

**ZELVE AÇIK HAVA MÜZESİ'NDEKİ (KAPADOKYA)
KAYADAN OYMA TARİHİ YAPILARIN JEOMEKANİK
AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF THE ROCK-HEWN
HISTORICAL STRUCTURES AT THE ZELVE OPEN AIR
MUSEUM (CAPPADOCIA)**

ÖZGÜ KAŞMER

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

JEOLJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2011

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof. Dr. Hasan GERÇEK

Üye (Danışman) :.....
Prof. Dr. Reşat ULUSAY

Üye :.....
Prof. Dr. Tamer TOPAL

Üye :.....
Prof. Dr. Hüsnü AKSOY

Üye :.....
Doç. Dr. Ergün TUNCAY

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 07/12/2011 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adil DENİZLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ZELVE AÇIK HAVA MÜZESİ'NDEKİ (KAPADOKYA) KAYADAN OYMA TARİHİ YAPILARIN JEOMEKANİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Özgü Kaşmer

ÖZ

Kapadokya Bölgesi'ndeki Zelve Vadisi tarih, turizm ve kültür açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. 1950'lerde üç kişinin yaşamını yitirmesiyle sonuçlanan duraysızlıklar nedeniyle Zelve Vadisi yerleşime kapatılmış olmasına rağmen, günümüzde halen açık hava müzesi olarak yerli ve yabancı turistlerin ziyaretine açıktır. Bununla birlikte, üç vadiden oluşan Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki özellikle 1. Vadi'nin yamaçlarında yer yer blok düşmeleri ve süreksizlikler boyunca kaymaların yanı sıra, kavlaklanma sonucu yarı-yeraltı açıklıklarında açıklık boyutlarının genişlemesiyle, bazı açıklıklarda bırakılmış topukların yenilmesiyle ve malzeme dayanımının zamana bağlı olarak azalmasıyla duraysızlık sorunları giderek artmaktadır. Gerek bu sorunlar, gerekse Zelve Açık Hava Müzesi'nin önemi dikkate alınarak, bu çalışmada müze açısından en kritik durumdaki 1. Vadi seçilmiş ve (a) kayadan oyma açıklıklarının içinde yer aldığı tüfün kısa ve uzun süreli jeomekanik davranışının, (b) atmosferik koşulların bu tüf üzerindeki etkilerinin, (c) açıklıklarda meydana gelen duraysızlık türlerinin ve bunları etkileyen faktörlerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla arazi gözlemleri ve ölçümleri, laboratuvar deneyleri ile 2- ve 3-boyutlu sayısal çözümleme teknikleri gibi yöntemlerden yararlanılmıştır. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen sonuçların vadede yapılabilecek koruma ve iyileştirme çalışmalarına altlık oluşturacak katkılar sağlayabileceği düşünülmüştür. 1. Vadi'de yapılan gözlemler ve ölçümler; makaslama yenilmesi, topuktaki aşınmayla taşıma gücünün yitimi, gerilme boşalmasına bağlı kavlaklanma sonucu açıklıkların boyutlarının artması, ayrıca kaya bloklarının hareketi gibi duraysızlıkların önemli olduğunu göstermiştir. Laboratuvar deneyleri; su içeriğindeki artışa koşut olarak kaya dayanımının önemli düzeyde azaldığına ve ıslanma-kuruma ve donma-çözülme süreçlerinin kayanın dağılarak aşınmasını hızlandırdığına, dolayısıyla topuk aşınması ve kavlaklanma davranışına katkıda bulunduğuna işaret etmektedir. Zelve Vadisi'nde tüflerde yapılan uzun dönemli ölçümlere göre, aşınmanın özellikle vadi tabanına yakın yerlerde göreceli olarak

önemli miktarlara ulaştığı ve aşınma miktarlarında kış ve ilkbahar aylarında artış meydana geldiği anlaşılmaktadır. 1. Vadi'nin yamaçlarının ve/veya yamaç topuklarının duraylılığıyla ilgili 100, 500 ve 1000 yıllık senaryolar gözetilerek yapılan 2-boyutlu sayısal çözümlerinin sonuçları; açıklıkların çevresinde çekme gerilmelerinin etkin olduğunu göstermiş olup, gözlemlerle belirlenen ve kayanın açıklık duvarlarına paralel olarak dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan davranışı desteklemiştir. Sayısal çözümler ayrıca, yamaçlarda ve/veya yamaç topuklarında gelecekte meydana gelebilecek aşınma kaynaklı yenilme türünün, günümüzde de gözlemlendiği şekliyle, tekrarlı bir şekilde yamaç yüzeyinde kalın dilimlerin oluşması ve bunların yamaç yüzeyinden kopmaları şeklinde gelişeceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, göreceli olarak daha düzenli bir geometriye sahip üç farklı açıklık için yapılan 3-boyutlu sayısal çözümlerinin sonuçları da, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme yüzeyinin açıklık yüzeyine paralel olacak şekilde gelişeceğine işaret etmekte olup, bu durum arazi gözlemleriyle uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Duraylılık, Zelve tufu, Kapadokya, yarı - yeraltı açıklığı, Zelve Açık Hava Müzesi, sayısal çözümler tekniği

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

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF THE ROCK-HEWN HISTORICAL STRUCTURES AT THE ZELVE OPEN AIR MUSEUM (CAPPADOCIA)

Özgü Kaşmer

ABSTRACT

The Zelve Valley in the Cappadocia Region has a great historical, touristic and cultural importance. Although it has been closed to settlement due to some instabilities, which occurred in 1950's and resulted in three casualties, it is still open to visits of local and foreign tourists. However, in addition to occasional slides along discontinuities and rock falls on the slopes of the 1st Valley in the Zelve Open Air Museum, consisting of three valleys, instability problems are increasing day by day due to enlargement of semi-underground openings as a result of spalling of the host rock, failure of some pillars and time-dependent decrease in rock strength. By considering both these problems and the importance of the Zelve Open Air Museum, in this study, the 1st Valley, which is most critical for the museum, was selected to investigate (a) short and long-term geomechanical behavior of the tuffs surrounding the semi-underground openings, (b) effects of the atmospheric conditions on the host rock, (c) types of instabilities occurred in the openings and their causative factors. For these purposes, site observations and measurements, laboratory tests and 2- and 3-dimensional numerical techniques were utilized. In addition, it was also considered that the conclusions drawn from this study may provide some contributions for protection and restoration works that may be done in the valley in the future. Some observations and measurements performed in the 1st Valley indicated that shear failures, loss of bearing capacity resulted from the erosion of toes of natural slopes, enlargement of semi-underground openings due to spalling depending on stress-relief and movement of rock blocks are the important instability types. Laboratory test results suggest that, depending on increase in water content, rock strength considerably decreases and wetting-drying and freezing-thawing processes accelerate disintegration, and therefore, contribute toe erosion and spalling. Based on the long-term measurements on the Zelve tuff, it is concluded that erosion has reached to considerable amounts particularly at locations close to the valley bottom and increased in winter and spring seasons. The results of the 2-

dimensional numerical analyses performed for 100, 500 and 1000 year scenarios revealed that tensile stresses dominate around the openings and these results confirm the observed spalling of the tuff in the form of slabs parallel to the walls of openings. In addition, the numerical analyses also indicate that the failure type resulting from toe erosion will continue to occur at the toe of slopes and the thick slabs of detached rock will eventually fall down. However, the results of 3-dimensional numerical analyses, which were performed for three different openings having more regular geometry, indicate that failure zone resulting from tensile stresses around the openings will develop parallel to the sides and show a good agreement with field observations.

Keywords: Stability, Zelve tuff, Cappadocia, semi – underground opening, Zelve Open Air Museum, numerical analyses technique

Supervisor: Prof. Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University, Geological Engineering Department, Applied Geology Division

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile araştırma yöntemlerinin belirlenmesinde yardımcı olan, tezin her aşamasında ilgi ve katkılarıyla yol gösterici ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan değerli Danışmanım Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a,

Tezimin değerlendirilmesi ve tez savunmasında esirgemedikleri değerli katkı ve önerileri için Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Hasan Gerçek ve Prof. Dr. Tamer Topal'a,

Tez çalışmamın özellikle sayısal çözümlemelere ait bölümü ile ilgili katkılarından ve esirgemediği desteğinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Melih Geniş'e (Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü)',

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini ile desteğini esirgemeyerek yol gösterici olan Prof. Dr. Ömer Aydan'a (Tokai Üniversitesi, Japonya),

Zelve Açık Hava Müzesi'nde tez çalışmamı gerçekleştirmem için gerekli izni veren ve desteklerini esirgemeyen Nevşehir Müze Müdürü merhum Halis Yenipınar'a ve müze çalışanlarına,

Saha çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Celal Tunusluoğlu'na,

X-Ray çözümlmeleri sırasındaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Abidin Temel ve Dr. Sevgi Telsiz'e

Laboratuvar deney ekipmanının kullanımı ve örnek alımıyla ilgili yardımlarından dolayı Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Ahmet Bay ve Özgür Erol'a,

Tezin düzenlenmesi sırasında yardımcı olan, desteklerini ve sabırlarını esirgemeyen başta Dr. Ayten Özlem Atilla Tezcan olmak üzere, çalışma arkadaşlarım Jeo. Y. Müh. Aslı Doğan ve Mütercim Tuğba Öncüer'e,

Her zaman yanımda olup, güven veren ve manevi desteğini hiç esirgemeyen anneme ve babama,

Son olarak; her zaman benimle olan, cesaret veren ve tezin her aşamasında desteğini, yardımını ve sabrını hiç esirgemeyen sevgili eşim Burcu Kaşmer'e

İÇTEN TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZ	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	1
1.2. Yöntem ve Kapsam	6
2. İNCELEME ALANININ TANITIMI	8
2.1. Coğrafi Konum	8
2.2. İklim ve Bitki Örtüsü	8
2.3. Morfoloji	10
2.4. Ulaşım ve Sosyo-Ekonomik Durum	10
2.5. Bölgenin Tarihçesi ve Kültürel Önemi	12
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	18
3.1. Kapadokya Bölgesi'nde Yerbilimleri Konusunda Yapılmış Çalışmalar	18
3.2. Kapadokya Bölgesi'nde Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Konularında Yapılmış Çalışmalar	22
3.3. Kapadokya Bölgesi'nde Tarihi Alanların Restorasyonu Konusunda Yapılmış Çalışmalar	30
3.4. Uluslararası Literatürde Tüflerin Jeo-Mühendislik Özellikleri ve Tarihi Yeraltı Açıklıkları Konusunda Yapılmış Çalışmalar	32
4. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ	37
5. SAHA ÇALIŞMALARI	43
5.1. Kaya Yapılarındaki Duraysızlıkların Gözlemsel Değerlendirmesi	43
5.2. Envanter Çalışması	49
5.3. Süreksizlik Karakterizasyonu ve Kaya Kütle Sınıflaması	49
5.3.1 Süreksizliklere ilişkin ölçümler	49
5.3.2. Kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması	51
5.4. Kavlaklanma Kalınlığı Ölçümleri	55
5.5. Açıklıkların Boyutlarının Belirlenmesi	55
5.6. İğne Penetrometresi Deneyleri	55
5.7. Schmidt Çekici Deneyleri	59
5.8. Meteoroloji İstasyonlarına Ait Verinin Değerlendirilmesi	61
5.9. Tüfteki Aşınma Miktarlarının Belirlenmesine Yönelik Ölçümler ve Değerlendirmeler	63
5.10. Örnek Alımı	71
6. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI	73
6.1. İnce Kesit Çözümlemeleri	73
6.2. X- Işınları Kırınım Analizleri	76
6.3. Fiziksel ve Mekanik Özellikler	79
6.3.1. Fiziksel Özellikler	79
6.3.2. Dayanım ve Deformasyon Özellikleri	80

