj gövdesinin 10 m yükseltilmesi halinde tasarım açısından uygun güvenlik katsayısının belirlenebilmesi için güvenlik katsayısı-şev açısı ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen analizler sonucunda belirlenen güvenlik katsayıları Çizelge 7.3’te verilmiş olup, bu güvenlik katsayıları dikkate alınarak Şekil 7.6’daki grafikler çizilmiştir. Buna göre, gövde için en uygun şev açısı CANMET (1977) tarafından akış aşağı atık barajları için statik koşullar gözetilerek önerilen güvenlik katsayısı (1.2) dikkate alınarak, 25^0 olarak tayin edilmiştir. Gövdenin 25^0 ’lik açıyla 10 m yükseltilmesi durumunda atık kotu 478 m ve 480.5 m’de iken güvenlik katsayıları sırasıyla 1.3 ve 1.25 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.7).

Lahanos atık barajı mevcut durumuyla birleşik kayma modeline göre analiz edildiğinde güvenlik katsayısı 1.19 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.8a). Barajın 7 m yükseltilmesi durumunda güvenlik katsayısının 1.58 olduğu ve atık kotu yükseldikçe güvenlik katsayısının 1.35, 1.24 ve 1.21 şeklinde azaldığı saptanmış olup, atık kotunun 475.5 m’ye yükselmesi koşulu için gerçekleştirilen analizin

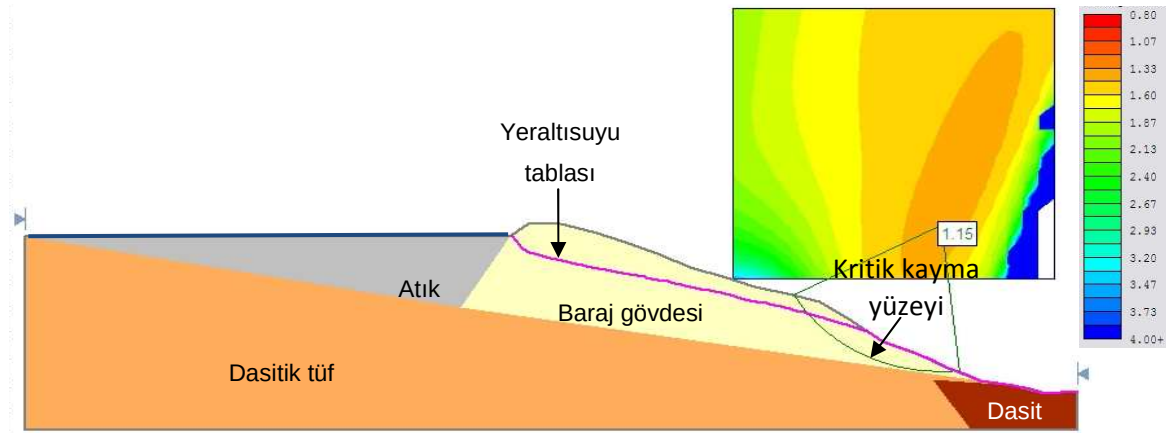
sonucu Şekil 7.8b'de sunulmuştur. Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda ise, iki farklı atık kotu için güvenlik katsayıları sırasıyla 1.30 ve 1.20 olarak belirlenmiştir. Şekil 7.8c'de baraj gövdesinin 10 m yükseltilmesi durumunda atık kotunun 480.5 m'ye ulaşması koşulu için gerçekleştirilen analizin sonucu görülmektedir.

Çizelge 7.2. Farklı üç şev duraysızlığı türü için atık barajı şevinin güncel durumu ile 7 m ve 10 m yükseltilmesi durumlarında farklı atık kotlarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.

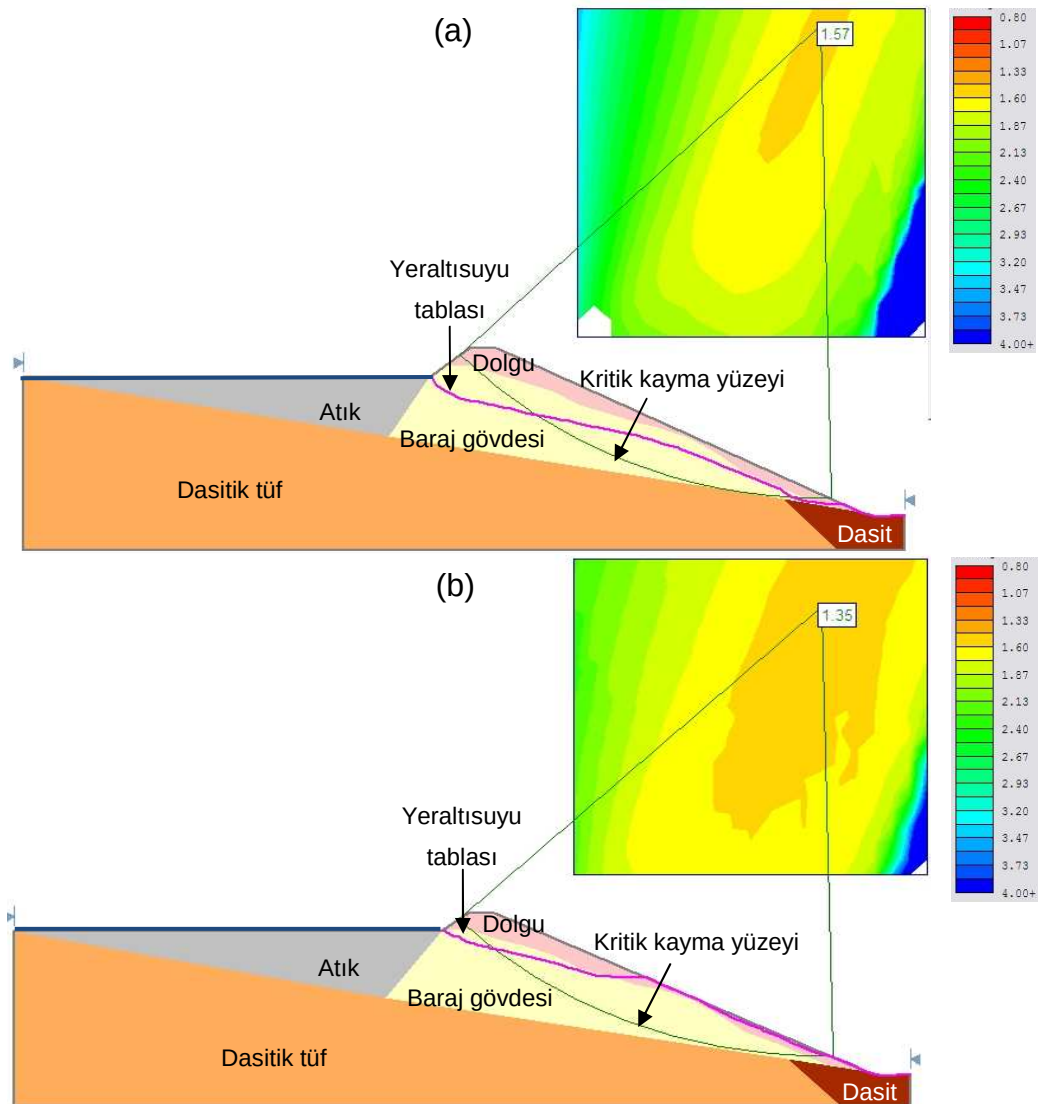
		Kesit no.	Güncel durumda G.K.	7 m yükseltilmesi durumunda G.K.				10 m yükseltilmesi durumunda G.K.	
				Atık kotu (m)				Atık kotu (m)	
				468.5	472.5	475.5	478	478	480.5
Statik Analizler	Dairesel Kayma	1-1'	1.39	2.06	1.79	1.49	1.45	1.78	1.64
		2-2'	1.31	1.97	1.70	1.62	1.39	1.80	1.68
		3-3'	1.15	1.57	1.35	1.26	1.20	1.30	1.25
		4-4'	1.45	1.69	1.50	1.33	1.25	1.44	1.36
	Birleşik Kayma	3-3'	1.19	1.58	1.35	1.24	1.21	1.30	1.20
Dinamik Analizler	Çok Yüzeyle Kayma	3-3'	1.58	1.87	1.66	1.46	1.40	1.58	1.54
	Dairesel Kayma	1-1'	1.27	1.87	1.62	1.37	1.33	1.61	1.49
		2-2'	1.19	1.79	1.55	1.49	1.27	1.63	1.52
		3-3'	1.06	1.44	1.26	1.16	1.11	1.18	1.14
		4-4'	1.31	1.54	1.35	1.23	1.15	1.30	1.23
	Birleşik Kayma	3-3'	1.06	1.45	1.23	1.13	1.10	1.19	1.15
	Çok Yüzeyle Kayma	3-3	1.42	1.68	1.48	1.32	1.26	1.43	1.39

Çizelge 7.3. Statik koşulda dairesel kayma için atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda farklı atık kotları (478 ve 480.5 m) ve şev açılarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.

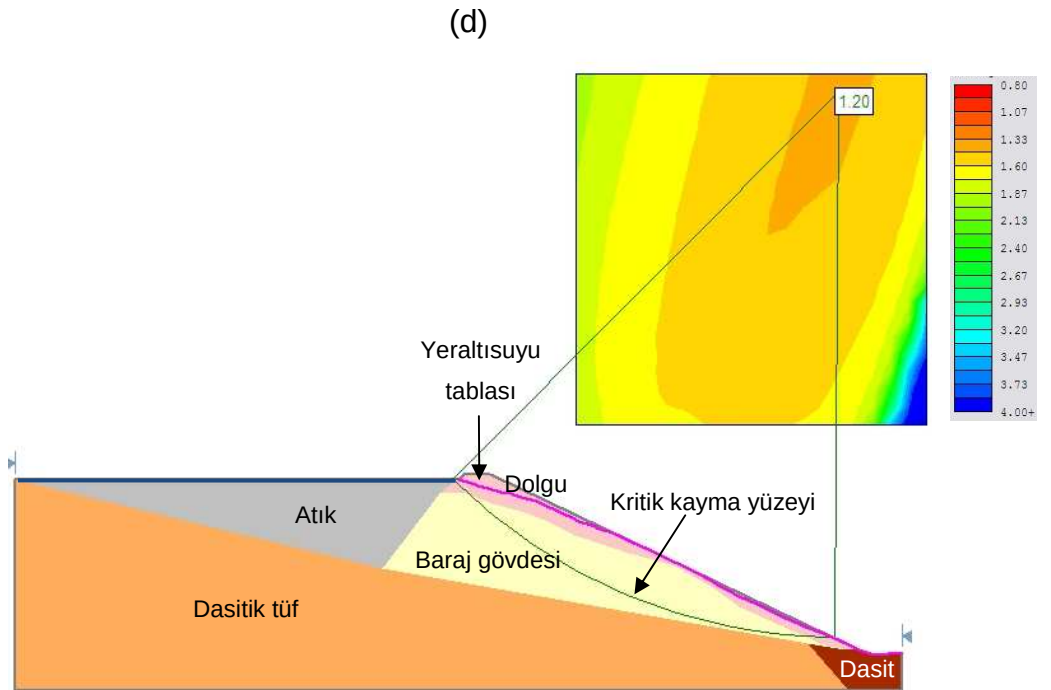
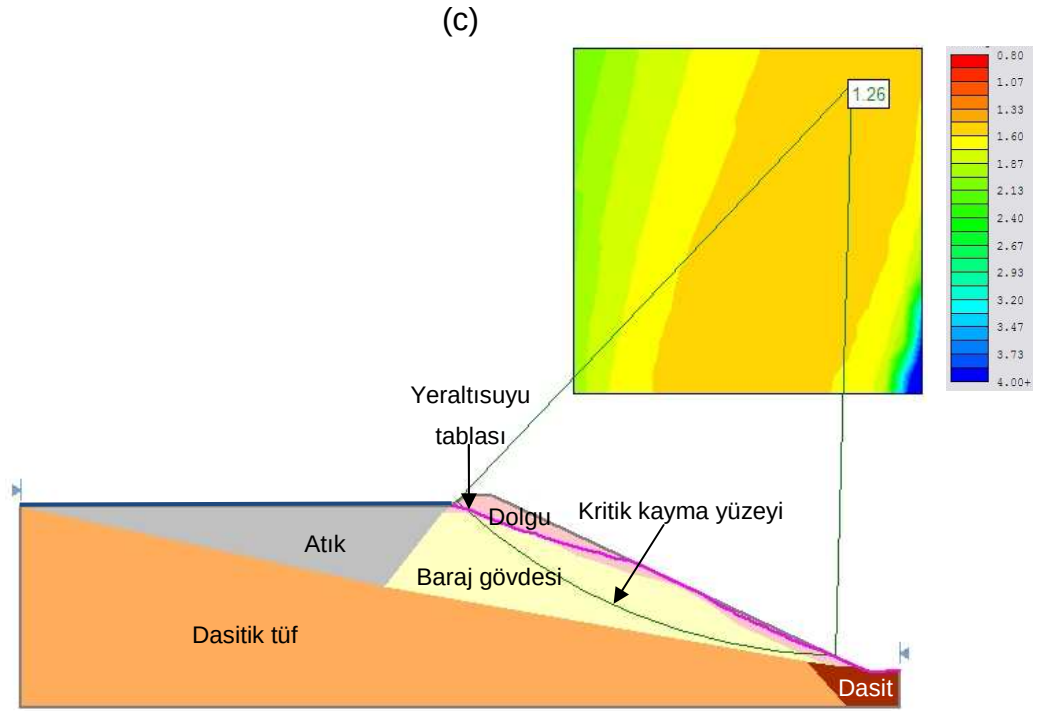
Şev açısı (°)	Atık kotları için GK'ları	
	478 m	480.5 m
25	1.3	1.25
26	1.21	1.16
27	1.15	1.11
28	1.11	1.02