6.3.3. Üç – Eksenli Sıkışma Deneyleri	84
6.4. İndeks Özelliklerin Belirlenmesine Yönelik Deneyler	84
6.4.1. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyleri	84
6.4.2. Islanma – Kuruma ve Donma – Çözülme Deneyleri	86
6.5. Süreksizliklerin Makaslama Dayanımı	100
6.6. Kapadokya Bölgesi’ndeki tüflerle ilgili önceki çalışmalara ait deney sonuçlarının karşılaştırılması	103
7.DURAYSIZLIKLARIN SAYISAL ÇÖZÜMLEME TEKNİKLERİYLE İNCELENMESİ	107
7.1 Geriye Dönük Çözümler	109
7.2 Duraysızlık Olasılığı Bulunan Yamaçların Sayısal Çözümleri	109
7.2.1. Yamaç Duraylılığının Değerlendirilmesi	111
7.2.2. Kaya Kütlesinin Çekme Dayanımı Aşamalı Olarak Azaltılarak Yapılan Çözümler	119
7.2.3. Akarsu Etkisine Maruz Kalmayan Yamaçta Aşınmanın Duraylılık Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Çözümler	127
7.3. Duraysızlık Olasılığı Bulunan Mevcut Kayadamların Sayısal Çözümlemesi	127
7.3.1. Kavlaklanmanın yoğun olarak gözleendiği tipik bir açıklık için yapılan sayısal çözümleme	132
7.3.2. “Manastır” için yapılan sayısal çözümleme	132
7.3.3. “L10” kodlu açıklık için yapılan sayısal çözümleme	138
7.4. “Manastır”ın Tavanında Gözlenen İlerleyici Karakterdeki Duraysızlıkların Üç Boyutlu Sayısal Çözümlerle İncelenmesi	144
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	148
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ	164

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünyadaki tipik bazı yeraltı ve yarı-yeraltı mimari örnekleri (Pardo and Guerrera, 2006).	2
Şekil 1.2. Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi'de gelişen duraysızlık sorunlarına ilişkin örnekler: (a) kaya düşmeleri, (b) süreksizlikler boyunca kayma, (c) kavlaklanma nedeniyle açıklık boyutlarının artması ve (d) topuklarda ve açıklık girişlerindeki sorunlar.	4
Şekil 1.3 Zelve 1. Vadi'nin giriş kesimindeki kayadan oyma Geyikli Kilise: (a) önceki yıllarda kilisenin tavanında meydana gelmiş göçme, (b) 2009 yılında gelişen toptan göçme.	5
Şekil 2.1 Kapadokya Bölgesi'nin Türkiye'deki ve inceleme alanının bu bölge içindeki konumlarını gösteren yer bulduru haritaları.	9
Şekil 2.2 İnceleme alanını da içeren Kapadokya Bölgesi'nin uydu görüntüsü ve Türkiye genelindeki yeri (Google Earth, 2011).	11
Şekil 2.3. Kapadokya Bölgesi'ndeki (a) peribacaları (Ürgüp) ve (b) kayadan oyma bazı mekanlar (Zelve Açık Hava Müzesi).....	13
Şekil 2.4. Kapadokya Bölgesi'ndeki tarihi ve doğal sit alanlarını gösteren harita (Kültür Bakanlığı, 2011).	14
Şekil 2.5. Zelve Vadisi'nde duraysızlığa maruz kalmış (a) bazı kayadan oyma mekanlar ile (b) ve (c) doğal yamaçlardan görüntüler.....	15
Şekil 2.6. Zelve Açık Hava Müzesiyle ilgili olarak; (a) Vadi planı ile (b) 1. Vadiye (c) 2. Vadiye ve (d) 3. Vadiye ait panoramik görüntüler.....	16
Şekil 4.1. Kapadokya Bölgesi'nin genel jeoloji haritası; 1. temel kayalar, 2. Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik birimler, 3. İgnimbiritler (tüfler) ve güncel karasal birimler, 4. Kuvaterner volkanizması (maar, dom ve lavlar), 5. büyük Kuvaterner volkanları, 6. Kuvaterner alüvyon, 7. önemli faylar (TGFZ: Tuz Gölü Fay Zonu, EFZ: Ecemiş Fay Zonu, DF: Derinkuyu Fayı) (Temel et al., 1998'den).....	38
Şekil 4.2. Kapadokya Bölgesi'ndeki ignimbirit (tüf) istifini içeren Ürgüp formasyonunun stratigrafik dikme kesiti (Temel et al., 1998'den düzenlenmiştir).	40
Şekil 4.3. İnceleme alanı ve yakın civarının jeoloji haritası (Temel (1992)'den düzenlenmiştir).	41
Şekil 4.4. Zelve Açık Müzesi civarında yüzeyleyen (a) Çökek ve Zelve üyeleri ile (b) Çökek, Zelve ve Kavak üyelerinin genel görünümü.	42
Şekil 5.1. Zelve 1. Vadi'nin tabanındaki mevsimsel derenin vadi yamaçlarının topuğunu oymasını gösteren (a) genel ve (b) yakın çekim görüntüler.	44
Şekil 5.2. Zelve 1. Vadi'de süreksizlik yüzeyleri boyunca gelişen makaslama yenilmesini gösteren bir duraysızlık.	46
Şekil 5.3. Zelve 1. Vadi'de topuk desteğinin yitimi sonucu bloğun yerçekimi etkisi altında düşmesi şeklinde gelişen bir duraysızlık.	46
Şekil 5.4. Zelve 1. Vadi'de (a) yamaçta alt kısmı kopmuş olan kavlaklanmalara bir örnek ile (b), (c) ve (d) kavlaklanmalar nedeniyle yarı-yeraltı açıklıkların geometrisinin değişmesine ilişkin tipik örnekler.	47

Şekil 5.5. Çeşitli nedenlerle oluşan ve ilerleyen çatlakların mevcut süreksizliklerle veya açıklıkların kapı, pencere gibi elemanlarıyla keşşerek duraysızlığa maruz kalabilecek yeni bloklar oluşturmasına ilişkin tipik görüntüler.	48
Şekil 5.6. Tez çalışmasıyla ilgili olarak ilk aşamada hazırlanmış olan Zelve Açık Hava Müzesi 1.Vadi'deki açıklıklara ilişkin envanter haritası.	50
Şekil 5.7. Zelve 1. Vadi'deki tüfte ayırtlanan başlıca süreksizlik takımlarının yönelimleri.....	52
Şekil 5.8. Zelve 1. Vadi'de gözlenen süreksizlik takımlarından görünüm.	53
Şekil 5.9. Zelve 1. Vadi'ye yaklaşık paralel konumlu süreksizlik takımıyla sınırlanan ve ana kütleden koparak tehlike yaratan kaya dilimlerinden tipik görüntüler.	54
Şekil 5.10. Zelve 1. Vadi'de gözlenen kavlaklanmalara ait "Sıklık - Kavlaklanma Kalınlığı (KK)" histogramı.	57
Şekil 5.11. Sayısal çözümlerlerde kullanılmak üzere, (a) inceleme alanında duraysızlığa maruz kalması olası tipik bir açıklık, (b) boyutları ve (c) açıklık içindeki kavlaklanmalara ait görüntü.	58
Şekil 5.12. Zelve Vadisi'nin (a) girişinde ve (b) içinde kurulmuş olan meteoroloji kayıt istasyonları.....	62
Şekil 5.13. Zelve Vadisi'nde tez çalışmasında da yararlanılması amacıyla kurulmuş olan meteoroloji istasyonlarından alınan 4 yıllık (a) sıcaklık ve (b) nem verileri 01.01.2006 – 08.10.2009 ve 08.10.2009 – 07.04.2011 dönemleri iki grafik halinde verilmiştir.	64
Şekil 5.14. Zelve Açık Hava Müzesi'nin iç kısmına kurulan meteoroloji istasyonundan alınan (a) 2008 ve (b) 2009 yıllarına ait aylık toplam yağış miktarları.	65
Şekil 5.15. Zelve 1. Vadi'nin tabanında aşınmanın etkisinin belirlenmesi amacıyla yerleştirilen çivilerin yerleri: (a) topuğu aşınan yamaç ve (b) vadi tabanında çivi yerleştirilen blok.	67
Şekil 5.16. Zelve 1. Vadi'de seçilen yerlerde aşınmanın belirlenmesi amacıyla (a) kaya yüzeylerine paslanmaz çivilerin yerleştirilmesi için delik açılması, (b) yerleştirilen çivilerin dizilimi ve (c) dijital kompasla çivilerden ölçüm alınması.....	68
Şekil 5.17. Zelve 1. Vadi'deki dereden etkilenmeyen kesimlerde de aşınma miktarının belirlenebilmesi amacıyla (a), (b) yamaca yerleştirilen 7 adet çivi ve (c) kavaklanmanın miktarının tahmini amacıyla vadideki yarı-yeraltı açıklıklarından birine yerleştirilen 3 adet ivin konumları.....	69
Şekil 5.18. Zelve 1. Vadi'de iki lokasyonda takılı çivilerden 2006 (Mart) - 2011 (Nisan) arasında alınan ölçümlere göre "aşınma miktarı zaman" grafikleri.	70
Şekil 6.1. İnce kesit çzmlerleri ve X-ışınları kırınım analizlerinin yapılması amacıyla Zelve Vadisi'nden alınan örneklerin yerleri.....	74
Şekil 6.2. Zelve tüfünün kayaç bileşenleri, pomza ve kayaç parçalarını gösteren tipik mikroskop görüntüleri (rnek No.: (a) L2, (b) L10, (c) T3).	75
Şekil 6.3. Zelve tfnden alınan örneklerde yapılan X-ışınları kırınım çzmlerlerinden elde edilen bazı tipik tüm kayaç ve kil difraktogramları (rnek No.: (a) ve (b) L10 ile (c) ve (d) T2).....	78
Şekil 6.4.(3) no.lu örneğe ait kuru ve doymun durumlar için "eksenel gerilme - birim deformasyon" grafiği.	82