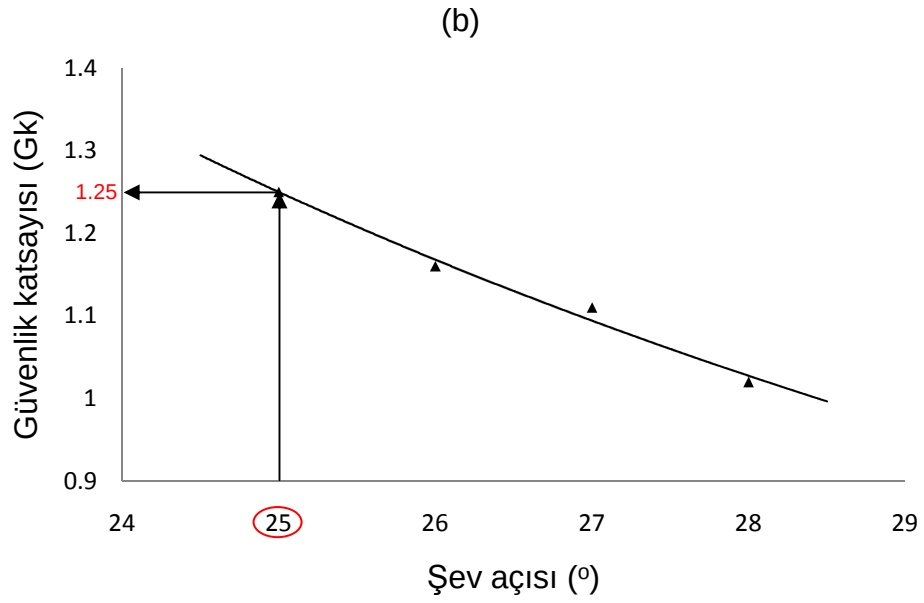
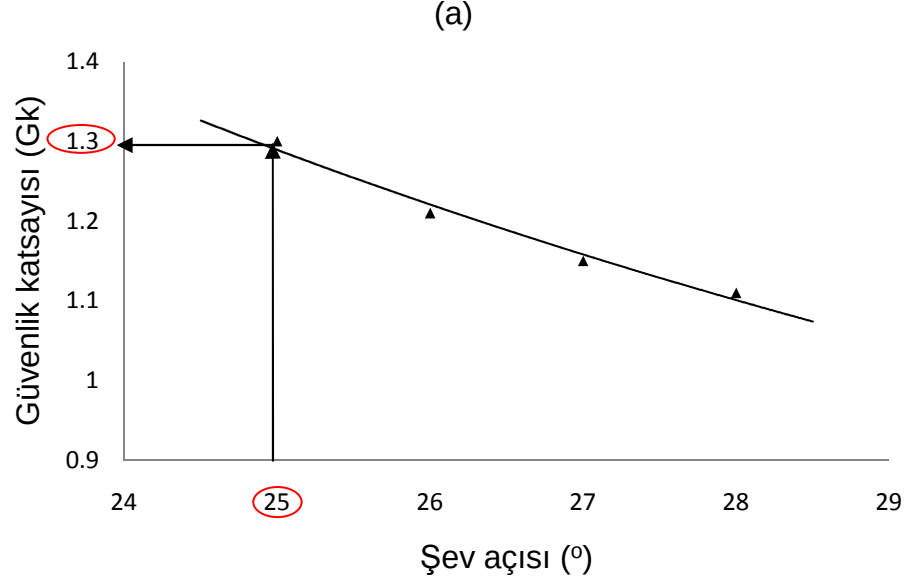
Şekil 7.4. Statik koşullar altında atık barajının mevcut durumu için kesit 3'e ait kritik dairesel yenilme yüzeyi ve güvenlik katsayısı konturları.



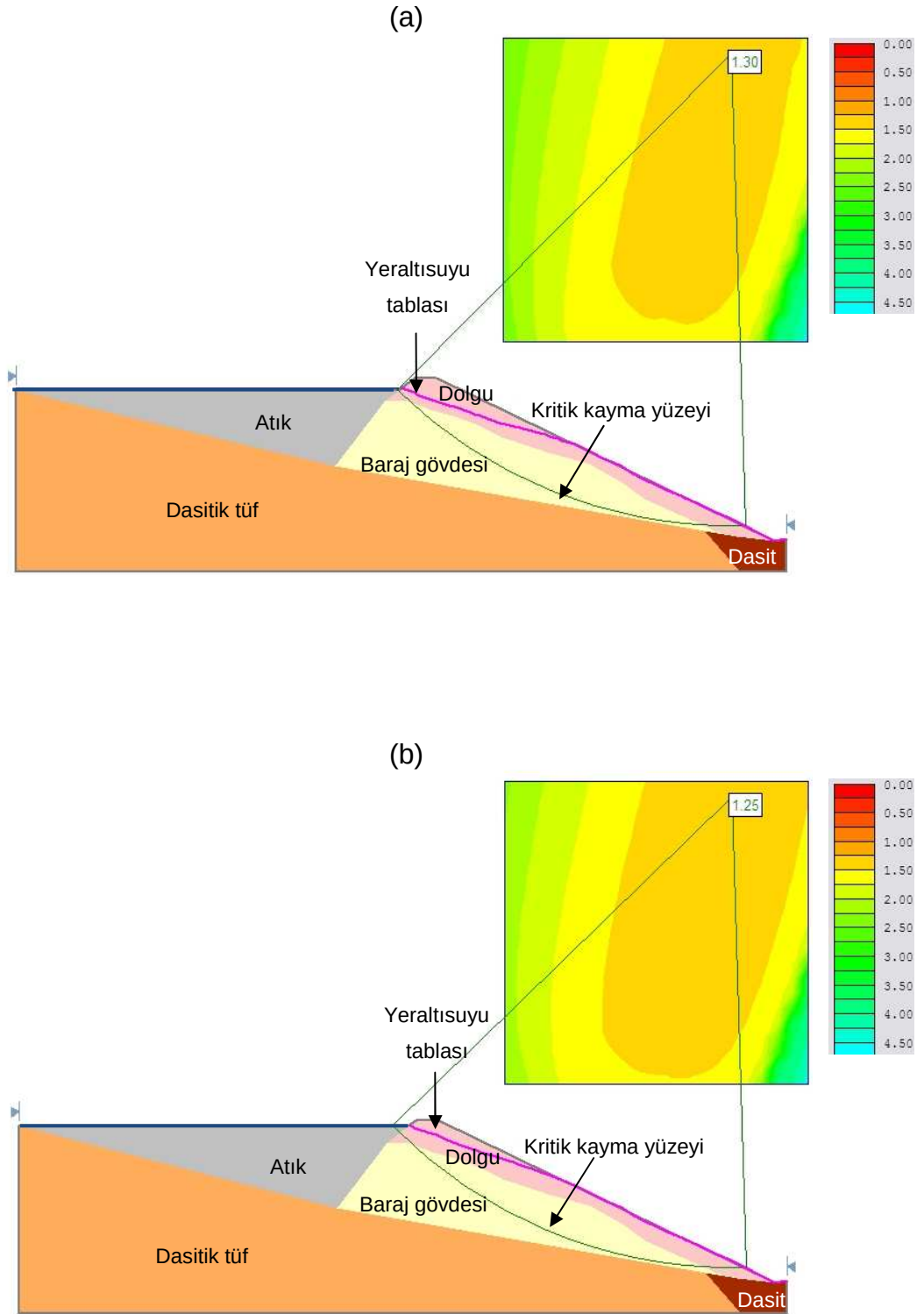
Şekil 7.5. Statik koşullar altında barajın mevcut duruma göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 468.5 m, (b) 472.5 m, (c) 475.5 m, (d) 478 m kotlarına kadar yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel yenilme yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ve kritik güvenlik katsayısına karşılık gelen dairesel kayma yüzeyleri.



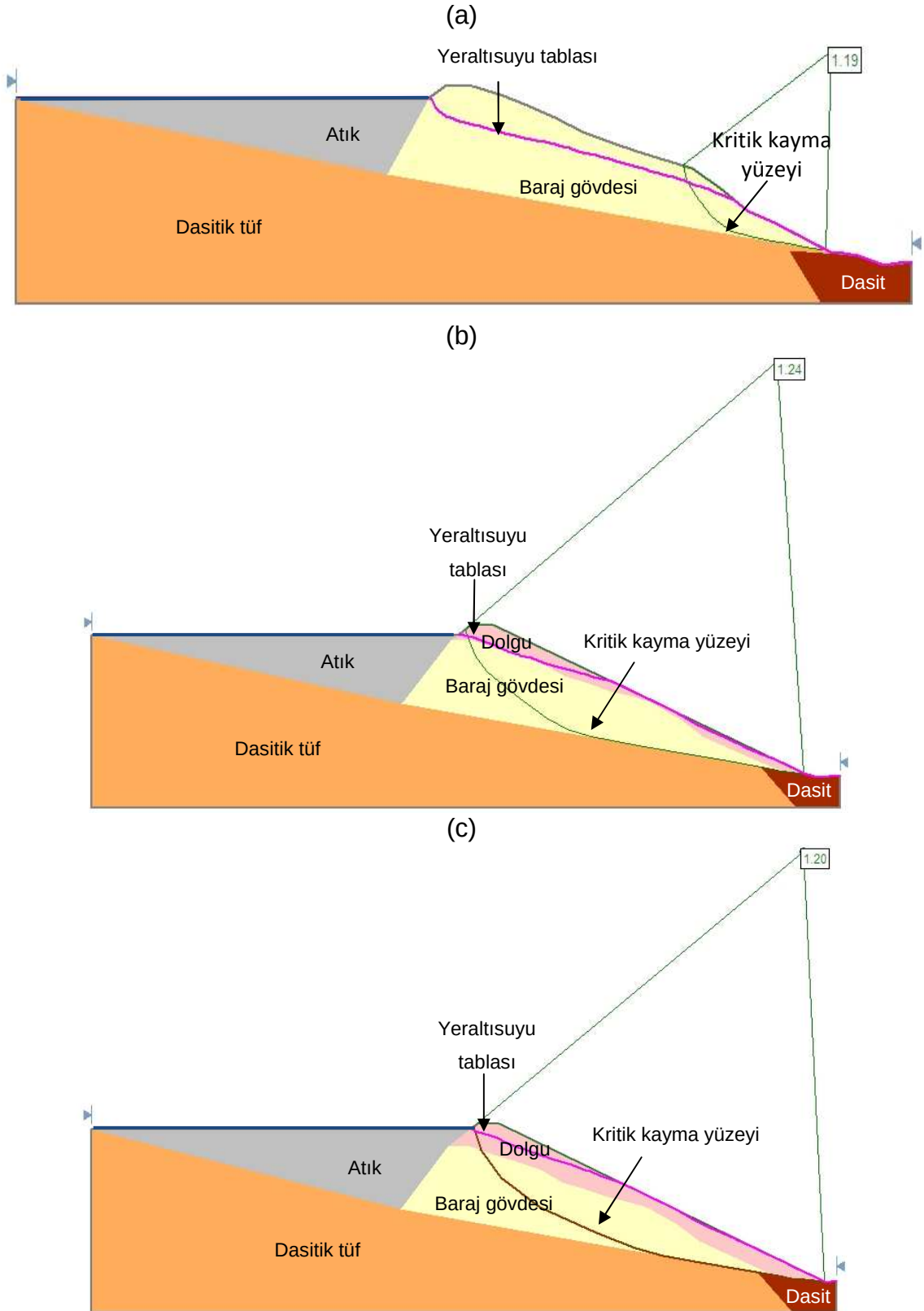
Şekil 7.5. (devam ediyor)



Şekil 7.6. Statik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait şev açısı-güvenlik katsayısı ilişkileri.



Şekil 7.7. Statik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına göre yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel kayma yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ile en küçük güvenlik katsayıları ve bunlara karşılık gelen kritik kayma yüzeyleri.