Şekil 6.5. Zelve tufü için kuru ve doygun koşullarda: (a) tek eksenli sıkışma ve (b) çekme dayanımlarındaki azalımların karşılaştırılması.	83
Şekil 6.6. Zelve tufü üzerinde yapılan üç eksenli deneyler sonucunda elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.	85
Şekil 6.7. Zelve tufü örneklerinde (Z1-Z4) suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağılı değişimi (AU1 (2003) ve AU2 (2003): Aydan ve Ulusay (2003) tarafından aynı tuf üzerinde yapılan deneylere aittir).	87
Şekil 6.8. Zelve Aık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen Zelve tufünün suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneylerinde uygulanan her çevrim sonrasındaki durumları.	88
Şekil 6.9. Zelve tufü örneklerinde ıslanma - kuruma çevrimleri sonunda ağırlık kaybındaki değişimi gösteren grafik (* : Çevrimler sonunda tek eksenli sıkışma deneyi yapılan örnekler)	90
Şekil 6.10. Zelve Aık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen Zelve tufünün ıslanma - kuruma deneylerinin 2, 5, 8 ve 10. çevrimler sonrasındaki durumları.	91
Şekil 6.11. Zelve tufü örneklerinin ıslanma - kuruma çevrimleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımındaki azalım.	93
Şekil 6.12. Zelve tufü örneklerinin donma - çözölme çevrimleri sonunda ağırlık kaybının değişimi.	94
Şekil 6.13. Zelve Aık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen Zelve tufünün donma - çözölme deneylerinin 5, 10, 15 ve 20. çevrimler sonrasındaki durumları.	95
Şekil 6.14. Zelve tufü örneklerinin donma - çözölme çevrimleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımındaki azalım.	96
Şekil 6.15. Atmosferik etkilerin Zelve tufü üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla Zelve Aık Hava Müzesi'nde (a) meteoroloji istasyonunun üzerine ve (b) vadi tabanında yer alan blok üzerine yerleştirilmiş plastik kafesler içindeki karotlar.	98
Şekil 6.16. ıslanma - kuruma ve donma - çözölme süreçlerinin Zelve tufü üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla Zelve Aık Hava Müzesi içinde (a) meteoroloji istasyonu ve (b) ile (c) vadi içinde çivi ölçümü alınan bloğun yakınına yerleştirilen aynı karot örnekleri.	99
Şekil 6.17. Şekil 15a'da görölen ve atmosferik koşullardan etkilenmiş örneğın 21.07.2011 tarihindeki durumu.	101
Şekil 6.18. (a) Süreksizlik yüzeyi pürüzlölük katsayısı (JRC) profilleri (ISRM, 2007), temel sürtünme açısı (fb)'nın tayini amacıyla yapılan makaslama deneylerine ait yenilme zarfı.	102
Şekil 7.1. Yamaç eğimine göre gelişen farklı kaya düşmesi türleri (Ritchie, 1963; Dorren, 2003'den).	108
Şekil 7.2. (a) Geriye dönük çözölmesi yapılan kama türü duraysızlıktan uzak ve yakın görünümler, (b) ve (c) yamaç geometrisi ile (d) geriye dönük çözölme sonuçlarında elde edilen yenilme zarfları.	110
Şekil 7.3. Aşınma miktarı ölçümlerinin alındığı ve sayısal çözölmesi yapılan yamaçtan tipik görüntüler.	112
Şekil 7.4. Yamaçların duraylılığının değerlendirilmesi amacıyla yapılan sayısal çözölmelemlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı ve yamaç geometrisi.	113
Şekil 7.5. Zelve 1. Vadi'de yamaçların ve yamaç topuklarının duraylılığının incelenmesi amacıyla (a) mevcut durum ile 100, 500 ve 1000 yıllık	

	senaryoları gösteren temsili kesitler ve (b) sayısal çözümlemesi yapılan yamaçta uygulanan senaryoya göre modelleme aşamaları (I. aşama, modelin orijinal halidir).	115
Şekil 7.6.	Sayısal çözümlemeler sonucunda yamaç üzerinde; (a) mevcut durum ile (b) 100 yıllık senaryo sonunda beklenen en büyük asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.	116
Şekil 7.7.	Sayısal çözümlemeler sonucunda, yamaç üzerinde (a) 500 yıl ve (b) 1000 yıllık senaryolar sonunda beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m) ve yenilme bölgeleri ile (c) 1000 yıl sonunda oluşan yer değiştirmeyi gösteren yer değiştirme vektörleri.	118
Şekil 7.8.	Sayısal çözümlemelerde kullanılan (a) sonlu elemanlar ağı ve (b) çözümleme aşamaları (I. aşama, modelin orijinal halidir).	120
Şekil 7.9.	Sayısal çözümlemeler sonucunda yamaç üzerinde; (a) 500 yıl sonunda çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilme bölgesi ve (b) bu yenilme bölgesi kaldırıldıktan sonra oluşan asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.	121
Şekil 7.10.	Kaya kütlelerinin çekme dayanımı azaltılarak yapılan çözümlemeler için seçilen açıklığın; (a) uzaktan ve (b) yakından görüntüleri ile (c) sayısal çözümlemelerde kullanılan sonlu elemanlar ağı.	123
Şekil 7.11.	Kaya kütlelerinin çekme dayanımı değeri (a) 0.04 MPa ve (b) 0.03 MPa, olarak seçilerek yapılmış sayısal çözümlemeler ve çözümlemelerden elde edilen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.	125
Şekil 7.12.	Sayısal çözümlemesi yapılan ve topuğunda akarsu etkisine maruz kalmayan yamaçtan bir görünüm ile (b) ve (c) sayısal çözümlemelerde kullanılan sonlu elemanlar ağı.	128
Şekil 7.13.	Sayısal çözümlemeler sonucunda yamaç üzerinde; (a) 100 yıl ve (b) 500 yıl yıllık senaryolara göre beklenen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.	129
Şekil 7.14.	Kavlaklanmanın yoğun olarak gözlemlendiği tipik bir açıklık için yapılan sayısal çözümlemelerde kullanılan (a) sonlu farklar ağı ve (b) açıklık geometrisi.	133
Şekil 7.15.	Açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme (Pa) dağılımı (“-“ işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir).	133
Şekil 7.16.	Sayısal çözümlemeler sonucunda, (a) açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme dağılımı ve (b) açıklığın uzun eksen boyunca ve açıklık yüzeyinde oluşan yer değiştirme dağılımı (Birim: m).	134
Şekil 7.17.	Sayısal çözümlemeler sonucunda (a) açıklığın yan ve iç duvarları (açıklığa karşıdan bakış), (b) açıklığın vadiye paralel yönde görünümü ile bunun gerisinde (açıklığa karşıdan bakış) ve (c) açıklığın uzun eksen boyunca alınan kesitte beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: “son iterasyon”da oluşan yenilme; öi: “önceki iterasyon”larda oluşan yenilme).	135
Şekil 7.18.	Zelve Açık Hava Müzesi'nde tarihsel ve kültürel açıdan büyük önem taşıyan ve sayısal çözümlemesi yapılan “Manastır”ın genel görünümü ve boyutları.	136
Şekil 7.20.	Sayısal çözümlemeler sonucunda açıklık çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: “son iterasyon”da oluşan yenilme; öi: “önceki iterasyon”larda oluşan yenilme).	139

Şekil 7.21. Açıklık çevresinde beklenen en büyük asal gerilme dağılımı (“-“ işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir; Birim: Pa).	139
Şekil 7.22. Sayısal çözümlemelere göre, açıklık çevresinde beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m).	140
Şekil 7.23. Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki en büyük açıklıklardan biri olan “L10” kodlu açıklığın boyutları ve genel görünümü.	141
Şekil 7.24. "L10" kodlu açıklığın sayısal çözümlemesinde kullanılan sonlu farklar açığı (a) ve açıklığın geometrisi (b).....	141
Şekil 7.25. Sayısal çözümlmeler sonucunda "L10" kodlu açıklığın çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: “son iterasyon”da oluşan yenilme; öi: “önceki iterasyon”larda oluşan yenilme).	142
Şekil 7.26. "L10" kodlu açıklığın çevresinde beklenen en büyük asal gerilme dağılımı (“-“ işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir; Birim: Pa).....	142
Şekil 7.27. Sayısal çözümlmeler sonucunda, açıklık çevresinde beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m).	143

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1. Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadide yüzeylenen Zelve tufünün RMR Kaya Kütlesi sınıflama Sistemi'ne göre sınıflandırılması ve kaya sınıfı puanları.	56
Çizelge 5.2. Yarı – yeraltı açıklıklarında yapılan iğne penetrometresi deneylerinin sonuçları.	60
Çizelge 6.1. Zelve tufüne ait X-ışınları kırınımı çözümlerinin sonuçları.	77
Çizelge 6.2. Birim hacim ağırlık, gözeneklilik (porozite), boşluk oranı, ağırlıkça ve hacimce su emme deneylerine ait sonuçlar.	81
Çizelge 6.3. Tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü deneylerine ait sonuçlar.	81
Çizelge 6.4. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (Id) deneylerine ilişkin sonuçlar.	87
Çizelge 7.1. Sayısal çözümlerde kaya kütlesi için belirlenen özellikler.	114
Çizelge 7.2. Sayısal çözümlerde kaya kütlesi için kullanılan özellikler.	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
c	Kohezyon
E	Elastisite modülü
F	Penetrasyon kuvveti
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FDM	Finite Difference Method (Sonlu Farklar Yöntemi)
G	Rijidite modülü
I_d	Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi
ISRM	International Society for Rock Mechanics
JRC	Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı
JCS	Süreksizlik yüzeyinin dayanımı
K	Sıkışma Modülü
NPR	Ortalama iğne penetrasyon direnci
ε	Makaslama birim deformasyonu
ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ_b	Temel içsel sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık
σ	Gerilme
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı
σ_n	Normal gerilme
σ_t	Çekme dayanımı
τ	Makaslama gerilmesi (dayanımı)
ΔL	İğne penetrasyon deneyinde penetrasyon miktarı
ν	Poisson oranı

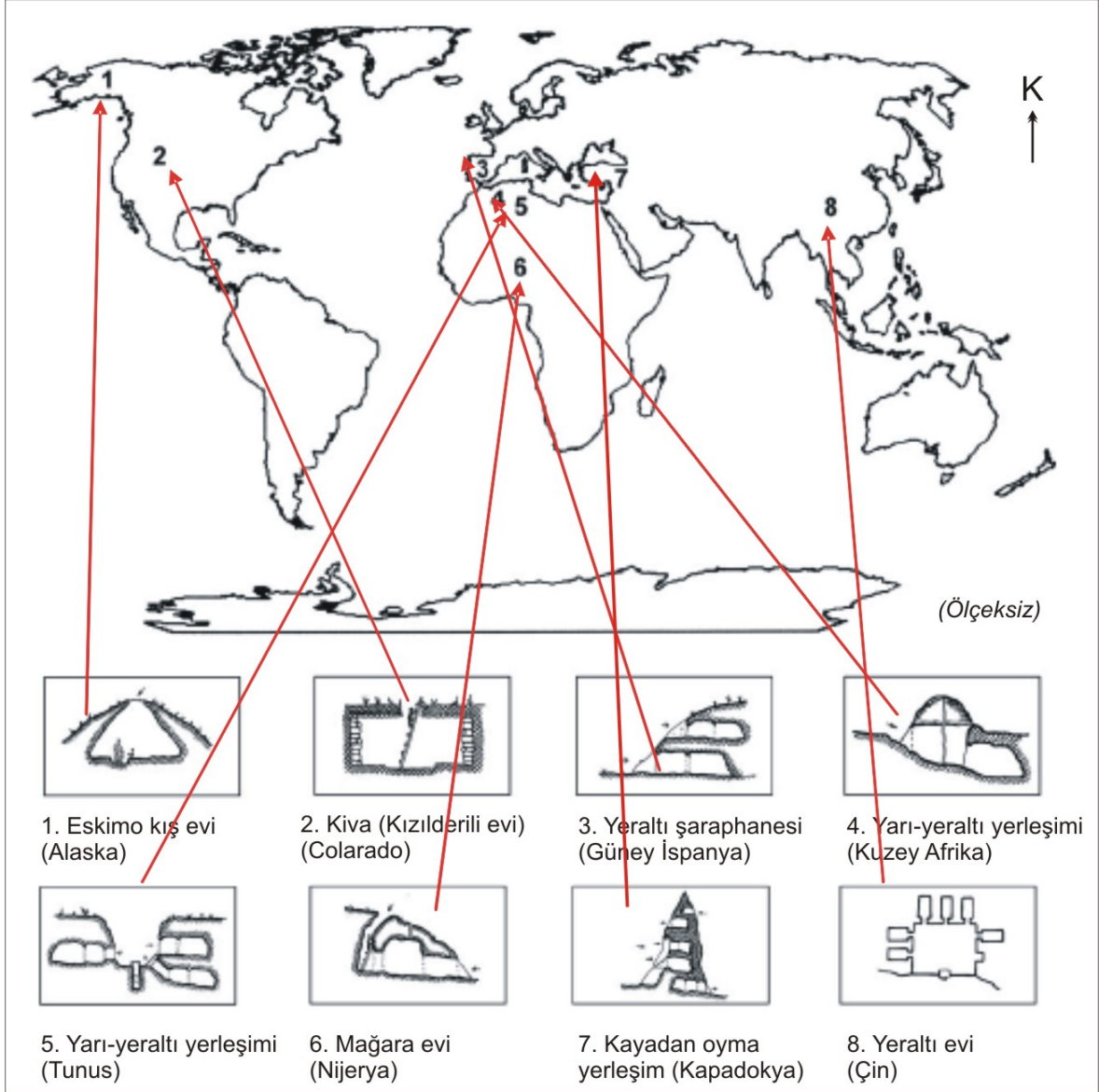
1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Dünyanın değişik bölgelerinde (örneğin; Mısır, Çin, Orta Asya, Türkiye) açılmış olan kayadan oyma yeraltı yerleşimleri; mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmemek, düşman saldırılarından ve doğal afetlerden korunmak, barınak, dini törenler ve tarım ürünlerinin depolanması gibi yaşamsal gereksinimlerin karşılanması amaçlarıyla çok eski zamanlardan beri tercih edilmektedir (Şekil 1.1). Bununla birlikte, günümüzde özellikle İskandinav ülkelerinde enerji santralleri, spor salonları vb. yapılar da yeraltında inşa edilmektedir. Bu nedenle, kaya mekaniği açısından, kayadan oyma yapıların uzun süreli duraylılığı günümüzde oldukça önemli bir konudur. Ayrıca geçmiş dönemlerde kaya içerisinde açılmış olan yerleşim alanlarının tarihi ve turistik değerleri de göz önünde bulundurulduğunda, bu tür yapıların duraylılığı günümüzde önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir.

Dünyanın farklı bölgelerindeki yeraltı / yarı-yeraltı (yamaçlarda yerleşim amacıyla açılmış sığ boşluklar) yerleşimlerinin önemli bir kesimi ülkemizde Orta Anadolu'daki Kapadokya Bölgesi'nde yer almaktadır. Bölgedeki Derinkuyu, Kaymaklı vb. gibi yeraltı şehirlerinin yanı sıra; Uçhisar, Ortahisar, Zelve, Göreme, Ihlara ve Ürgüp bölgelerinde çok sayıda yarı-yeraltı yerleşimi bulunmaktadır. Çoğunluğu 1500 yıldan eski olan ve tüfler (petrografik anlamda ignimbiritler) içerisinde açılmış olan söz konusu yapılar, kaya mühendisliği açısından insan yapımı yapıların uzun dönemli performansının en önemli örneklerindedir.

Kapadokya Bölgesi'ndeki Zelve kesimi tarih, turizm ve kültür açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, 1950'lerde üç kişinin yaşamını yitirmesiyle sonuçlanan duraysızlıklar nedeniyle Zelve Vadisi yerleşime kapatılmış olmasına rağmen, günümüzde halen açık hava müzesi olarak yerli ve yabancı turistlerin ziyaretine açıktır. Bununla birlikte, üç vadiden oluşan Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki özellikle 1. Vadi'nin yamaçlarında yer yer blok düşmeleri ve süreksizlikler boyunca kaymaların yanı sıra, kavlaklanma sonucu yarı-yeraltı açıklıklarında açıklık boyutlarının genişlemesiyle, bazı açıklıklarda bırakılmış

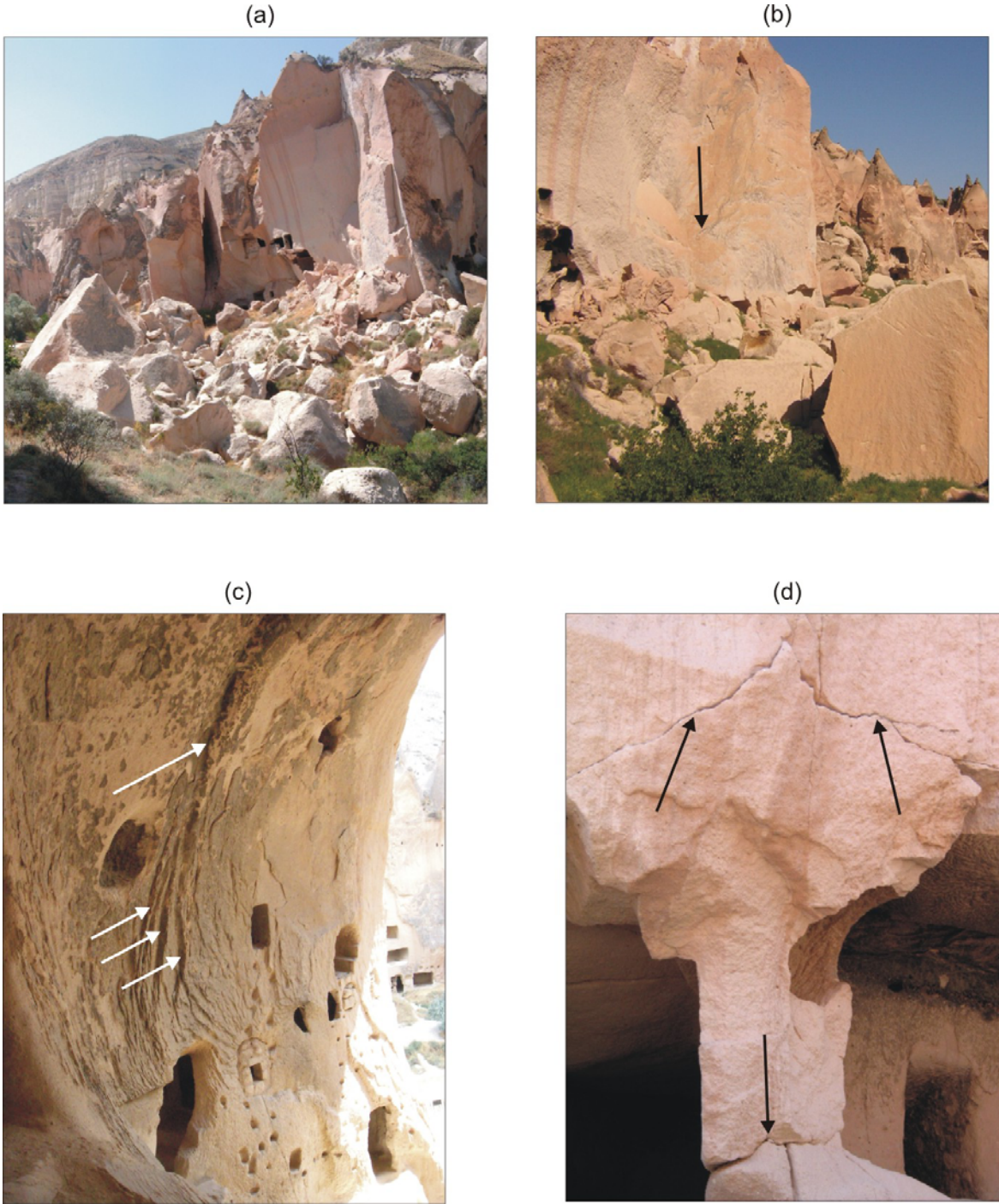


Şekil 1.1. Dünyadaki tipik bazı yeraltı ve yarı-yeraltı mimari örnekleri (Pardo and Guerrera, 2006).

topukların yenilmesiyle ve malzeme dayanımının zamana bağılı olarak azalmasıyla duraysızlık sorunları giderek artmaktadır (Şekil 1.2). Nitekim, 1. Vadi'nin giriş kısmında bulunan ve geçmişte tavanında kısmi bir göçüğün (Şekil 1.3a) meydana gelmiş olduğu kayadan oyma Geyikli Kilisesi 2009 yılında tamamen göçmüştür (Şekil 1.3b). Bu duraysızlık nedeniyle, 1. Vadi'nin giriş kesimi uzun süre kapatılarak ziyaretçilerin bu vadiye girişine izin verilmemiştir.

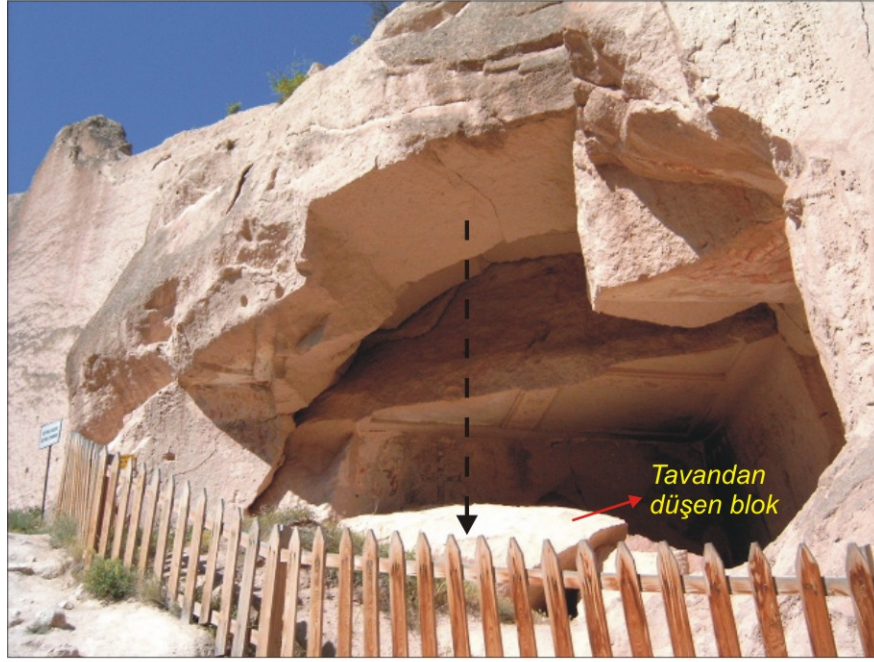
Gerek Kapadokya Bölgesi'nin, gerekse Zelve Vadisi'nin tarihi ve kültürel yönleriyle ülke turizmine sağladığı katkı açısından taşıdığı öneme rağmen, Kapadokya Bölgesi'nde tarihi kaya yapılarının korunması ve restorasyonu ile ilgili olarak kaya mekaniği konusunu da içeren çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bununla birlikte, Kapadokya'da bulunan yeraltı / yarı-yeraltı yerleşimlerinin oluşturduğu tarihi sit alanlarının önemli bir bölümünün içinde yer aldığı Zelve Vadisi'nde kayadan oyma yapıların içinde açılmış oldukları tüflerin indeks ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi ve kayadan oyma mekanların duraylılığının analitik ve sayısal yöntemlerle incelenmesi, karşılaşılan duraysızlık sorunlarının nedenlerinin ve ilgili faktörlerin belirlenmesi konularında ulusal ve uluslararası literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Gerek Zelve Vadisi'nin tarihi ve turistik önemi, gerekse yukarıda özetle belirtilen ve vadiyi tehdit eden duraysızlık sorunlarının giderek artıyor olması; Zelve Vadisi'ndeki kayadan oyma tarihi yapıların jeo-mühendislik açısından incelenerek, koruma ve restorasyon çalışmalarına yol gösteren sonuçları içerecek bir araştırmanın önemine ve gerekliliğine işaret etmektedir.

Zelve Açık Hava Müzesiyle ilgili olarak yukarıda belirtilen tehlike yaratabilecek sorunların yanı sıra, en çok ziyaret edilen kesim olması nedeniyle, Zelve 1 no.lu vadideki jeo-mühendislik sorunlarının, bunların gelişiminde etkili olan faktörlerin ve mekanizmalarının bu tez çalışması kapsamında araştırılması öngörülmüştür. Bu tez çalışmasının sonuçlarının ayrıca tarihi öneme sahip bu vadide gelecekte yapılabilecek koruma ve restorasyon çalışmaları için de bir temel oluşturacağı düşünülmüştür.



Şekil 1.2. Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi'de gelişen duraysızlık sorunlarına ilişkin örnekler: (a) kaya düşmeleri, (b) süreksizlikler boyunca kayma, (c) kavlaklanma nedeniyle açıklık boyutlarının artması ve (d) topuklarda ve açıklık girişlerindeki sorunlar.