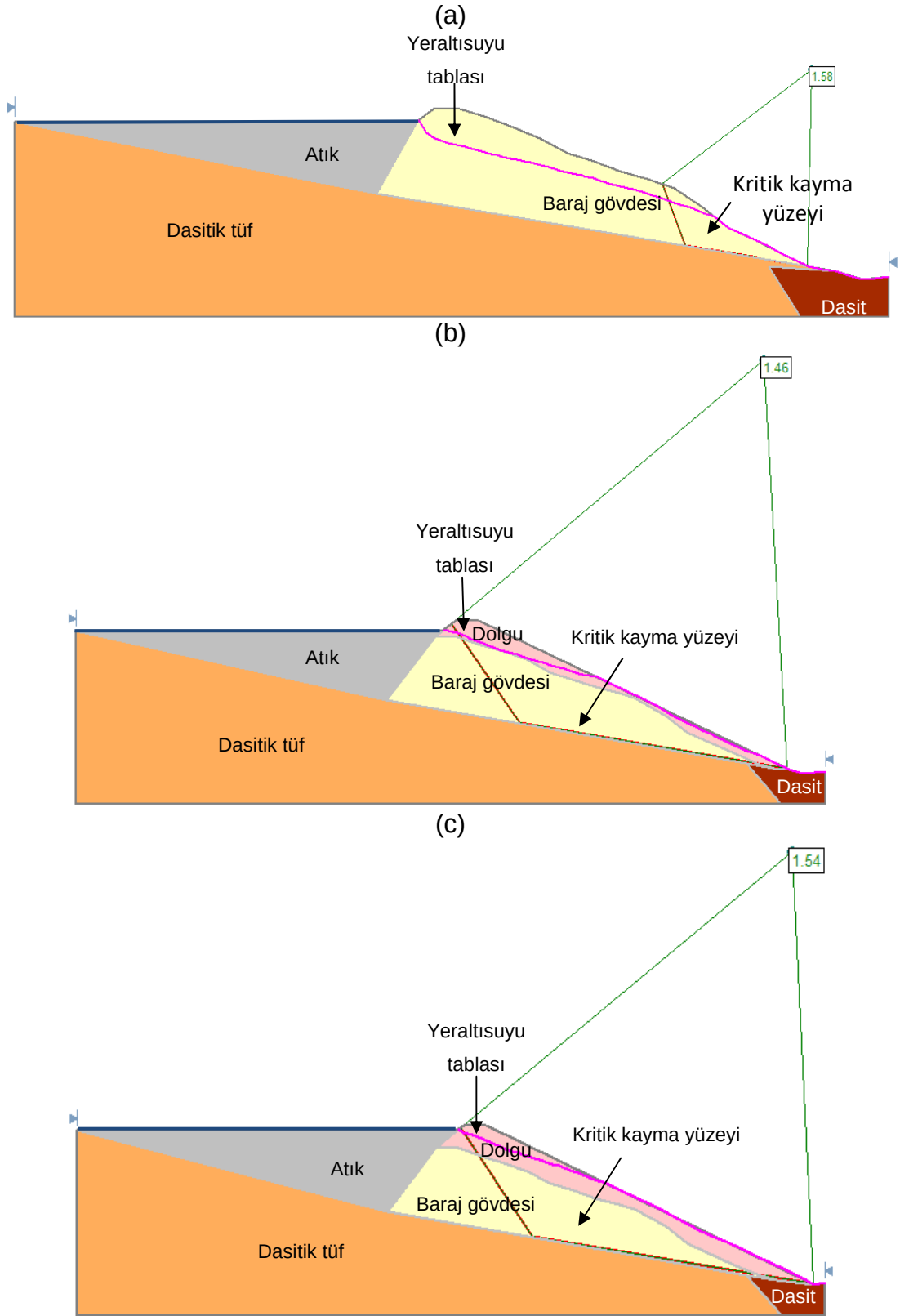
Şekil 7.8. Statik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) yüksekliğinin mevcut konumuna göre 7 m arttırılması ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi durumunda, (c) yüksekliğinin mevcut konumuna göre 10 m arttırılması ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumunda kesit 3'e ait birleşik kayma türüne göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.

Birleşik kayma modeline göre gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen güvenlik katsayılarının, dairesel kayma analizlerinden elde edilenlere çok yakın olduğu Çizelge 7.2'den görülmektedir. Birleşik kayma modeli analizlerinde barajın 7 m yükseltilmesi durumunda atık kotunun 475.5 m ve barajın 10 m yükseltilmesi durumunda atık kotunun 480 m'de olması koşulları için hesaplanan güvenlik katsayılarının dairesel kayma modellerinde hesaplananlara göre biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir (Çizelge 7.2).

Çok yüzeyli ötelenmeli kayma modeline göre gerçekleştirilen analizlerde, atık barajının mevcut durumu için güvenlik katsayısı 1.58 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.9a). Baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesi durumunda güvenlik katsayısının 1.87 olduğu ve rezervuarda atık kotunun yükselmesiyle birlikte güvenlik katsayısının 1.66, 1.46 ve 1.40 şeklinde değişeceği belirlenmiş olup, atık kotunun 475.5 m'ye yükselmesi koşulu için gerçekleştirilen analizin sonucu Şekil 7.9b'de verilmiştir. Gövdenin 10 m yükseltilmesi durumu için belirlenen güvenlik katsayıları ise 478 ve 480.5 m atık kotları için sırasıyla 1.58 ve 1.54'tür. Atık kotunun 480.5 m'ye yükselmesi koşulu için yapılan analiz sonucu Şekil 7.9c'de görülmektedir.

Çok yüzeyli kayma türüne göre analiz edilen modellerin güvenlik katsayıları dairesel ve birleşik yüzeyli kaymalara göre analiz edilen modellerden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Buna göre, en kritik duraysızlık türünün genellikle dairesel ve sadece iki durum için birleşik kayma olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, baraj gövdesi ile dasitik tuf arasındaki dokanağın makaslama dayanımının dasitik tuf ile aynı olmasından kaynaklanmaktadır.

Statik analizler sonucunda barajın mevcut durumuna ait güvenlik katsayıları dışında elde edilen tüm güvenlik katsayılarının CANMET (1977) tarafından önerilen değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre; barajın 7 veya 10 m yükseltilmesi halinde, baraj gövde geometrisinin projede öngörülen şekilde tasarlanması ve su basınçlarında beklenmeyen ani bir artışın olmaması durumunda herhangi bir şev duraysızlığı sorunuyla karşılaşılmayacağı düşünülmektedir.



Şekil 7.9. Statik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi durumunda, (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumunda kesit 3'e ait çok yüzeyli ötelenmeli kayma modeline göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayısı.

7.1.2. Dinamik koşula ilişkin analizler

İncelenen atık barajının bulunduğu bölge, her ne kadar depremsellik açısından kritik bir bölge olmasa da, bu bölgenin güneyinden geçen KAFZ'na ait bir segmentin varlığı nedeniyle, bu segmentin neden olabileceği bir deprem sırasında baraj gövdesinin duraylılığının durumunun da araştırılmasının yararlı olacağı düşünölmüştür. Dolayısıyla söz konusu fay segmentinden kaynaklanabilecek bir depremle ilişkili en büyük yatay yer ivmesi de hesaplanarak, baraj gövdesinin gerek mevcut, gerekse yükseltilmesi koşulundaki durumları için farklı duraysızlık türlerine (dairesele ve birleşik yüzeyli kaymalar) göre limit-denge analizleri yapılarak, şev duraylılığı değerlendirilmiştir. Dinamik koşuldaki duraylılığın araştırılması için, SLIDE v.5.0 programında girdi parametresi olarak gerekli olan inceleme alanının en büyük yatay yer ivmesi (PGA) Ulusay et al. (2004) tarafından önerilen ivme azalım ilişkisi kullanılarak aşağıda anlatıldığı gibi belirlenmiştir.

4. bölümde de değinildiği gibi, inceleme alanına en yakın diri fay KAFZ'nun 5.4 no.lu segmentidir (bkz. şekil 4.8). Türkiye'de meydana gelmiş bazı depremlere ait veriden yola çıkılarak Aydan et al. (2002) tarafından önerilmiş olan "deprem büyüklüğü (M_s) - fay kırığı uzunluğu (L)" ilişkisinden (şekil 7.10) ve söz konusu fayın 310 km uzunluğuunda olduğu dikkate alınarak, fayın yaratabileceği en fazla deprem büyüklüğü M_s 7.9 olarak belirlenmiştir.

İvme azalım ilişkisinde bir girdi parametresi olan depremin moment büyüklüğü (M_w), Ulusay et al. (2004)'nin önerdiği ve Eşitlik 7.1'de verilen yüzey büyüklüğü (M_s)-moment büyüklüğü (M_w) arasındaki ilişkiden yararlanılarak, 7.4 olarak hesaplanmıştır.

$$M_w = 0.6798M_s + 2.0402 \quad (7.1)$$

5.4 no.lu segmentten kaynaklanabilecek olası bir depremin meydana gelmesi durumunda, Lahanos atık barajının depremin merkez üssüne uzaklığı şekil 4.8'den yaklaşık 90 km olarak belirlenmiştir.

İvme azalım ilişkisinde saha koşulu sabitleri olan S_A ve S_B , inceleme alanının kaya zemin olması nedeniyle 0 olarak alınmıştır.

Yukarıda belirlenen parametreler Eşitlik 7.2'de verilen ve Ulusay et al. (2004) tarafından önerilmiş ivme azalım ilişkisinde yerine konarak inceleme alanı için en büyük yatay yer ivmesi 0.07 g olarak belirlenmiştir.

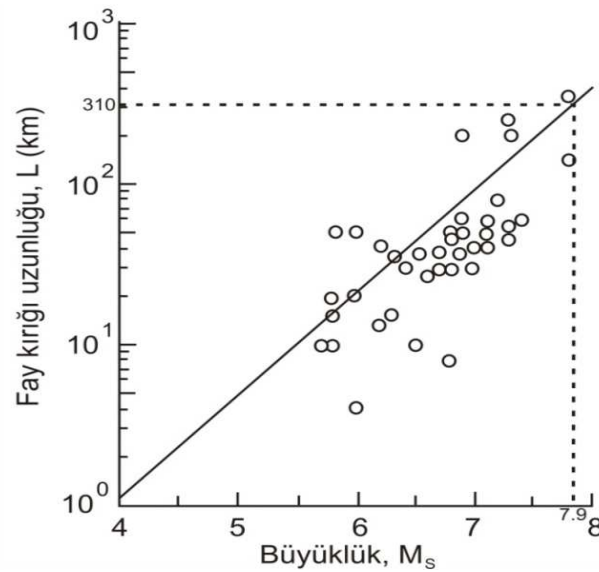
$$PGA = 2.18e^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (7.2)$$

Burada;

M_w : Moment büyüklüğü,

R_e : Merkez üssünden uzaklık (km),

S_A, S_B : Saha koşulu (Kaya zeminler için, $S_A=S_B=0$, toprak zeminler için $S_A=1$ $S_B=0$, yumuşak toprak zemin $S_A=0$ $S_B=1$) olarak verilmiştir.



Şekil 7.10. Fay kırığı uzunluğu ve deprem büyüklüğü (M_s) arasındaki ilişki (Aydan et al., 2002).

Abramson et al. (1996), mühendislik tasarımlarının (köprü, baraj vb.) ekonomik olması amacıyla şevlerin dinamik duraylılık analizlerinde, en büyük yatay yer ivmesi değerinin güvenlik katsayısının 1'den büyük olması koşuluyla, Hynes-Griffin and Franklin (1984)'e göre $PGA/2$ olarak kullanılabileceğini belirtmektedirler. Bu bilgiler ışığında, inceleme alanındaki en büyük yatay yer ivmesi, Lahanos atık barajının yerleşim yerlerinden uzak olması da dikkate alınarak, 0.035 g olarak alınmıştır.

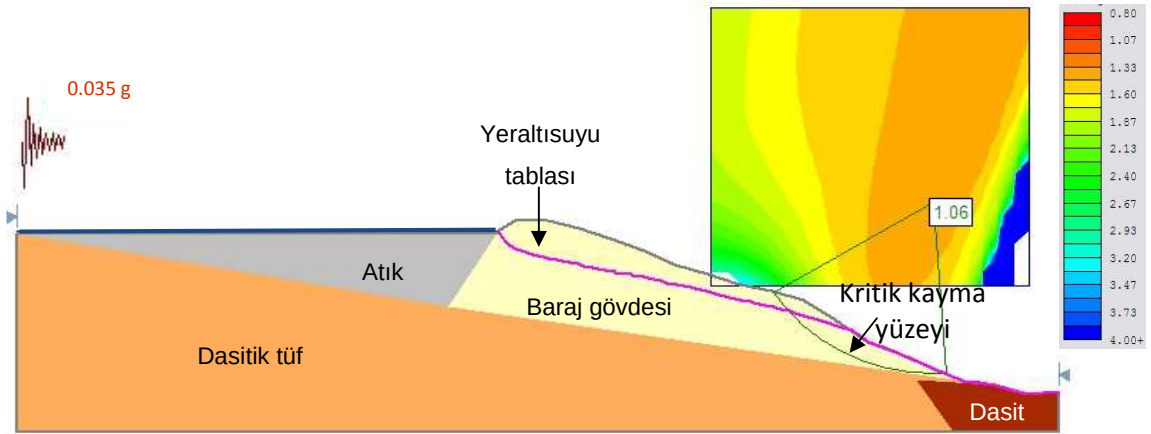
Statik analizlerde olduğu gibi, dinamik duraylılık analizleri de dairesel, birleşik ve çok yüzeyli kayma türlerine göre gerçekleştirilmiştir. Dairesel kayma türüne göre yapılan analizlerde baraj gövdesinden alınan 1, 2, 3 ve 4 no.lu kesitler kullanılırken, diğer iki kayma türü için yapılan analizlerde en kritik güvenlik katsayılarını veren 3 no.lu kesit kullanılmıştır. 3 no.lu kesite ait analizlerin sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmış olup, tüm sonuçlar Çizelge 7.2’de sunulmuştur.