(a)



(b)



Şekil 1.3 Zelve 1. Vadi'nin giriş kesimindeki kayadan oyma Geyikli Kilise: (a) önceki yıllarda kilisenin tavanında meydana gelmiş göçme, (b) 2009 yılında gelişen toptan göçme.

1.2. Yöntem ve Kapsam

Amacı yukarıda belirtilen bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde aşağıdaki aşamalar izlenmiştir.

- (a) Kapadokya Bölgesi'nde ve ayrıca Zelve Açık Hava Müzesi özelinde yapılmış yerbilimleri ve mühendislik amaçlarına yönelik çalışmalar literatürden derlenerek değerlendirilmiştir.
- (b) Zelve 1. Vadideki yarı-yeraltı açıklıklarının envanteri çıkarılmış, bu vadide gelişen duraysızlıklarda rolü olan süreksizliklerin karakteristikleri sistematik ölçümler alınarak değerlendirilmiş ve kaya kütlesi olarak tüflerin mühendislik sınıflaması yapılmıştır.
- (c) Gerek petrografik anlamda tanımlanabilmeleri, gerekse bozunma açısından değerlendirilebilmeleri amacıyla vadiden alınan tuf örneklerinde ince kesit çözümlenmeleri ve X-ışınları kırınım analizleri gerçekleştirilmiştir.
- (d) Vadideki kayadan oyma yapıların içinde açılmış olduğu tüflerin donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi süreçlerden hangi ölçüde etkilendiklerinin değerlendirilebilmesi amacıyla Zelve Açık Hava Müzesi girişindeki meteoroloji kayıt istasyonunda tez süresi boyunca sıcaklık, yağış ve nem ölçümleri alınmıştır. Ayrıca bu süreçlerin etkisi inceleme alanındaki iki yere atmosfere açık olacak şekilde kafes içinde bırakılan tuf örneklerinin yanı sıra, bazı yarı-yeraltı açıklıkları ile yamaç topuklarında kavlaklanmaya bağlı dökülmelerden periyodik olarak ölçümler alınmış ve değerlendirilmiştir.
- (e) Tüflerdeki aşınmanın boyutlarıyla ilgili değerlendirmelerde kullanılmak üzere, vadide dört farklı yerde kaya yüzeyine takılan özel çivilerden periyodik olarak aşınma ölçümleri alınarak aşınmanın zamana bağlı değişimi değerlendirilmiştir.
- (f) İnceleme alanının tarihi bir özelliğe sahip olması nedeniyle, izin verilebildiği ölçüde alınan tuf örnekleri üzerinde kaya mekaniği laboratuvar deneyleri

yapılarak, bu kaya türünün (Zelve tufü) fiziksel ve mekanik özellikleri tayin edilmiştir.

- (g) Elde edilen veriler esas alınarak atmosferik süreçlerin ve diğer faktörlerin vadide gelişen jeo-mühendislik sorunları üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca, vadeden seçilen ve duraysızlıkların gözlemlendiği tipik bazı yarı-yeraltı açıklıklarının sayısal, bir kaymanın da geriye dönük analizleri yapılarak bu duraysızlıklarda yönlendirici olabilecek faktörler değerlendirilmiştir.

Ana hatlarıyla yukarıda belirtilen aşamalar izlenerek sonuçlandırılan bu tez 8 bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümünde çalışmanın amacı, kapsamı ve izlenen yöntemler verilmiş, 2. Bölümde ise, inceleme alanı Kapadokya Bölgesi'ndeki konumu itibariyle tanıtılmıştır. 3. Bölümde Kapadokya Bölgesi'nde daha önce yapılmış olan çalışmalar ile bunlardan elde edilen başlıca sonuçlar; yerbilimleri, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği ve koruma-restorasyon başlıkları altında konularına göre gruplandırılarak sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca ilgisi gereği, benzer tüflerin jeo-mühendislik özellikleri ile antik yeraltı açıklıkları konularında yapılmış uluslararası literatürde yayımlanmış çalışmalar da özetle değerlendirilmiştir. İnceleme alanının jeolojik özelliklerinin verildiği 4. Bölümü saha çalışmalarının konu edildiği 5. Bölüm izlemektedir. 5. Bölümde, Zelve 1. Vadi'de yapılan ölçümler ve gözlemler ile bunlara ilişkin değerlendirmeler yer almaktadır. Tezin 6. Bölümünde; Zelve Açık Hava Müzesi'nde yamaçların ve açıklıkların duraylılığının araştırılması amacıyla yapılan ve analitik ve sayısal analizler ile malzeme davranışının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere, Zelve Vadisi'nde yüzeylenen tufün dayanım ve deformasyon özelliklerinin yanı sıra, indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tuf örnekleri üzerinde yapılan kaya mekaniği deneylerinin sonuçları ve değerlendirilmesi sunulmuştur. 7. Bölümde ise, mevcut yamaçlar ve duraysızlık olasılığı bulunan açıklıklarla ilgili olarak yapılan analitik ve sayısal analizler ile bu analizlerden elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Tez çalışmasının son bölümü olan 8. Bölümde ise, bu tez çalışması kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar sunulmuş ve önerilerde bulunulmuştur.

2. İNCELEME ALANININ TANITIMI

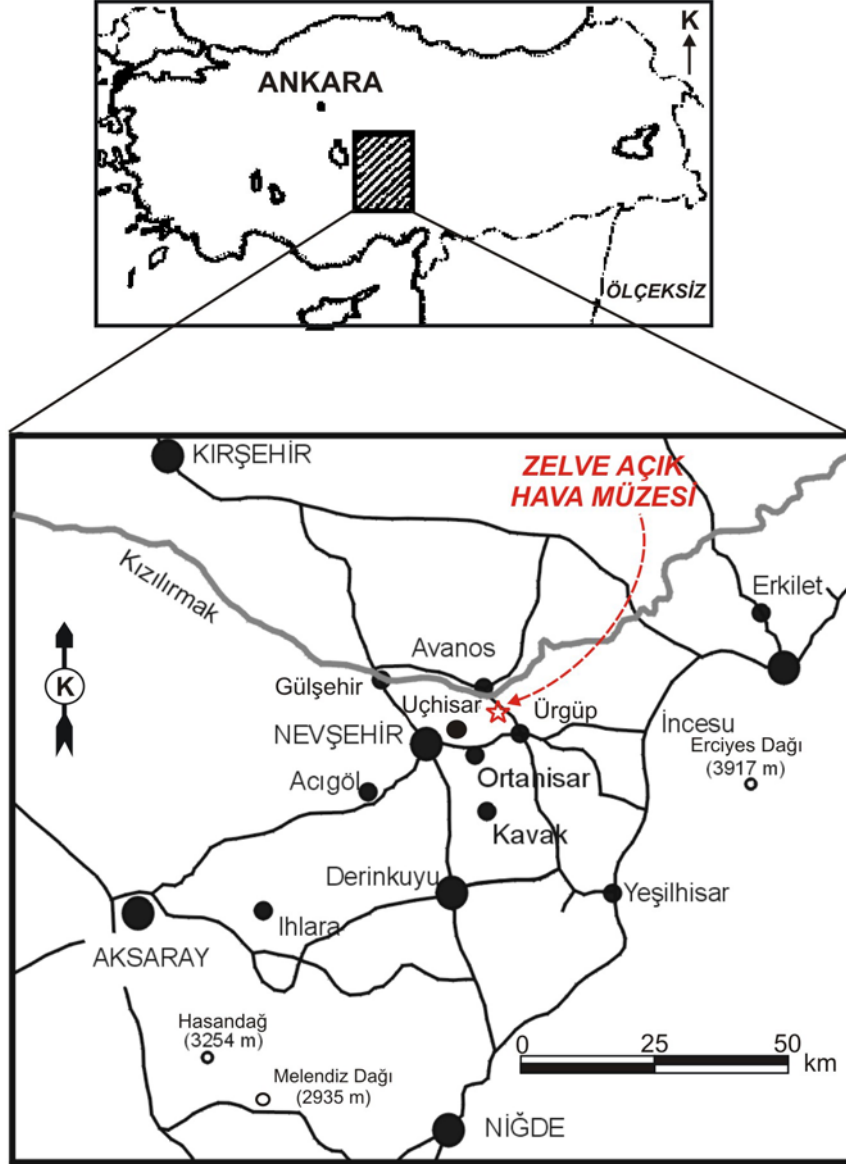
2.1. Coğrafik Konum

Zelve Açık Hava Müzesi'nin de içinde bulunduğu Kapadokya Bölgesi; günümüzde kuzeyde Kızılırmak, doğuda Yeşilhisar, güneyde Hasan ve Melendiz Dağları, batıda Aksaray ve kuzeybatıda Kırşehir ile sınırlanmaktadır (Şekil 2.1). Kapadokya bölgesinin günümüz sınırlarının hemen hemen merkezinde yer alan Ürgüp ilçesi, kuzeybatısında yer alan Ankara'ya 310, doğusunda bulunan Kayseri'ye ise 65 km uzaklıktadır. İnceleme alanı ve çevresindeki başlıca yerleşim birimleri Ürgüp ve Avanos ilçeleri ile Uçhisar ve Ortahisar kasabalarıdır (bkz. Şekil 2.1).

2.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Bölgede genellikle kara iklimi hüküm sürmekte olup; kışlar soğuk ve kar yağışlı olup, kar örtüsü uzun süre yerde kalmaktadır. Bununla birlikte, yazlar sıcak ve kurak geçmekte, ilkbaharda ise yağışlar genellikle yağmur şeklinde gerçekleşmektedir. Ergüler (2009) tarafından 1995 – 2007 yılları arasındaki Nevşehir meteoroloji istasyonu verileri esas alınarak yapılan değerlendirmeye göre, yağışların özellikle Aralık ve Nisan ayları arasında diğer aylara göre daha yoğun olduğu ve yıllık ortalama yağışın 272.2 mm ile 523.3 mm arasında değiştiği ve ortalama 374.1 mm kaydedildiği belirlenmiştir. Kurak mevsimin ise, Haziran ve Eylül ayları arasında gerçekleştiği, en düşük sıcaklığın ise -27 °C olarak kaydedildiği belirlenmiştir.

Zelve Açık Hava Müzesi'nde hüküm süren yerel iklim koşullarının belirlenmesi ve sürekli olarak izlenmesi amacıyla, Prof. Dr. Ömer Aydan (Tokai Üniversitesi, Japonya) ve tez danışmanı tarafından müze girişine ve içerisine yerleştirilen 2 adet meteoroloji kayıt istasyonundan alınan yaklaşık 5.5 yıllık veriye göre, bölgede en yüksek sıcaklıklar ortalama 32–33 °C ile Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleşmiş olup, kaydedilen en düşük ve en yüksek sıcaklıklar sırasıyla, -20 °C (Ocak, 2009) ve 48 °C (Temmuz, 2008)'dir.



Şekil 2.1 Kapadokya Bölgesi'nin Türkiye'deki ve inceleme alanının bu bölge içindeki konumlarını gösteren yer bulduru haritaları.

Kapadokya bitki örtüsü bakımından çok zayıftır. Orman ve fundalıklar yok denecek kadar azdır. Ovalar bozkır (step) görünümündedir. Kızılırmak Vadisi'nde söğüt, kavak ve selvi ağaçları ile Oylu Dağı'nda cılız meşeliklere rastlanır. Bölgede çayır ve meralar % 28, ekili-dikili alanlar ise % 69 oranında yayılım göstermektedir (Kültür Bakanlığı, 2011).