3 no.lu kesit kullanılarak dairesel kayma için gerçekleştirilen analizlerde, barajın güncel durumunda en kritik güvenlik katsayısının 1.06 olduğu Şekil 7.11’de görülmektedir. Barajın 7 m yükseltilmesi durumunda güvenlik katsayısı 1.44 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, baraj gövdesinin gerisinde atık kotunun yükselmesine bağlı olarak (472.5, 475.5 ve 478 m) güvenlik katsayısının 1.26, 1.16, 1.10 olarak azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 7.12b-d).

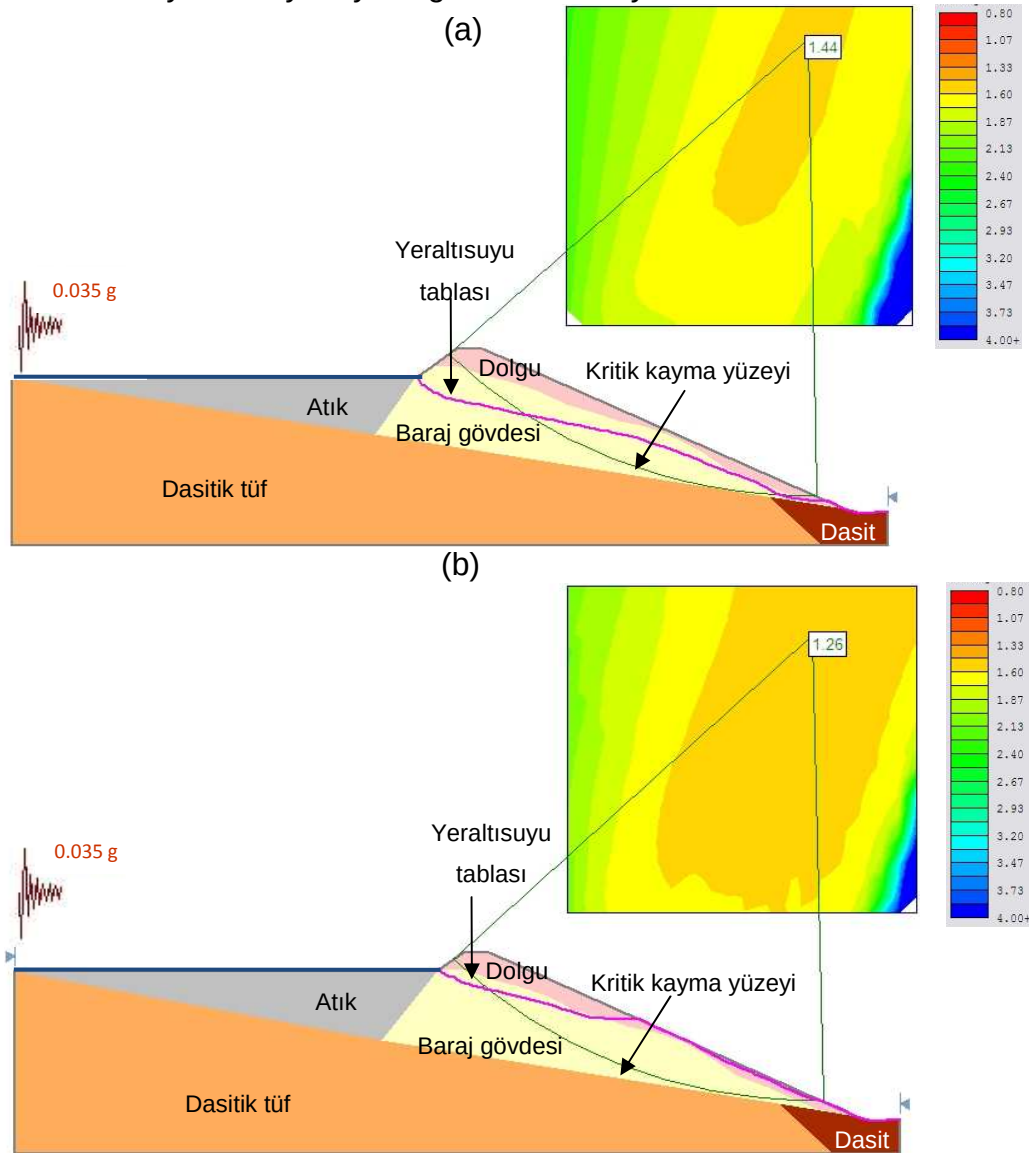
Statik analizlerde olduğu gibi, baraj gövdesinin 10 m yükseltilmesi işleminin farklı eğimlerde gerçekleştirilmesi durumunda güvenlik katsayısı-şev açısı ilişkisi dinamik koşulda da incelenmiştir (bkz. Şekil 7.6). Bu amaçla gerçekleştirilen analizler sonucunda belirlenen güvenlik katsayıları Çizelge 7.4’te verilmiş olup, bu güvenlik katsayıları dikkate alınarak Şekil 7.13’deki grafikler çizilmiştir. Buna göre, CANMET (1977) tarafından dinamik koşul gözetilerek atık barajları için önerilen güvenlik katsayısı (1.1) dikkate alındığında, uygun şev açısı 25° olarak belirlenmiştir. Barajın 25° ’lik açıyla 10 m yükseltilmesi durumunda 478 m ve 480.5 m’lik atık kotları için güvenlik katsayıları sırasıyla 1.18 ve 1.14 olarak belirlenmiştir (Şekil 7.14).

Çizelge 7.4. Dinamik koşulda dairesel kayma için atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda farklı atık kotları (478 ve 480.5 m) ve şev açılarına göre hesaplanmış güvenlik katsayıları.

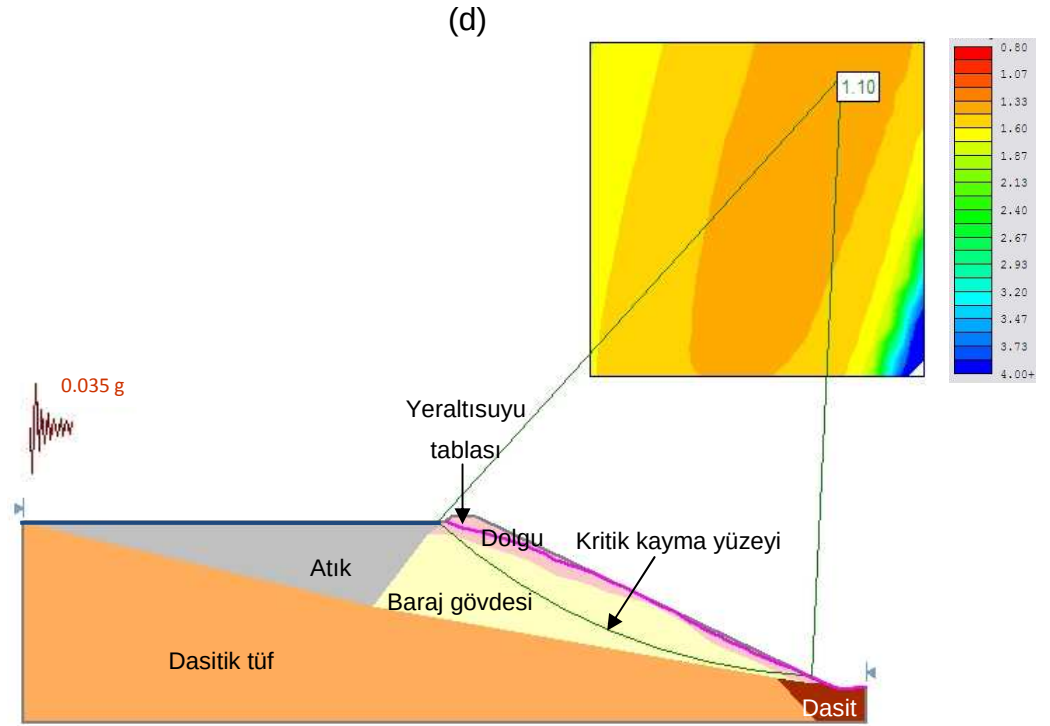
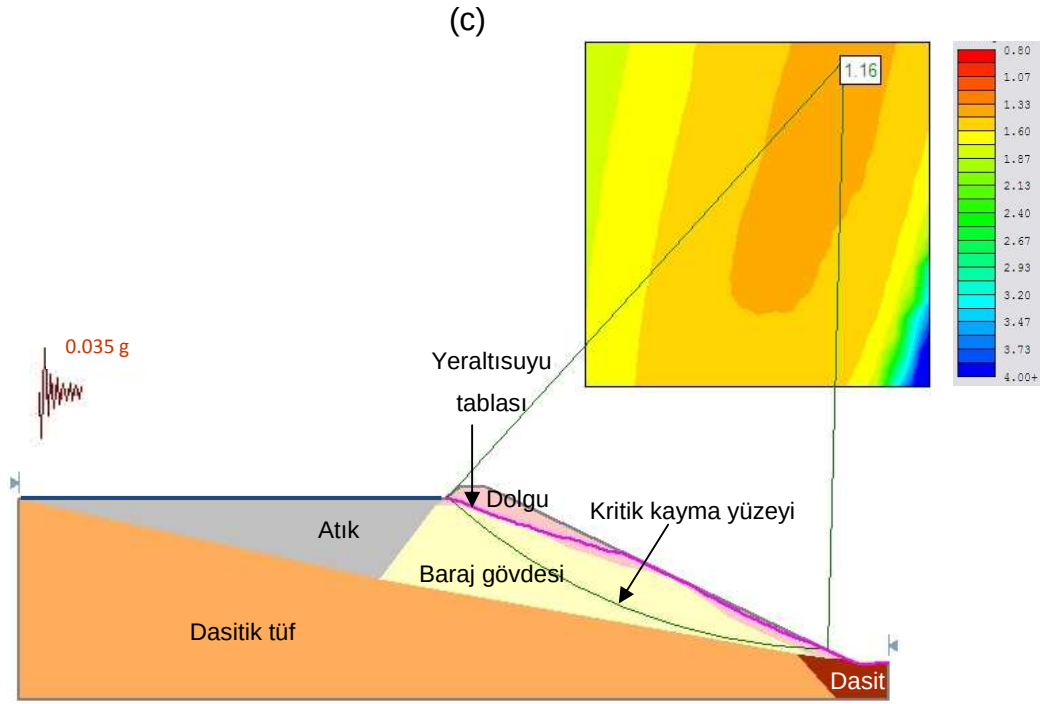
Şev açısı ($^{\circ}$)	Atık Kotları için GK’ları	
	478 m	480.5 m
25	1.18	1.14
26	1.10	1.06
27	1.03	0.99
28	0.97	0.93