2.3. Morfoloji

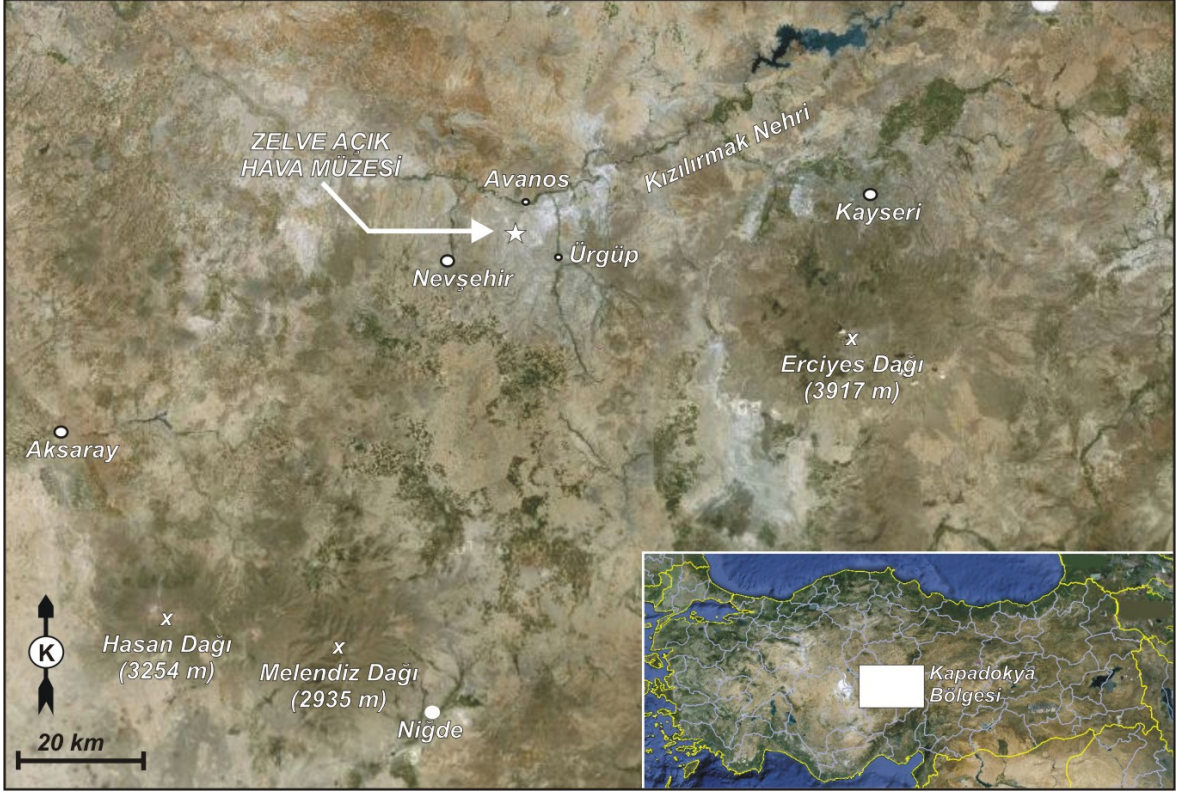
Kapadokya Bölgesi yüksek bir plato görünümü sergilemekte olup, bölgedeki topoğrafik yükseklikler 1300 m ile 1400 m arasında değişmektedir. Bölgeyi çevreleyen en önemli yükseklikler doğuda Erciyes Dağı (3917 m) ile güneybatıda Melendiz Dağı (2935 m) ve Hasandağı (3254 m)'dir (Şekil 2.2). Bölgedeki en önemli akarsu olan Kızılırmak Nehri bölgenin kuzeyindeki Avanos ilçesinin içinden geçmektedir.

Bölgede, Kızılırmak Vadisi'nin genişlemesiyle meydana gelen ovalar küçük, ancak verimlidir. Bu ovalarda genellikle sanayi ve yumru bitkileri yetişir. Kızılırmak, özellikle Avanos ve Gülşehir bölgesinde genişler. Bölgenin en büyük ovası ise Derinkuyu Ovası'dır ve 20 km uzunluğunda olup, en geniş yeri 16 kilometredir (Kültür Bakanlığı, 2011). Zelve Açık Hava Müzesi'nin de içinde yer aldığı Zelve Vadisi ise üç vadiden oluşmaktadır.

2.4. Ulaşım ve Sosyo-Ekonomik Durum

Tarihin ilk dönemlerinden bu yana önemli bir coğrafik konuma sahip olan ve tarihi "İpek Yolu"nun da içinden geçtiği Kapadokya Bölgesi'ne ulaşım havayolu ile Nevşehir ve Kayseri üzerinden, karayolu ile ise Nevşehir; Aksaray, Kırşehir, Kayseri ve Niğde'ye komşu konumda olduğu için bir çok farklı güzergah üzerinden yapılabilmektedir.

İnceleme alanının idari olarak bağlı olduğu Nevşehir ilinin yüz ölçümü 5467 km² olup, 2000 yılı nüfus sayımına göre nüfusu ise 309914'dür.



Şekil 2.2 İnceleme alanını da içeren Kapadokya Bölgesi'nin uydu görüntüsü ve Türkiye genelindeki yeri (Google Earth, 2011).

Kapadokya Bölgesi'nde halkın en önemli gelir kaynakları, başta tarım olmak üzere, turizm ve hayvancılıktır. Tarıma uygun alanlarda bağcılık faaliyetleri ile birlikte patates, buğday ve arpa tarımı yapılmaktadır (Kültür Bakanlığı, 2011).

2.5. Bölgenin Tarihçesi ve Kültürel Önemi

Kalkolitik dönemden (M.Ö 5000 – 3000) bu yana Hitit, Asur, Kaloni, Frig, Tabal, Pars, Selevkus, Bizans, Selçuk, Karamanlı ve Osmanlı dönemlerinde iskan görmüş olan bu yörenin en önemli özelliği; peribacaları ve kışın ılık, yazın serin olan ve bu nedenle her mevsim için uygun iç iklim koşullarına sahip kayadan oyma mekanlardır (Şekil 2.3). Göreme, özellikle 7 ve 13. yüzyıllar arasında Hıristiyanların yerleşmesiyle önemli bir dini merkez haline gelmiştir. Kayadan oyma yapılar ve tüflerden oluşan peri bacaları nedeniyle yüzyıllar boyunca sürekli yerleşim alanı olarak tercih edilmiştir. Hitit, Asur, Kaloni, Frig, Tabal, Med ve Pars uygarlıklarının bulunduğu bu doğal ve kültürel miras, 1985 yılında UNESCO tarafından dünyanın 7 harikasından birisi olarak "Dünya Kültür Mirası Listesi"ne alınmıştır. (Kültür Bakanlığı, 2011).

Zelve bölgesi ise, Göreme-Avanos karayolundan 2 km içeride olup, üç vadiden oluşmaktadır ve peribacalarının en yoğun olduğu yerdir. Vadideki peribacaları sivri uçlu ve geniş gövdelidir. Su ve rüzgar aşındırmasının oluşturduğu doğal vadiler ve bunları çevreleyen kayalar içinde oyulmuş kayadamlar (kaya evleri) Kapadokya'nın en tipik yerleşim yerleridir. Bölge, 9. ve 13. yüzyıllar arasında Hıristiyanların önemli yerleşim ve dini merkezlerinden birisi olmuştur. Öte yandan, papazlara ilk dini seminerler de bu yörede verilmiştir. Balıklı, Üzümlü ve Geyikli Kiliseler vadinin en önemli kiliseleri olup, ikonoklastik dönem (8. – 9. yy) öncesine aittir. Yakın zamanlara kadar yöre insanının yaşamaya devam ettiği ilk vadide taştan yapılmış ve eklemelerinde beton kullanılmış bir cami bulunmaktadır. Kapadokya'da bulunan tarihi sit alanlarının önemli bir bölümü Zelve Vadisi ve civarında yer almaktadır (Şekil 2.4). Ancak 1950'li yıllarda vadideki bazı kaya yapılarında meydana gelen duraysızlıklar nedeniyle üç kişinin yaşamını yitirmesi sonucu vadi yerleşime kapatılmış olup, sadece müze olarak turizme açıktır (Şekil 2.5). Halen turistlerin ilgi odaklarından biri olan Zelve Açık Hava Müzesi, üç vadiden oluşmakta ve gerek barınak gerekse ibadet amacıyla kullanılmış değişik boyutlardaki kayadan oyma

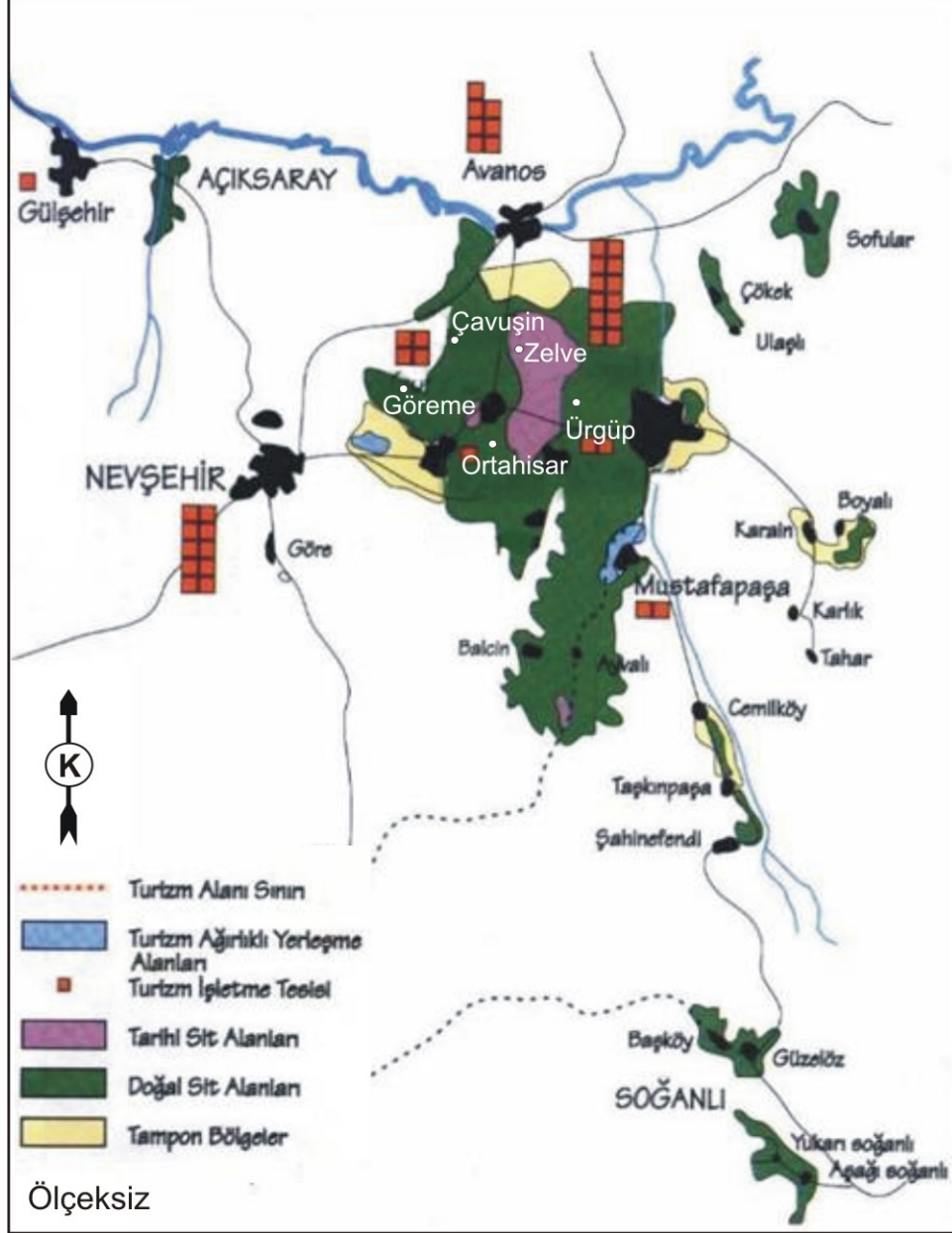
(a)



(b)



Şekil 2.3. Kapadokya Bölgesi'ndeki (a) peribacaları (Ürgüp) ve (b) kayadan oyma bazı mekanlar (Zelve Açık Hava Müzesi).