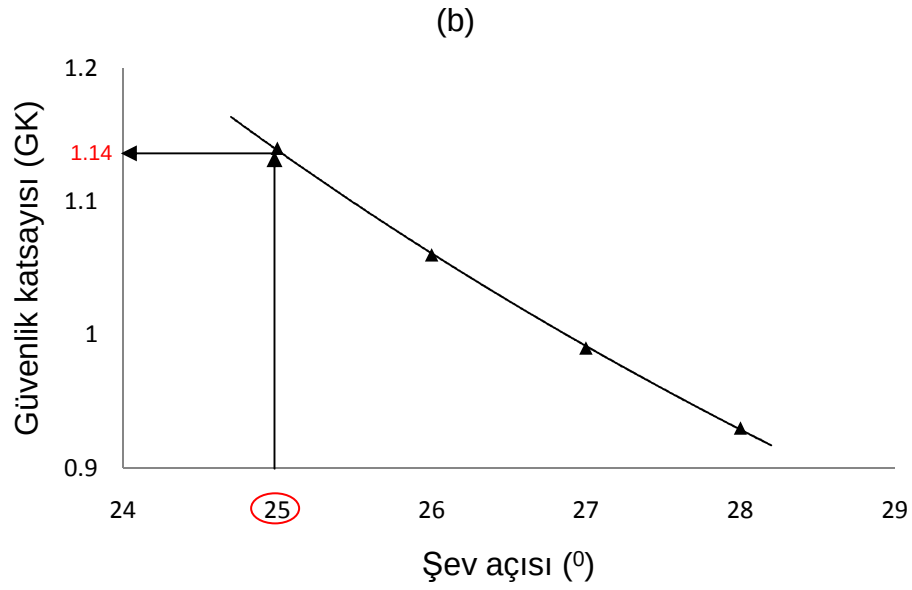
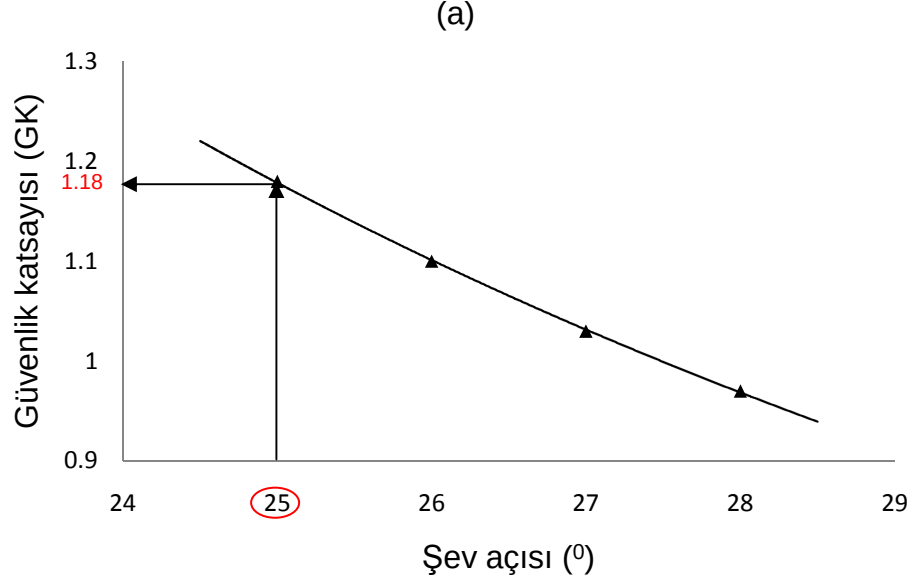
Şekil 7.11. Dinamik koşulda, atık barajının mevcut durumu için kesit 3'e ait kritik dairesel yenilme yüzeyi ve güvenlik katsayısı konturları.



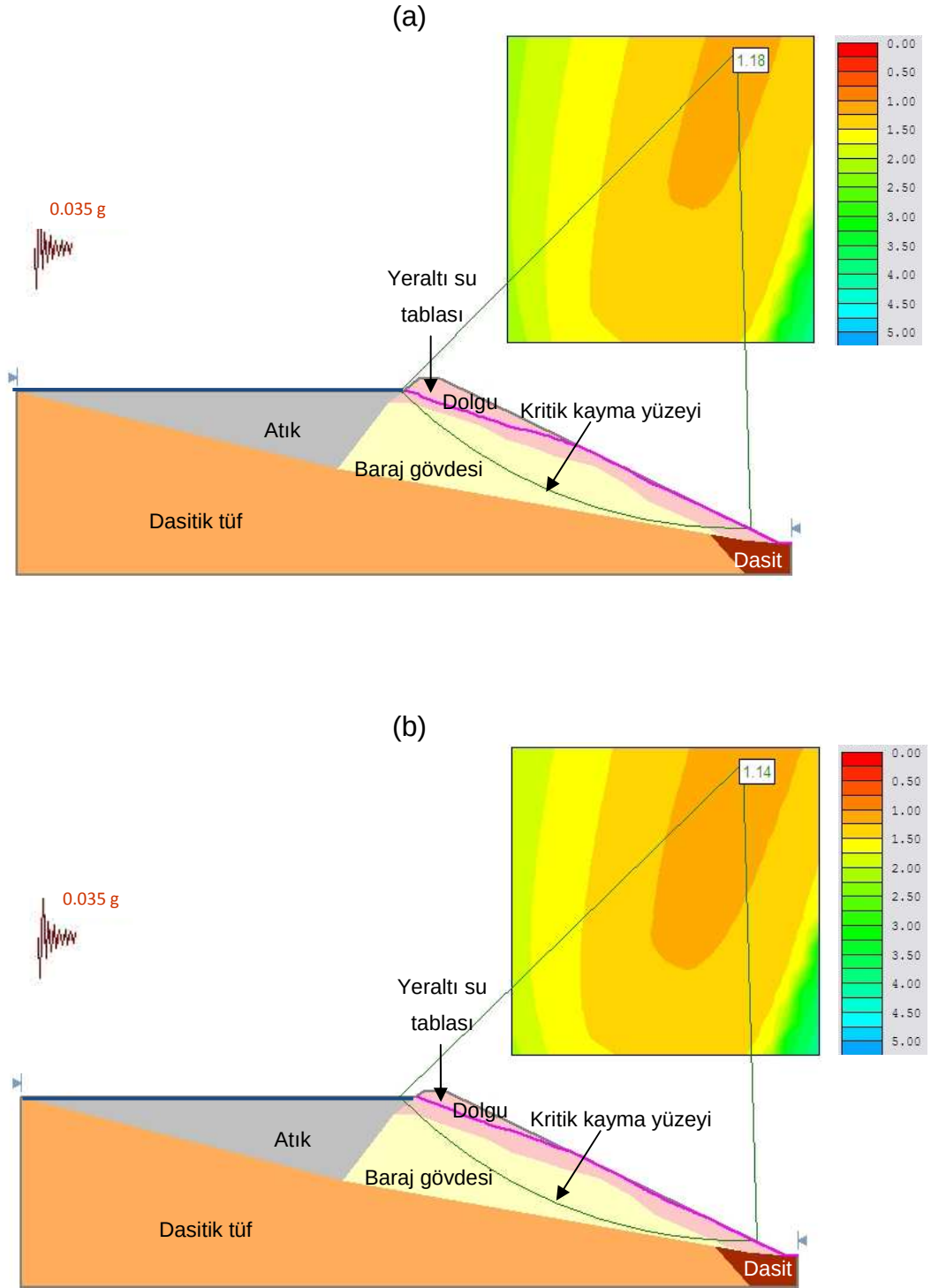
Şekil 7.12. Dinamik koşullar altında barajın mevcut duruma göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 468.5 m, (b) 472.5 m, (c) 475.5 m, (d) 478 m kotlarına kadar yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel yenilme yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ve en küçük güvenlik katsayılarına karşılık gelen dairesel kayma yüzeyleri.



Şekil 7.12 (devam ediyor)



Şekil 7.13. Dinamik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m, (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait şev açısı-güvenlik katsayısı ilişkileri.

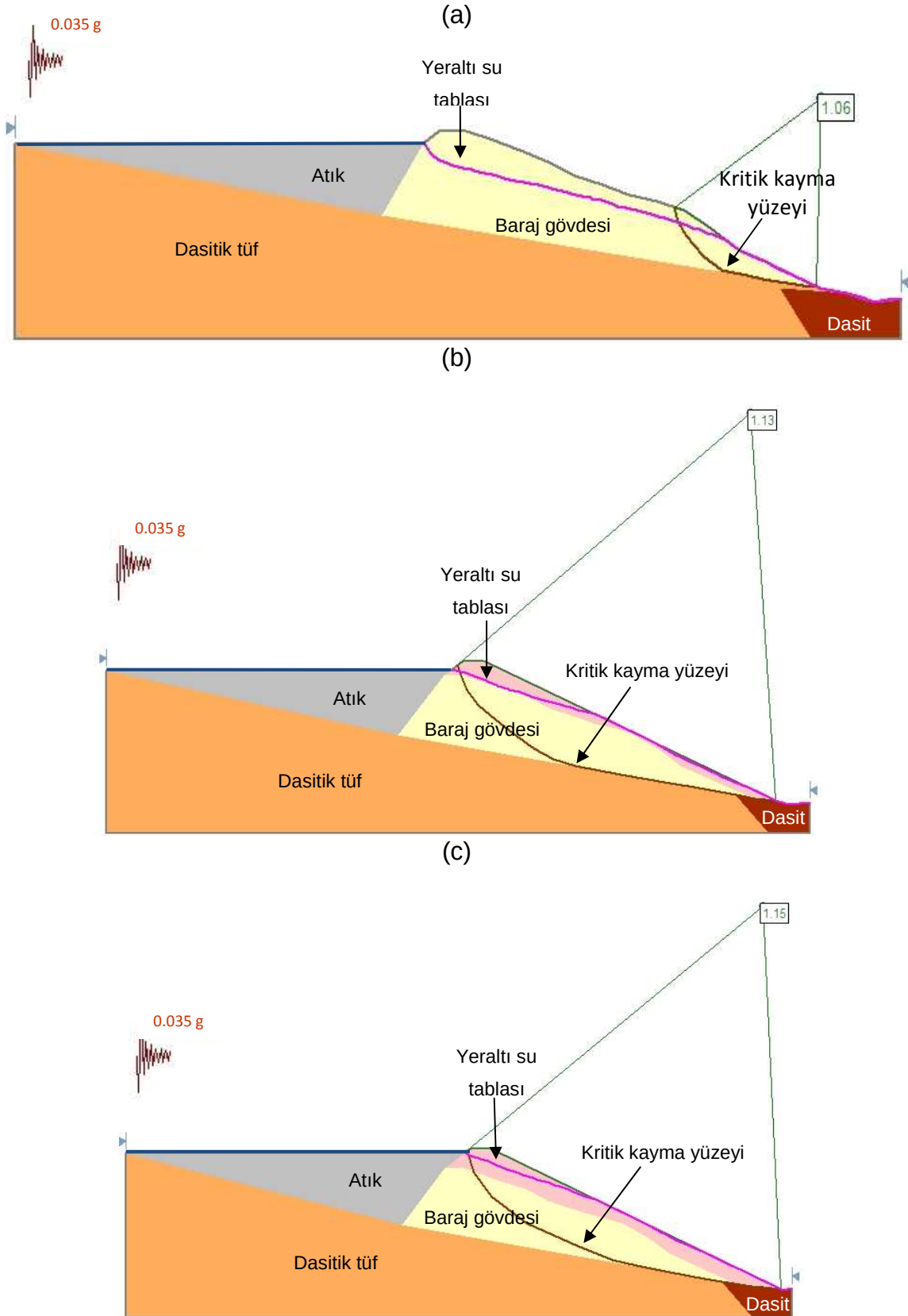


Şekil 7.14. Dinamik koşullar altında atık barajının mevcut duruma göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin (a) 478 m ve (b) 480.5 m kotlarına yükselmesi durumunda kesit 3'e ait dairesel kayma yüzeyleri için güvenlik katsayısı konturları ile en küçük güvenlik katsayıları ve bunlara karşılık gelen kritik kayma yüzeyi.

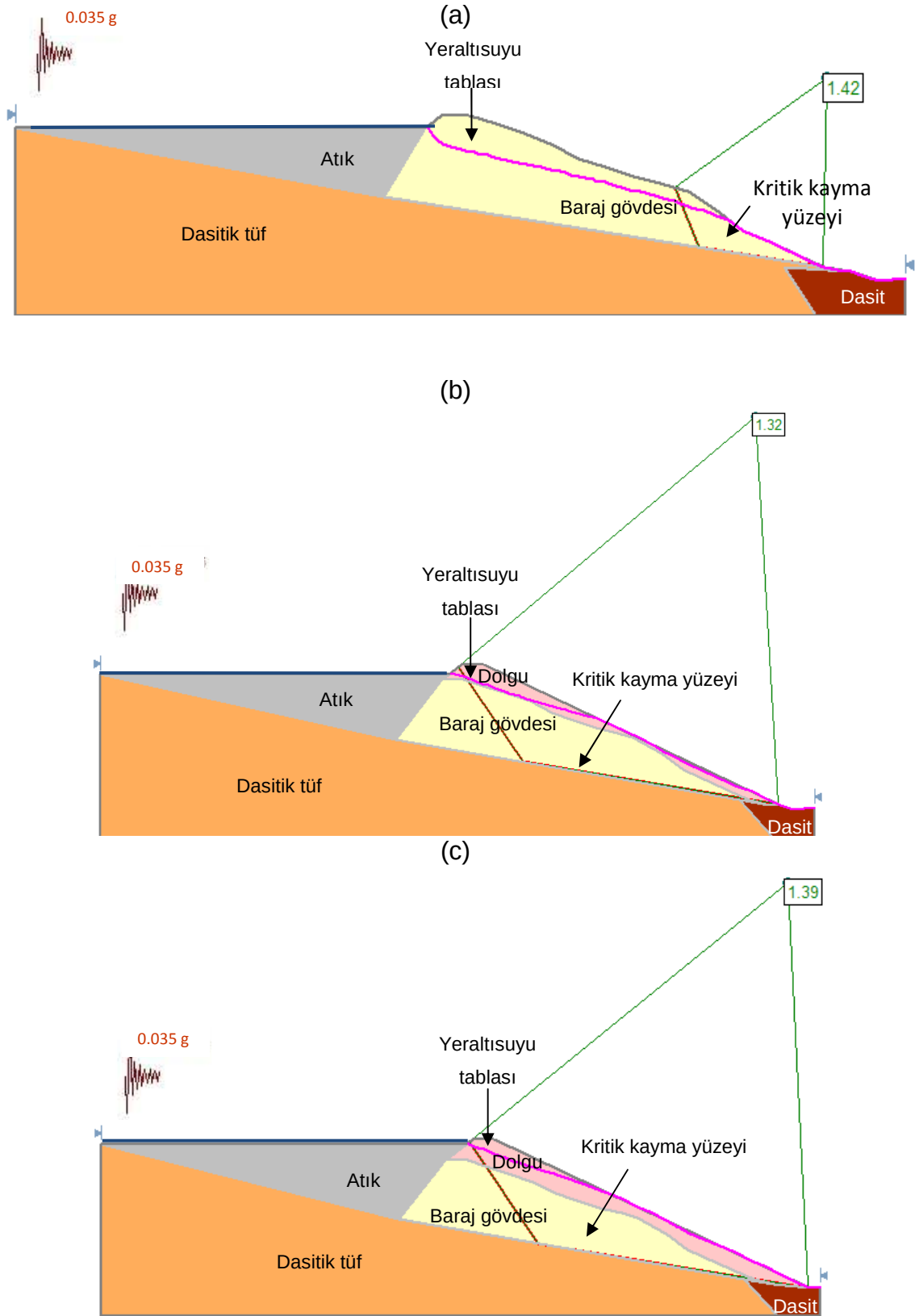
Birleşik kayma türüne göre gerçekleştirilen analizler sonucunda barajın mevcut durumu için hesaplanan güvenlik katsayısı 1.06'dır (Şekil 7.15a). Barajın 7 m yükseltilmesi durumunda şevin mevcut duruma göre daha yatık olması nedeniyle güvenlik katsayısı 1.45 olmakta ve atık kotunun yükselmesine bağlı olarak (472.5, 475.5 ve 478 m) 1.23, 1.13 ve 1.10 şeklinde azalmaktadır. Atık kotunun 475.5 m'ye yükselmesi koşulu için gerçekleştirilen analiz sonucu Şekil 7.15b'de sunulmuştur. Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda ise güvenlik katsayıları atık seviyesi 478 m kotu için 1.19 ve 480.5 m kotu için 1.15'tir. Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 480.5 m'ye yükselmesi koşulu için gerçekleştirilmiş analizin sonucu Şekil 7.15c'de verilmiştir. Dairesel kayma ve birleşik kayma analizlerinden elde edilen güvenlik katsayılarının birbirine çok yakın oldukları Çizelge 7.2'de görülmektedir.

Atık barajının mevcut durumu çok yüzeyli kayma türüne göre dinamik koşullarda analiz edildiğinde, güvenlik katsayısı 1.42 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.16a). Güvenlik katsayısının gövdenin 7 m yükseltilmesi durumunda 1.68 olduğu ve atık seviyesinin yükselmesiyle (472.5, 475.5 ve 478 m) güvenlik katsayısının 1.48, 1.32, 1.26 olarak azalacağı belirlenmiş olup, atık seviyesinin 475.5 m'ye yükselmesi koşul için gerçekleştirilen analizin sonucu Şekil 7.15b'de sunulmuştur. Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda ise, atık kotlarının 478 m ve 480.5 m'de olduğu durumlarda güvenlik katsayıları sırasıyla 1.43, 1.39'dur. Baraj gövdesinin 10 m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 480.5 m'ye yükselmesi koşulu için gerçekleştirilen analiz sonucu Şekil 7.15c'de verilmiştir. Bu duraysızlık türüne göre yapılan analizlerden belirlenen güvenlik katsayıları diğer iki duraysızlık türüne göre belirlenen değerlere göre oldukça yüksek olup, çok yüzeyli ötelenmeli kaymaların dinamik koşullarda da kritik olmayacağına işaret etmektedir.

Dinamik analizler sonucunda barajın 7 m ve 10 m yükseltilmesi işlemi için belirlenen güvenlik katsayılarının CANMET (1977) tarafından dinamik koşullar için 1.1 olarak önerilen güvenlik katsayısı değeri ile uyumlu olduğu saptanmıştır (Çizelge 7.2). Kesitler için en kritik duraysızlık modelinin dairesel kayma olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.15. Dinamik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna ve (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumlarında kesit 3'e ait birleşik kayma modeline göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.



Şekil 7.16. Dinamik koşullarda atık barajının (a) mevcut durumu, (b) mevcut konumuna göre 7 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 475.5 m kotuna ve (c) mevcut konumuna göre 10 m yükseltilmesi ve atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi durumlarında kesit 3'e ait çok yüzeyli ötelenmeli kayma türüne göre kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları.

7.2. Sayısal Analizler

Şevlerde gerilme-deformasyon dağılımı hakkında bilgi edinebilmek ve bazen güvenlik katsayısını da belirleyebilmek amacıyla sayısal analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method)'dir. Sonlu elemanlar yönteminde şev, eleman sıklığı şev yüzeyine doğru arttırılan üçgen elemanlara bölünerek, bu elemanların düğüm noktalarına uygulanan yükler ve malzemenin elastik ve plastik özellikleri kullanılarak yerdeğiştirme miktarları hesaplanmaktadır. Ayrıca, belirlenen yer değiştirmelere göre yenilmenin başladığı zonlar (plastik zonlar) belirlenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde güvenlik katsayısı genellikle makaslama dayanımı azalım ($c-\phi$ reduction) ilişkisinden (Dawson et al., 1999, Griffith and Lane, 1999, Hammah et al., 2004, 2005, 2006, Matsui and San, 1992; Hammah et al., 2007'den) yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntem, makaslama dayanımı parametrelerinin sistematik olarak şevin yenilmeye en yakın olduğu duruma kadar azaltılması esasına dayanmaktadır. Makaslama dayanımı azalım ilişkisinde makaslama dayanımı zarfı Eşitlik 7.3'teki F gibi bir katsayı ile azaltılarak yeni (azaltılmış) kohezyon ve içsel sürtünme açısı elde edilmektedir.

$$(\tau/F)=(c'/F)+\sigma_n (\tan\phi'/F) \rightarrow (\tau/F)=c^*+\sigma_n \tan\phi^* \quad (7.3)$$

Burada;

τ : Makaslama dayanımı,

c' : Kohezyon,

c^* : Azaltılmış kohezyon (factored cohesion),

ϕ' : İçsel sürtünme açısı,

ϕ^* : Azaltılmış içsel sürtünme açısı (factored friction angle),

F : Makaslama dayanımı azaltma faktörü'dür.

Yükseltilmesi planlanan atık barajının gövde malzemesinin elastik parametreleri (elastisite modülü, Poisson oranı), bunların tayini amacıyla alınan örneklerin

dağılması ve istenen boyutlarda deney örneğinin sağlanamaması gibi nedenlerden dolayı tayin edilememiştir. Bu nedenle, bu çalışmada sayısal analizler gövdedeki deformasyonların belirlenmesine yönelik olmayıp, yalnızca kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak barajdaki kritik yenilme modelinin ve güvenlik katsayısının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Sayısal analizler; sonlu elemanlar yöntemini esas alan PLAXIS V.8.2 (2002) programı kullanılarak, baraj gövdesinden alınan ve limit denge analizlerinin sonuçlarına göre en kritik kesit olan 3 no.lu kesit için yapılmıştır. Sayısal analizlerin dinamik koşullarda gerçekleştirilmesi için Plaxis programına çalışılan bölgeyi temsil edebilecek bir deprem kaydının girilmesi gerekmektedir. İnceleme alanı yakın civarında meydana gelmiş bir depremin olmaması nedeniyle sayısal analizler yalnızca statik koşul için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yeterli hassasiyetin sağlanması amacıyla baraj modeli 15 düğüm noktalı üçgen elemanlara bölünmüş ve sonlu eleman ağı oluşturulmuştur (Şekil 7.17a, 7.18a, 7.19a). Bu analizlerde, baraj gövdesi ve atık malzemesinin birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri limit denge analizlerinde kullanılan değerlerle aynı seçilmiştir (bkz. Çizelge 7.1). Bu malzemelerin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre davrandıkları kabul edilmiştir. Dolgu malzemesi için eşdeğer kohezyon ve içsel sürtünme açısı Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü kullanılarak 6. Bölüm’de anlatıldığı gibi belirlenmiştir. Buna göre, analizlerde dolgu malzemesinin eşdeğer kohezyonu ve içsel sürtünme açısı baraj gövdesinin 7 m yükseltilmesi durumunda 80 kPa ve 54° , barajın 10 m yükseltilmesi durumunda ise 99 kPa ve 52° olacak şekilde alınmıştır. Limit-denge analizlerine ilişkin alt bölümde değinilen gerekçeler nedeniyle dasitik tuf ve dasit malzemeleri doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Analizlerde yeraltısuyu koşulları limit denge analizlerinde dikkate alınan koşulların aynısıdır.

Barajın mevcut durumu için yapılan analizler sonucunda elde edilen plastik noktaların atık malzemesi yüzeyinde ve baraj gövdesinin eğiminin dikleştiği kısım ile dasitik tuf arasında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 7.17b). Analizlerden elde edilen yer değiştirme vektörlerinin konumlarına göre kritik kayma yüzeyi Şekil 7.17c’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Buna göre, limit-denge analizlerinde de değinildiği gibi, barajın mevcut durumu için kritik kaymanın birleşik kayma modeli

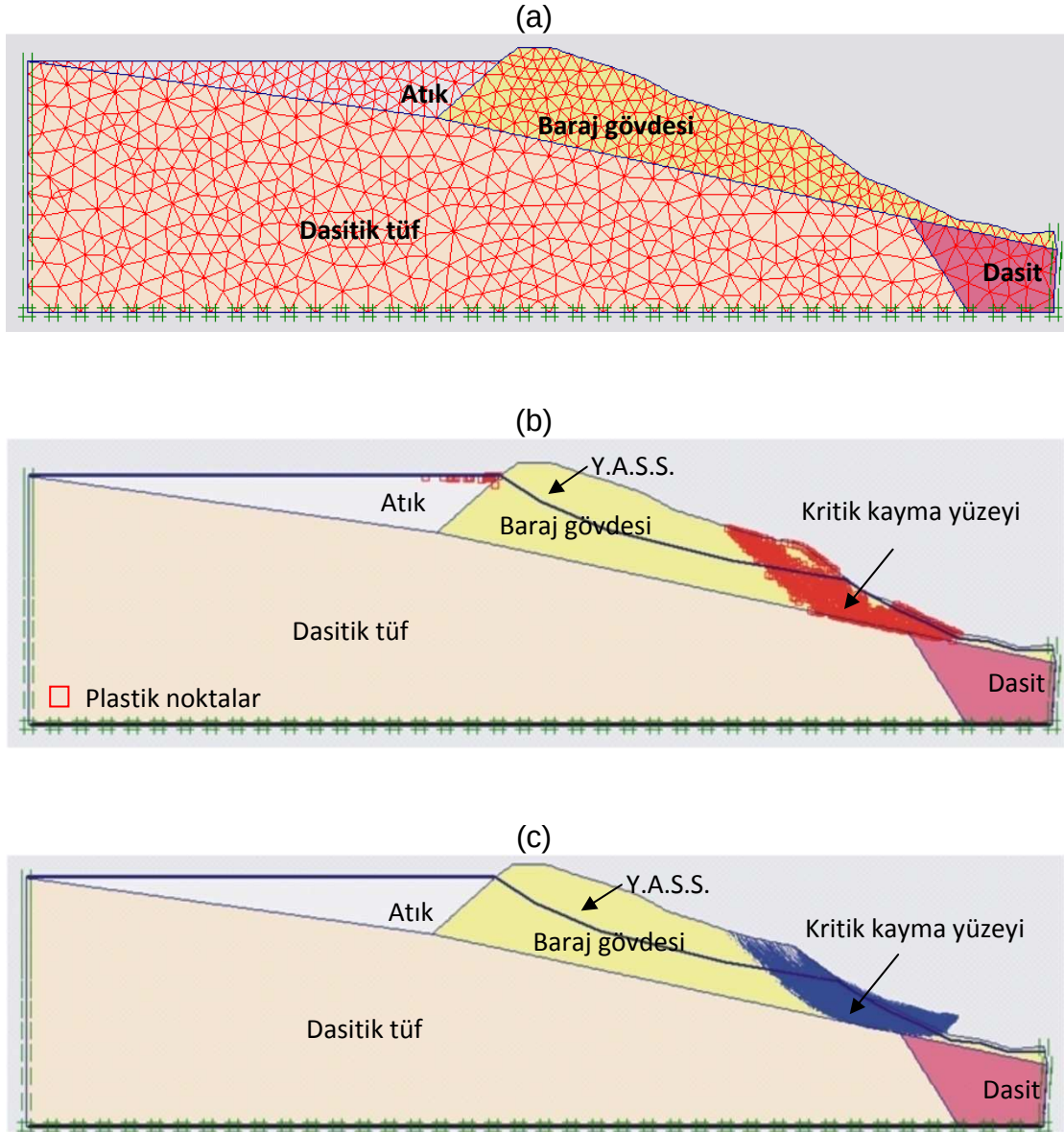
olduğu söylenilebilir. Mevcut durum için gerçekleştirilen c- ϕ azalım analizinden güvenlik katsayısı 1.16 olarak belirlenmiştir (Çizelge 7.5).