Şekil 2.4. Kapadokya Bölgesi'ndeki tarihi ve doğal sit alanlarını gösteren harita (Kültür Bakanlığı, 2011).



Şekil 2.5. Zelve Vadisi'nde duraysızlığa maruz kalmış (a) bazı kayadan oyma mekanlar ile (b) ve (c) doğal yamaçlardan görüntüler.

antik yeraltı açıklıklarını ve kaya düşmesine açık dik doğal yamaçları içermektedir (Şekil 2.6). Bu vadilerden özellikle 1 no.lu vadi, kaya mühendisliği açısından içerdiği tehlike yaratabilecek sorunlarıyla ve en çok ziyaret edilen kesim olmasıyla tipik bir ortamdır. Bu nedenle, tez çalışmasının 1. Vadi'de gerçekleştirilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

ŞEKİL 2.6.

Şekil 2.6. Zelve Açık Hava Müzesiyle ilgili olarak; (a) Vadi planı ile (b) 1. Vadiye (c) 2. Vadiye ve (d) 3. Vadiye ait panoramik görüntüler.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kapadokya Bölgesi'nde birçok yerli ve yabancı yerbilimci araştırma yapmış olmakla birlikte, söz konusu bu araştırmaların büyük kısmı bölgenin jeolojik, jeomorfolojik ve tektonik özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunların yanı sıra bölgede, daha az sayıda olmakla birlikte, kaya bozunması, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği konularında da bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde; Kapadokya Bölgesi'nde yerbilimleri, mühendislik jeolojisi, kaya mekaniği ve restorasyon konularında yapılmış çalışmalar ve uluslararası literatürde benzeri ortamlarda gerçekleştirilen çalışmalar ile bunlardan elde edilen başlıca sonuçlar dört başlık altında derlenerek aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

3.1. Kapadokya Bölgesi'nde Yerbilimleri Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Bölgedeki en eski jeolojik çalışma; Kayseri, Nevşehir ve Niğde arasındaki genç volkanitleri inceleyen Lahn (1941, 1945 ve 1949) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bölgedeki volkanizmanın Geç Miyosen'de başlayıp Kuvaterner'e kadar devam ettiğini öne süren araştırmacı, Erciyes Dağı ile Hasan Dağı'ndaki volkanik aktiviteyi de incelemiştir.

Tromp (1942); Niğde-İncesu, Kızılırmak Nehri ve Tuz Gölü arasında kalan alanda gerçekleştirdiği çalışmada; Kapadokya Bölgesi'nin simgesi olan peri bacalarının Pleyistosen yaşlı kalın kırmızı tuf serileri içinde geliştiğini belirtmiştir. Araştırmacı peri bacalarının oluşumunda rol oynayan faktörleri; yamaçların alt kısımlarda bulunan ve daha kolay aşınan tufün derin bir şekilde oyulması ve üst kısımlarda yer alan şapka ile aşınmadan korunan konik biçimli gövdeler ortaya çıkması olarak değerlendirmiştir. Ayrıca peri bacalarının oluşumunda, rüzgar etkisinden çok yağmur sularının yüzeydeki akışının daha önemli olduğunu vurgulamıştır. Yağmur sularının bu denli etkili ve güçlü yüzey akıntısı olarak gelişmesinde ise, en önemli faktörün bitki örtüsünün azlığı olduğunu öne sürmüştür.

Chaput (1947); Ürgüp formasyonuna jeolojik yaş (Geç Miyosen) veren ilk araştırmacı olup, Ürgüp-Göreme arasındaki peri bacalarının erozyon sonucu oluştuğunu ve bunların üzerindeki örtü (şapka) kayacının bazalt olduğunu öne sürmüştür.

Ortaköy, Nevşehir, Avanos ve İncesu civarındaki tüflerin Neojen dönemindeki bir volkanik aktivite sonucunda oluştuğunu belirten Pisoni (1961), bölgedeki tüflerin ve diğer karasal çökellerin tektonik aktiviteden önemli derecede etkilenmediklerini öne sürmüştür.

Nevşehir ve civarında jeomorfoloj konusunda araştırmalar yapan Sür (1966 ve 1972), bölgenin morfolojisinin Kuvaterner sırasında hüküm süren yarı-kurak bir iklimin etkisi altında geliştiğini öne sürmüştür. Araştırmacı ayrıca, peri bacalarının yaklaşık 100 m kalınlığındaki homojen tuf kayacının erozyonu sonucu şekillendiğini ve bunları üzerleyen (şapkanın) kaya türünün bazalt ve andezitik lavlardan oluştuğunu da belirtmektedir. Aynı araştırmacı, peri bacalarının en çok bu bölgede yoğunlaşmış olmasının nedenini de tüflerin kalınlığı ve aşınabilirliği, topoğrafyanın dikliği ve iklimle ilişkilendirmiştir.

Orta Anadolu'daki Senozoyik yaşlı volkanik arazideki volkano-sedimanter çökellere ilk kez "Ürgüp formasyonu" adını veren Pasquare (1968), bu formasyonu 18 üyeye ayırarak incelemiştir. Bu araştırmacıya göre peri bacaları, Ürgüp formasyonuna ait Kavak ve Tahar üyeleri, Göreme Açık Hava Müzesi ise Kavak üyesi içinde gelişmişlerdir.

Orta Anadolu'daki Senozoyik yaşlı volkanizma üzerine çalışan Ercan (1986), volkanik aktiviteyi, yaşlarına göre 6 gruba ayırmış ve Göreme'deki piroklastik kayaların (tüflerin) Geç Miyosen-Pliyosen zaman aralığında genellikle Erciyes, kısmen de Hasandağ ve Acıgöl volkanlarından çıkan malzemelerden oluştuğunu belirtmiştir.

Emre ve Güner (1988), Ürgüp civarındaki peri bacalarının oluşumunu inceledikleri çalışmalarında, bu oluşumların bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik özellikleriyle yakından ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar özellikle; kaya türünün, tüflerin içerdiği tabakalanmanın eğiminin ve eklem sistemlerinin, ayrıca tüflerin tekdüze bir petrografik bileşime sahip olmalarının bu oluşumdaki başlıca faktörler olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, peri bacalarının oluşumuyla ilgili aşamalar üzerinde de durmuşlardır.

Kapadokya Bölgesi'ndeki Neojen ve Kuvaterner yaşlı volkanizmayı inceleyen Pasquare et al. (1988), çalışmalarını volkanik birimlerin alansal yayılımı ve başlıca tüflerin kökeni konularında yoğunlaştırmışlardır. Araştırmacılar, bölgede etkiyen volkanizmanın Afro-Arap ve Avrasya plakaları arasındaki kıtasal çarpışmayla ilişkili olduğunu belirterek, volkanik etkinliğin üç aşamaya ayrılarak değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. Özellikle Ürgüp ve civarında gözlenen Ürgüp formasyonuna ait Kavak üyesinin ikinci aşama sırasında oluştuğunu belirten araştırmacılar, ayrıca bölgedeki en büyük volkanların DKD-BGB doğrultusunda dizilim gösterdiğine de işaret etmişlerdir.

Schumacher et al. (1990), bölgedeki piroklastik çökellerin stratigrafisini ve özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, söz konusu çökelleri sekiz adet tuf seviyesine ayırarak tüflerdeki kaynaşma derecesinin tabandan yüzeye doğru arttığını belirtmişlerdir.

Erciyes Dağı'nda çalışan Ayrancı (1991), jeokimyasal bulgulara göre, peri bacalarının şapkasını oluşturan örtü kayasının doleritik olivin-bazalt olduğunu belirtmektedir.

Temel (1992), Kapadokya bölgesini 12 ayrı birime ayırarak incelemiş ve Zelve üyesinin, Zelve, Çavuşini, Çökek ve Ulaşlı köyleri ile Avanos'un güney ve güneydoğusunda, Kızılırmak'ın güneyinde ve Mustafapaşa civarında yüzeylendiğini belirtmiştir. Bu birim ilk kez söz konusu araştırmacı tarafından adlandırılmış olup, birimin en iyi gözlemlendiği yer Zelve'dir ve kalınlığı 118 m'dir.

Ünlü (1993), Göreme ve çevresinde yüzeyleyen tüflerdeki renk değişimlerinin araştırılması amacıyla Ürgüp formasyonunun Kavak, Tahar ve Sarımaden üyelerine ait tuf örnekleri üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, kil mineralleri dışındaki diğer minerallerin kaya parçacıkları ve volkanik camın tüflerin rengi üzerinde etkili olan başlıca faktörler olduğunu belirlemiştir.

Toprak and Göncüoğlu (1993), jeolojik anlamda “Kapadokya Volkanik Bölgesi” olarak da adlandırılan bölgedeki volkanizmanın Anadolu bloğu ile Avrasya plakasının çarpışması sırasında gelişen çekilme türü tektonik rejimle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Le Pennec et al. (1994), Nevşehir Platosu’nda yüzeyleyen Neojen yaşlı tüflerin stratigrafisini, dağılımını ve kaynağını araştırdıklarını çalışmalarında, Kavak tufünün oluşumuna malzeme sağlayan volkanların Derinkuyu ile Nevşehir arasında kalan bir alanda bulduklarını saptamışlardır.

Toprak (1994), Ürgüp formasyonunun kuzey sınırından geçen Kızılırmak Fay Zonu’yla ilgili çalışmasında, bu fay zonunun tüfler ile bölgedeki sedimanter kayalar arasında bir set (bariyer) oluşturduğunu belirtmektedir.

Temel and Gündoğdu (1996)’nın Kapadokya Bölgesi’ndeki zeolit oluşumları ile eriyonit arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmadan sonra, Temel et al. (1998)’un çalışmasında; Ürgüp formasyonunu oluşturan farklı tuf üyeleri jeokimyasal yöntemlerle daha ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu birimlerin dağılımları ile bunların oluşumunda rol oynayan volkanik aktivitelerin kaynakları araştırılmıştır.

Froger et al. (1998), Neojen yaşlı tüflerle karakterize edilen Kapadokya Bölgesi’ndeki bu tüflerin kaynağı olan kalderaların jeolojik zaman içinde tektonik ve sedimanter süreçlere bağlı olarak gömüldüğünü ve arazide kolaylıkla belirlenemediklerini vurguladıkları çalışmalarında, jeofizik yöntemler ve uydu

görüntülerinden yararlanarak iki büyük “kaldera kompleksi”nin varlığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar, elde ettikleri sonuçların Le Pennec et al. (1994) tarafından Kapadokya Bölgesi’ndeki tüflerin dağılımının ve kaynaklarının araştırıldığı çalışmanın sonuçlarıyla da uyumlu olduğunu vurgulamışlardır.