Barajın 7 m yükseltilmesi durumunda 3 no.lu kesitte farklı atık kotları için gerçekleştirilen analizlerden belirlenen plastik noktalar barajın akış yukarı şevinden başlayıp, baraj gövdesi-dasitik tuf sınırı boyunca topuğa kadar olan zonda yer almaktadır (Şekil 7.18b). Yer değiştirme vektörleri; kayma yüzeyinin baraj gövde şevinin üst kısımlarında dairesel bir yüzey, alt kısımlara doğru ise gövde ve dasitik tuf-dasit arasındaki sınırdaki yaklaşık doğrusal bir yüzey boyunca gelişeceğini göstermektedir (Şekil 7.18c). Buna göre, atık barajı için kritik yenilme modelinin birleşik kayma olduğu söylenebilir. Barajın 7 m yükseltilmesi durumunda farklı atık kotları için c- ϕ azalım ilişkisinden güvenlik katsayıları belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 7.5’de verilmiştir.

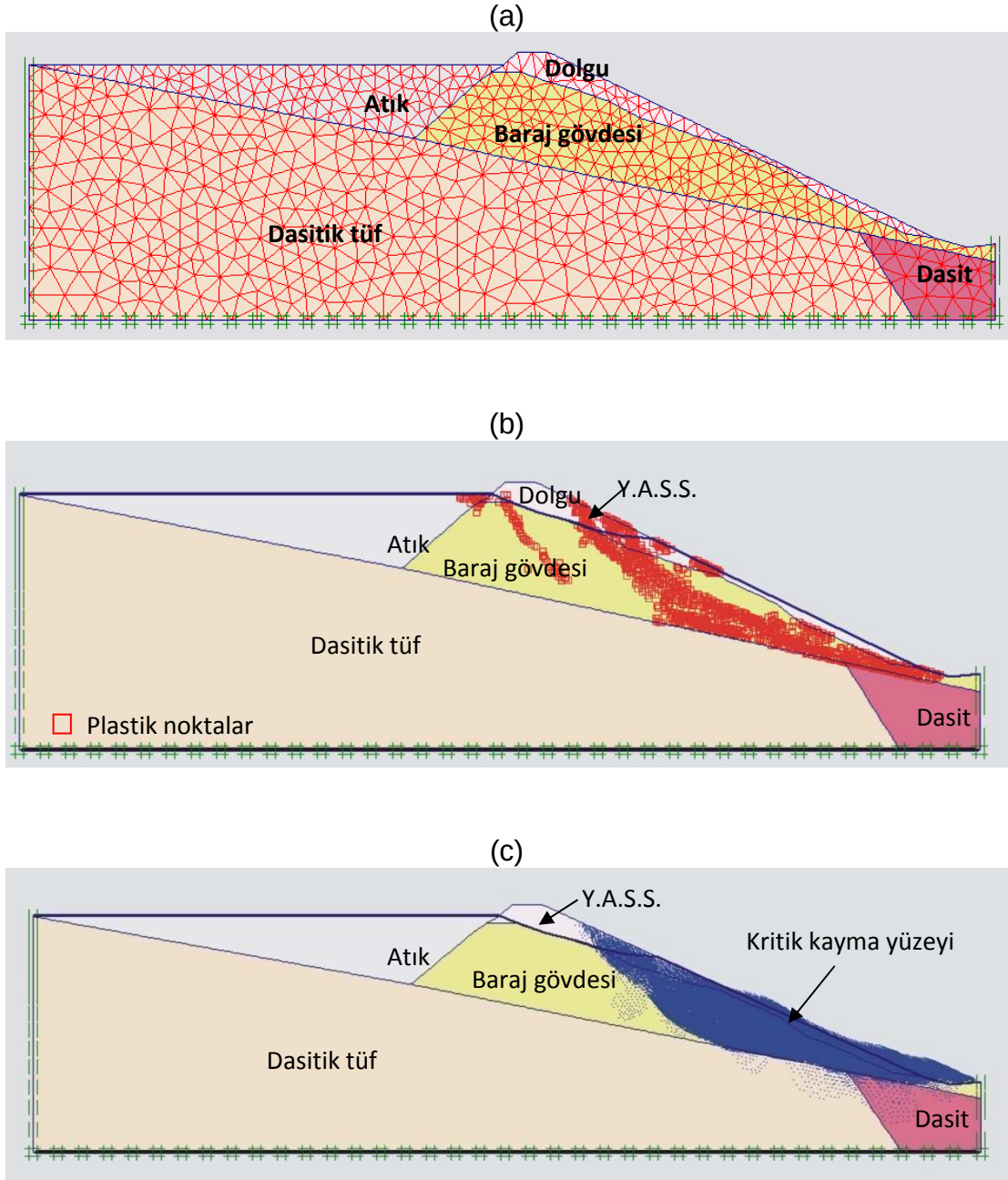
Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda atığın 478 m ve 480.5 m kotlarına ulaşması koşulu için yapılan analizlerde, plastik noktaların barajın akış yukarı şevine yakın kısmındaki atık malzemesinden başlayarak baraj gövdesi-dasitik tuf ara kesiti boyunca topuğa kadar olan bölgede yoğunlaştığı belirlenmiştir (Şekil 7.19b). Yer değiştirme vektörleri; baraj gövdesinin üst kısımlarında dairesel başlayıp, baraj gövdesinin dasitik tuf sınırında ise düzlemsel şekilde devam eden birleşik kayma yüzeylerinin kritik olabileceğini göstermiştir. Barajın 10 m yükseltilmesi durumunda iki farklı atık kotu için belirlenmiş güvenlik katsayıları Çizelge 7.5’de verilmiştir.

Çizelge 7.5. Sayısal analizlerin c- ϕ azalım ilişkisinden elde edilen 3 no.lu kesite ait güvenlik katsayısı değerleri.

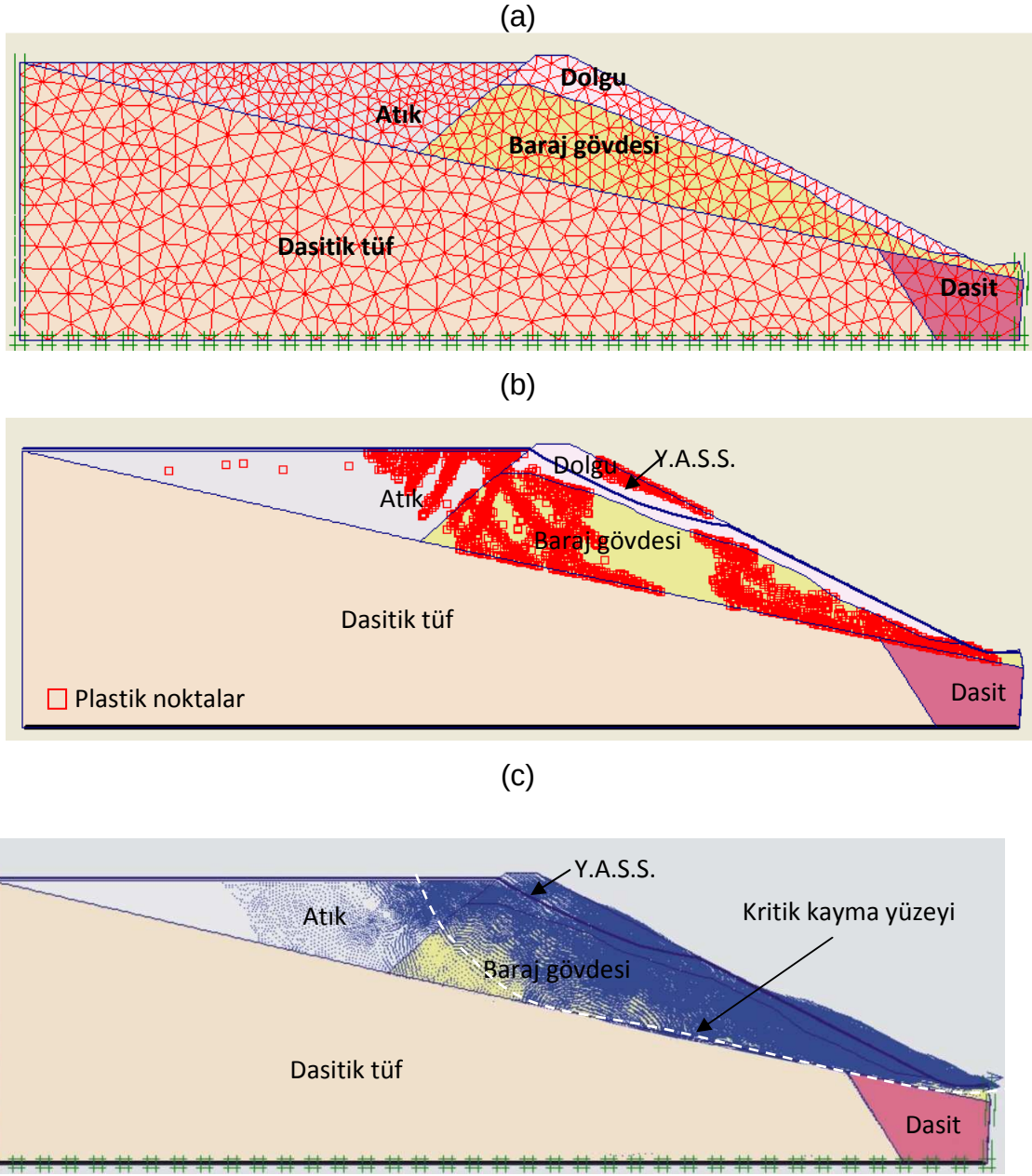
Barajın durumu	Atık kotu (m)	Güvenlik katsayısı
Mevcut durum	468.5	1.16
7 m yükseltilmesi durumu	468.5	1.63
	472.5	1.37
	475.5	1.24
	478.0	1.21
10 m yükseltilmesi durumu	478.0	1.27
	480.5	1.21



Şekil 7.17. Atık barajının güncel durumu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.



Şekil 7.18. Atık barajının 7m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 475.5 m kotuna yükselmesi koşulu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.



Şekil 7.19. Atık barajının 10 m yükseltilmesi durumunda atık seviyesinin 480.5 m kotuna yükselmesi koşulu için (a) üçgen elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı, (b) analizler sonucunda belirlenen plastik zonlar, (c) yer değiştirme vektörlerinden tahmin edilen kayma yüzeyi.

3 no.lu kesit için gerçekleştirilen analizler sonucunda belirlenen plastik noktaların ve yer değştirme vektörlerinin şev üzerindeki dağılımını incelendiğinde, bunların limit-denge analizlerinden elde edilen kritik kayma yüzeylelerinin konumları ile uyumlu olduğu gözlenmekte (şekil 7.11-7.17), diğer bir ifadeyle statik durum için limit-denge ve sayısal analiz sonuçları birbirini desteklemektedir.

Sayısal analizler sonucunda barajın mevcut durumu için belirlenen güvenlik katsayısı (1.16) atık barajının mevcut durumdaki şev eğiminin belli bir kottan sonra artmasına bağlı olarak, CANMET (1977) tarafından atık barajları için önerilen 1.2 değerinin çok az altında kalmaktadır. Ancak, baraj şevinin mevcut durumuna göre daha yatık bir eğimle yükseltilmesi durumunda 1.2 'den daha yüksek güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Bu durum, barajın yükseltilmesi, baraj şevi geometrisinin projede öngörölen şekilde tasarımılanması ve su basınçlarında beklenmeyen ani bir artışın olmaması koşulunda atık barajında herhangi bir şev duraysızlığı sorununun beklenmeyeceğine işaret etmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Lahanos Bakır-Çinko işletme sahasında alt kotta bulunan atık barajının yükseltilmesi durumunda duraylılığının nasıl değişeceğinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada, mevcut baraj gövdesini oluşturan malzeme ile barajın yükseltilmesinde kullanılacak kırmataş dasitlerin ve barajı dolduran atığın jeomekanik özellikleri belirlenmiş, farklı koşullarda (statik ve dinamik koşullar ile atık seviyesinin ve baraj gövdesinin yükselmesi) çeşitli modeller oluşturularak, bu modeller için farklı şev duraysızlık türlerine göre limit-denge ve sayısal analizler yapılarak söz konusu atık barajının duraylılığı değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- (1) En düşük güvenlik katsayıları, baraj gövdesi içinden geçen dairesel kaymalar ile baraj gövdesinde dairesel şekilde başlayıp gövde ile tabandaki dasitik tütün ara yüzeyi boyunca devam eden birleşik kayma yüzeyleri için hesaplanmıştır.
- (2) Barajın mevcut durumu ile 7 m ve 10 m yükseltilmesi hallerinde farklı koşullar için (atık seviyesinin kotundaki değişimler, statik ve dinamik koşullar) gerçekleştirilen limit-denge analizleri ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen güvenlik katsayılarının CANMET (1977) tarafından atık barajlarında güvenli tasarım amacıyla önerilen güvenlik katsayıları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre barajın mevcut durumu ile 7 m ve 10 m yükseltilmesi hallerinde, beklenmeyen aşırı su basınçlarının gelişmemesi ve yükseltme sırasında şevin projede öngörülen eğimle inşa edilmesi koşuluyla, herhangi bir şev duraysızlığı sorununun beklenmeyeceği sonucuna varılmıştır.
- (3) Barajın mevcut durumu için gerçekleştirilen analizlerden en kritik güvenlik katsayısı limit-denge analiz yönteminden statik koşul için 1.15, dinamik koşul için ise 1.06 olarak hesaplanmıştır. Her iki analiz yönteminde de kritik kayma yüzeyinin baraj gövdesinin planlanandan daha dik bir eğimle inşa edilen kısmından geçtiği belirlenmiştir.

- (4) Barajın mevcut durumu için hesaplanan güvenlik katsayıları, barajın daha yatık bir eğimle 7 m yükseltilmesi koşulu için hesaplanan güvenlik katsayıları ile karşılaştırıldığında, barajın yükseltilmesi durumunda daha duraylı olacağı belirlenmiştir. Bu farklılık, baraj şevinin mevcut durumda daha dik bir açıyla inşa edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.
- (5) Barajın 7 ve 10 m yükseltilmesi durumlarında depolanan atık seviyesinin artmasıyla güvenlik katsayılarının azalması belirlenmekle birlikte, bu değerler CANMET (1977) tarafından önerilen güvenli tasarım değerlerine ait sınırların üzerinde kalmaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar çerçevesinde, bu çalışmada incelenen alt kottaki atık barajı açısından dikkate alınması gereken hususlar, öneriler halinde aşağıda sunulmuştur.

- (a) Baraj gövdesi yükseltildikten sonra gövde boyunca herhangi bir su sızıntısının gelişip gelişmediği periyodik gözlemlerle izlenmelidir.
- (b) Gövdenin yükseltilmesinden sonra gövdede deformasyon olup olmadığının izlenmesi de ayrı bir önem arz etmektedir.
- (c) Yoğun yağışlardan sonra doğal drenaj kanallarıyla atık barajının rezervuarında aşırı su yüküne neden olabilecek su girişlerine meydan verilmemesi açısından baraj çevresinde drenaj önlemlerine özen gösterilmelidir.
- (d) Yükseltme işlemi sırasında barajın akış yukarı şevinde (rezervuar kısmında) sızdırmazlık özelliği olan jeotekstil kullanımına devam edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abramson, L.W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M., 1996. Slope stability and stabilization methods. John Wiley and Sons, USA, 629 p.
- Alberta Environmental Protection, 1999. Dam and Canal Safety Guidelines. Alberta, Canada, 15 p.
- ASTM, 2000. Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction, V.04.08, ASTM Publication, 972 p.
- Aydan, Ö., Kumsar, H., and Ulusay, R., 2002. How to infer the possible mechanism and characteristics of earthquakes from the striations and ground surface traces of existing faults. Journal of the Japan Society for Civil Engineers, 19 (2), 199-208.
- Bjelkevik, A., 2005. Swedish tailings dams incidents and failures, lessons learnt. Proceedings of Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment Metals and Energy Recovery, Skellefteå, Sweden.
- Bjelkevik, A., and Knutsson, S., 2005. Swedish tailings, comparison of mechanical properties between tailings and natural geological materials. Proceedings of "Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment Metals and Energy Recovery", Skellefteå, Sweden.
- Bishop, A. W., 1954. The use of slip circle in the stability analysis of the slopes. Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes, 3, pp. 7-17.
- Bruce I. G., Logue C., and Wilchek L. A., 1997. Trends in tailing dam safety. Bruce Geotechnical Consultants Inc., Vancouver, British Coloumbia, Canada, 15 p.
- CANMET, 1977. Pit Slope Manual, Chapter 9 – Waste Embankments. Canada Centre for Mineral and Energy Technology Report, 136 p.
- Department of Minerals and Energy Western Australia, 1998. Guidelines on the development of an operating manual for tailings storage. Western Australia, 33 p.
- Dillon, M., White, R., Power, and D., 2004. Tailings storage at Lisheen Mine, Ireland. Minerals Engineering, 17, 123–130.
- DSC, 2005. Tailings Dams. www.damsafety.nsw.gov.au, 18 p.
- EN-SU, 2007. Lahanos Artık Barajı-2 Yükseltme Projesi Raporu. Demir Export A. Ş., Ankara, 21 s.
- EN-SU ve ERA, 1995. Lahanos Maden İşletmesi Artık Barajı Fizibilite Raporu. Demir Export A.Ş., Ankara, 34 s.

- EPA, 1994. Design and evaluation of tailings dams. United States Environmental Protection Agency Technical Report, Washington DC, U.S.A., 59 p.
- Eriksson, N., and Adamek, P., 2000. The tailings pond failure at the Aznalcóllar mine, Spain. Sixth International Symposium in Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Calgary, Alberta, Canada.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., and Bell, G., 2005. Geotechnical engineering of dams. A. A. Balkema, Great Britain, 912 pp.
- Golder Associates, 2001. Report to united nations environment programme giving guidance for developing tailings regulations. France, 9 p. Sweedish Mining Association, 2001. Seminar on safe tailings dam constructions. Technical papers, Gällivare, Sweden, 79 p.
- Gökçeoğlu, C., 1997. Killi, yoğun süreksizlik içeren ve zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında karşılaşılan güçlüklerin giderilmesine yönelik yaklaşımlar. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 214 s.
- Gökçeoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay bearing rock from Turkey, with particular emphasis on the influence of drying and wetting cycles. Engineering Geology, 57, 211-237.
- Hammah, R. E., Yacoub, T. E., Corkum, B. C., and Curran, J. H., 2005. The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, held in Anchorage, Alaska.
- Hancock, G. R., and Willgoose, G. R., 2004. An experimental and computer simulation study of erosion on a mine tailings dam wall. Earth Surface Processes and Landforms, 29, 457-475.
- Haynes-Griffin, M. E., and Franklin, A. G., 1984. Rationalizing the seismic coefficient method. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper G.L., Mississippi, pp. 84-13.
- Hight, W. H., and Vallee, R. P., 1980. The liquefaction of different mine tailings under stress-controlled loading. Engineering Geology, 16, 147-150. ICME and UNEP, 1998. Case studies on tailing management., Ontario, Canada, 57 p.
- Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering. <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>.

- Hoek, E., and Brown, E. T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *ASCE Journal of The Geotechnical Engineering Division*, 106 (GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corcum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273.
- Huang, Y. H., 1983. *Stability Analysis of Earth Slopes*. Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 305 p.
- ICME and UNEP, 1998. Case studies on tailings management., *International Council on Metals and the Environment (ICME) & United Nations Environment Programme*, Ottawa, Canada, 57 p.
- ICOLD, 2001. Tailings dams risk of dangerous occurrences lessons learnt from practical experiences. *International Commission of Large Dams Bulletin*, 121, 144 p.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay and J. A. Hudson (ed.), Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Offset, Ankara, 628 p.
- Janbu, N., 1973. Slope stability computations. In *Embankment Dam Engineering*, Cassagrande Volume, R. C. Hirshfeld and S. J. Poulos (eds.), Wiley, pp. 47-86.
- JICA and MMAJ, 1998. The mineral exploration in the Espiye area summary report. M.T.A. Derleme Rapor No: 10067.
- Kondorski, F. S., Cummings, R. A., Bieniawski, Z. T., and Skinner, E. H., 1983. Rock mass classification for block caving mine drift support. *Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics*, ISRM, Melbourne, pp. B51-B63.
- Liu H., Li, N., Liao, X., Wu, C., and Pan, X., 2007. Effective stress analysis method of seismic response for high tailings dam. *Journal of Central South University of Technology*, 14(1), 129-134.
- Mainali, G., 2006. *Monitoring of tailings dams with geophysical methods*. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 74 p.
- Manzano, M., Ayora, C., Domenech, C., Navarrete, P., Garralon, A., and Turrero, M.J., 1999. The impact of the Aznalcóllar mine tailing spill on groundwater. *The Science of the Total Environment*, 242, 189-209.
- PLAXIS, 2002. *Finite Element Code For Soils and Rock Analyses*. Balkema, Netherlands.

- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., and Pereira, H. G., 2008a. Reported tailings dam failures, a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 846–852.
- Rico, M., Benito, G., and Díez-Herrero, A., 2008b. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154, 79–87.
- Robertson, A. M. G., and Shaw, S. , 2003. Risk management for major geotechnical structures on mines. *Proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries (CAMI)*, Calgary, Alberta, Canada, 8-10 September 2003, 1-9.
- Robertson Geoconsultants Inc., 2005. Sustainability in Tailings Disposal. www.robertsongeoconsultants.com.
- RockLab, 2002. Rock Mass Strength Analysis Using The Generalized Hoek-Brown Failure Criterion. Rockscience, Canada.
- Romero, S. P .E., 2005. Evaluation of Mike Horse dam. U.S. Forest Service, www.fs.fed.us/rl/helena/projects/blackfoot_mine/2005_evaluation_mh_dad_romero.pdf.
- Sarma, S.K., 1979. Stability analysis of embankments and slopes. *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105 (GT12), 1511-1524.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S., 2005. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental Geology*, 49, 267–273.
- SLIDE, 2004. 2D Limit-Equilibrium Analysis. Rockscience, Canada.
- Sönmez, H., and Ulusay, R., 1999. Modifications to the geological strength indeks (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36 (6), 743-760.
- Sönmez, H., and Ulusay, R., 2002. A discussion of the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-90.
- Sweedish Mining Association, 2001. Seminar on safe tailings dam constructions. Technical papers, Gällivare, Sweden.
- Tawil, M. R., 1997. Engineering properties of iron mine slimes for tailings dams stability. MSc Thesis, MIT, Massachusetts, 280 p.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 1996. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası Hakkında Açıklamalar, Ankara.

- T. C. Kültür Bakanlığı, 2009. T. C. Kültür Bakanlığı resmi internet sitesi (<http://www.giresunkulturturizm.gov.tr/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFF445139E278E0BCE29DBA976EC9F13FF8>).
- Ulusay, R., 2006. Lahanos İşletme'sindeki artık barajlarına ilişkin gözlemsel değerlendirme raporu. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2007. Kaya Ktlelerinin Mühendislik zellikleri. TMMOB Jeoloji Mhendisleri Odası Yayınları, No.60, 2. Baskı, Ankara, 292s.
- Ulusay, R., Yoleri, M.F., ağlan, D., and Arıkan, F., 1995. Design evaluations for spoil piles at a strip coal mine considering safety of haul road. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 9, 133-140
- Ulusay R., Gkeoğlu, C., and Slk, S., 2001. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 1113-1119.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., and Gkeoğlu, C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. Engineering Geology, 74, 265-291.
- U.S. Army Corps. of Engineers, 1970. Engineering and design, stability of earth and rock fill dams. Dept. of Army Corp. of Engineers, Engineer Manual EM, pp. 1110-1902.
- U.S. Interior Bureau of Reclamation, 1974. Earth Manual. A Water Resources Technical Publication, Denver, 810 p.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report, 176, Landslides: Analysis and Control, R. L. Schuster and R. J. Krizek (eds.), TRB, National Research Council, Washington D. C., 12-33.
- Witt K. J., Wudtke R.B., and Engels J., 2005. Implementation and Improvement of Design and Authorisation Procedures for Proposed Tailings Facilities. A European Research and Technological Development Project, Contract Number: EVG1-CT-2002-00066, 24 p.
- Zandarın, M. T., Oldecop, L. A., Rodrıguez, R., and Zabala, F., 2009. The role of capillary water in the stability of tailing dams. Engineering Geology, 105, 108–118.

ÖZGEÇMİŞ

ADI SOYADI: Nazlı TUNAR ÖZCAN

DOĞUM YERİ ve YILI: Ankara, 1983

MEDENİ HALİ: Evli

EĞİTİM DURUMU:

Lise : 1997 - 2000 Çankaya Lisesi

Lisans : 2000 - 2006 Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : 2006 - (devam ediyor) Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

YABANCI DİL: İngilizce

İŞ DENEYİMİ:

Aralık 2006- : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

ÜYESİ OLDUĞU KURULUŞLAR:

Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi (2006-)

KULLANABİLDİĞİ BİLGİSAYAR PROGRAMLARI:

Word, Excell, Power point, CorelDRAW, Dips, Autocad, Slide, Phase, Plaxis.