Le Pennec et al. (2005), Kapadokya Bölgesi’ndeki farklı tüf seviyelerinin stratigrafisini ve yaşlarını paleontolojik, radyokronoloji, jeokimyasal ve paleomanyetik yöntemlerle araştırdıkları çalışmalarında, belirledikleri yaş değerleri ile bölgede yapılan bir çok çalışmadan belirlenen yaş değerlerinin çok uyumlu olmadığını saptamışlardır. Bu nedenle, tüflerin korelasyonu sırasında K–Ar (Potasyum–Argon) yaşlarının kullanılmasında dikkatli olunması gerektiğini belirtmişlerdir. Kapadokya bölgesinde karşılaşılan bu sorunun tüflerin kaynağı olan kalderelerin patlama frekansının daha önceki çalışmalardan belirlenen K–Ar yaşlarının çözünürlüğünden daha yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

3.2. Kapadokya Bölgesi’nde Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Konularında Yapılmış Çalışmalar

Kapadokya Bölgesi’nde, özellikle Ürgüp ve Ortahisar’da sık sık kaya düşmesi sorunlarıyla karşılaşılmaktadır. Ortahisar’daki mühendislik jeolojisi sorunlarını kapsayan çalışmasında Doyuran (1976), Ortahisar kalesindeki kaya düşmeleri üzerinde durmuştur. Bu araştırmacı tüfleri, kaynaşma derecelerini göz önünde bulundurarak, üç ayrı gruba ayırmış ve inceleme alanındaki mühendislik sorunlarını doğal (çatlaklar ve eklem sistemleri) ve insan kökenli (aşırı oymalar) olmak üzere iki farklı şekilde değerlendirmiştir. Doyuran (1976), bölgedeki kaya düşmesi riskini en aza indirmek için; kaya düşmelerini önlemek yerine düşen kayaların etkin olabileceği alanın en aza indirgenmesi, Ortahisar kalesinde düşme olasılığı yüksek olan blokların gerekli güvenlik önlemleri alınarak düşürülmesi, gelecekte sorun oluşturabilecek blokların belirli bir alanda tutulması ve bu alan dışında kalan konutların korunması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca araştırmacı, afet alanı olarak tanımladığı alan içine düşecek blokların sıçramasını önlemek

amacıyla taban kayacının, çarpma sırasında oluşacak şoku kısmen emebilecek uygun bir örtü ile kaplanmasını ve bu alanın dayanma duvarları ile sınırlandırılması gerektiğini öne sürmüştür.

Erguvanlı and Yüzer (1977), bölgede tüfler içinde değişik dönemlerde insanlar tarafından oluşturulmuş tarihi ve güncel yeraltı açıklıkları üzerinde durarak, bunların çok amaçlı olarak kullanımında kolay kazılabilirlik ve yalıtım özelliklerine sahip olmalarının rol oynadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, Göreme Kilisesi'nden aldıkları tuf örneklerinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini de laboratuvar deneyleriyle tayin etmişlerdir. Araştırmacıların Ürgüp, İhlara, Kaymaklı ve Derinkuyu'dan aldıkları örnekler üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda, Ürgüp'e ait tuf örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin diğer bölgelerden alınan tuf örneklerinininkilere göre en düşük oldukları belirlenmiştir.

Lizzi (1982), Göreme'deki kaya yapılarında giderek artan bazı sorunlarla karşılaşılmasının başlıca nedenlerini; yüzey erozyonu, suyun kayanın içine süzülmesi, kaya kütlelerinin çökmesi ve insanların özellikle bu yapıları ve civarını ziyaret ettikleri sırada neden oldukları aşınma şeklinde sıralamıştır. Bu araştırmacıya göre, mikro bitkilendirmenin Göreme'deki kayadan oyma yapılarının aşınmadan korunmasında önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca Lizzi (1982), doğal anıtların korunması amacıyla tüflerdeki doğal süreksizliklerin doldurulması, kimyasal madde kullanımı, drenaj deliklerinin açılması ve düşmüş blokların kaldırılması ve kaya saplamlarının kullanılmasının kaya düşmelerinin önlenmesi için başlıca koruma teknikleri olabileceğini de belirtmiştir.

Nevşehir-Ürgüp arasındaki tüflerin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştıran Erdoğan (1986); yaptığı mineralojik ve kimyasal analizler ile, kaya mekaniği deneylerine göre, Kavak tufünün yapı malzemesi olarak uygun olmadığı sonucuna varmıştır.

Malliet and Rossi (1986) Kapadokya Bölgesi'nde yaptıkları çalışmada; yağmur sularının yüzey erozyonuna ve eklemler (çatlaklar) boyunca süzülen suyun kayadan oyma tarihi yapıların duvarlarındaki boyamaları tahrip etmesine neden olduğunu, ayrıca aldıkları ölçümler sonucunda bazı şev duraysızlığı sorunlarının varlığını belirlemişlerdir.

Yılmaz (1986, 1993), Göreme Açık Hava Müzesi'nde yaptığı hidrojeoloji ve kaya bozunması konulu çalışmalarında; erozyonun ve kaya düşmelerinin müze çevresindeki önemli sorunlar olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, drenaj borusu uygulamasının yanı sıra, rüzgardan kaynaklanan erozyonun önlenmesi için bitkilendirme konusuna önem verilmesini de önermiştir. Ayrıca bu çalışmalarda; eklemlerin çimentoyle kapatılıp, kaya sapsamaları takılarak ve istinat duvarlarının da inşasıyla kaya düşmelerine karşı önlem alınması şeklinde önerilerde bulunulmuştur.

Göreme'deki peri bacalarında yerinde deneyler yapan Malliet (1988), bölgeden aldığı kaya parçalarıyla karıştırdığı değişik bağlayıcılardan bir harç oluşturmuştur. Araştırmacı, kaya yüzeylerinde uyguladığı bu harcın bir yıl sonra inceleme yaptığı tüm yerlerde kaya yüzeyinden ayrıldığını gözlemlemiştir.

Erdoğan (1989) hafif yapı malzemesi olarak Nevşehir ve çevresinde bulunan tüflerin kullanılabilirliklerinin araştırılması amacıyla bölgede bulunan Kavak ve Sarımaden tüfleri üzerinde incelemeler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, Kavak ve Sarımaden tüflerinin kolayca ayrıştıklarını ve 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Sarımaden tufünün dağıldığını, bu kayaların çok uzun süredir eski yapılarda kullanılmasına rağmen, iyi bir performans göstermediklerini ve bu nedenle TSE 2513 Standardı'nın revize edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Erdoğan (1991), Göreme'deki kayadan oyma kilisenin içinde açıldığı Kavak tufünün ayrışmasını etkileyen faktörleri araştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda; suya doymun olması halinde tufün mekanik özelliklerinde %60'a varan bir azalmanın meydana geldiği ve yağış sularının yüzeyden itibaren kayacın içinde 18 cm derine kadar süzüldüğü saptanmıştır. Ayrıca, bu derinlik zonu içinde donma-çözülme süreçlerinin de kayaya zarar verdiği belirlenmiştir.

Topal (1995) ve Topal and Doyuran (1994, 1995, 1996, 1997, 1998), Ürgüp ve Göreme'deki tüflerde (Kavak üyesi) gözlenen bozunmanın, bunların kimyasal ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri ve peri bacalarının oluşum mekanizması konularında ayrıntılı çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, bölgedeki peri bacalarının oluşumunda kayanın içerdiği süreksizliklerin rolünü araştırmışlar ve peri bacalarının boyutunda, şeklinde ve diziliminde; süreksizliklerin arasındaki uzaklığın, süreksizlik yüzeylerinin açıklığının, süreksizliklerin devamlılıkları ile eğim ve doğrultularının başlıca denetleyici faktörler olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmalarda peri bacaları için bir oluşum modeli önerilerek bacaların üzerindeki şapka konumundaki kaya türünün bu oluşumda önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiş ve incelenen Kavak tufünün mineralojik-petrografik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ile bunların değişim aralıkları tayin edilmiştir. Bunun yanı sıra, kimyasal bozunmanın eklemler boyunca 20 cm, kaya yüzeyinin likenle kaplı olması durumunda 2 cm kadar derine nüfuz ettiği saptanmıştır. Ayrıca, kayacın fiziksel bozunma derecesinin tahmininde tek eksenli sıkışma dayanımı ile sonik hız parametrelerinin önem taşıdığı, tufün tuz kristalleşmesine karşı duyarlı ve donma-çözülme sürecinin kayacın dağılma davranışında etkili olduğu da aynı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Bu araştırmacılar, peri bacalarının içinde yer alan topuklardaki erozyon miktarının kaya içine paslanmaz çiviler yerleştirilerek ve çivilerin boylarındaki değişimin belirli zaman aralıklarında ölçülerek belirlenebileceğini önermişleridir.

Aksaray – Ihlara Vadisi'nde yüzeylenen tüflerde görülen duraysızlık mekanizmalarının araştırılan Binal (1996), Ihlara Vadisi'nin belirli bir kesiminde Kızılkaya ignimbiritlerinde görülen olası blok devrilmeleri ile ilgili kinematik analizler yaparak, tabanı aşınmış tek bloklarda ve blok sistemlerinde devrilme türü yenilme mekanizmaları belirlemiştir. Araştırmacı ayrıca, Ihlara Vadisi'nde yüzeylenen Selime tufünün fiziksel ve mekanik özelliklerini de araştırmıştır. Araştırmacının elde ettiği sonuçlara göre, söz konusu tüflerin dayanım ve deformasyon açısından Kavak tufüne benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Aynı araştırmacı tarafından Türkiye'deki çeşitli il ve ilçe merkezlerinin meteoroloji kayıtları esas alınarak hazırlanan donma-çözülme haritasına göre, söz konusu tüflerin yıllık 10-15 kez donma-çözülme periyoduna sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Bölgede son yıllarda, tüflerin içinde açılmış kaya yapılarının önemi dikkate alınarak kaya mekaniği ağırlıklı araştırmalar da gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmaların (Aydan et al., 1999a ve 1999b; Watanabe et al., 1999; Ulusay et al., 1999; Ito et al., 1999; Seiki et al., 1999; Aydan and Ulusay, 2003; Ulusay et al., 2006; Aydan vd., 2007a ve 2007b; Ergüler and Ulusay, 2007; Tunusluoğlu ve Zorlu, 2007; Ulusay ve Aydan, 2007; Ergüler, 2009; Tuncay, 2009) başlıca amaçları: (a) bölgedeki kaya türlerinin kısa ve uzun süreli mekanik özelliklerinin belirlenmesi, (b) arazi gerilmelerinin tahmini, (c) yeraltı açıklıklarının duraylılığı, (d) bölgedeki en büyük yeraltı şehri olan Derinkuyu'nun kısa ve uzun süreli duraylılığının analizi, (e) seçilmiş bazı tarihi ve güncel kayadan oyma yapılarda sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullarının uzun süre izlenip değerlendirilmesidir. Bu çalışmalarda ağırlıklı olarak; Ürgüp'te de görülen Kavak tüfü üyesi olmak üzere, Zelve tüfü ve bölgede yüzeylenen diğer tüfler üzerinde durulmuş olup, elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Aydan et al. (1999a, 1999b) ve Aydan and Ulusay (2003) ile Ulusay and Aydan (2010); özellikle Ürgüp, Ortahisar ve Avanos'ta farklı amaçlarla kullanılan modern kaya yapılarının yanı sıra, Derinkuyu ve Özkonak yeraltı şehirlerinde yaptıkları gözlem, yerinde deney ve ölçümlerin ve ayrıca derledikleri örnekler üzerinde gerçekleştirdikleri kaya mekaniği laboratuvar deneylerinin ve mineralojik-petrografik analizlerin sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmaların sonucunda; incelenen tüflerin mühendislik özelliklerinin tabakalanmaya paralele ve dik yönlerde önemli bir değişim göstermedikleri, ancak atmosferik koşullara karşı oldukça duyarlı oldukları, dayanım açısından zayıf kaya sınıfında yer almalarına karşın, kaya kütlesi olarak değerlendirildiklerinde iyi-orta kaya kütlesi şeklinde tanımlandıkları belirlenmiştir. Bununla birlikte, Avanos'ta ve Zelve Vadisi civarında gözlenen Zelve tüfünün Ürgüp'te de gözlenen Kavak tüfüne oranla daha belirgin bir şişme davranışı gösterdiği, ayrıca kaya kütlesinin dayanım ve deformabilitesinin kaya malzemesininin 1/3'ü ile 1/5'i arasında değişebileceği saptanmıştır. Bunların yanı sıra, alınan ölçümlerden yeraltı açıklıklarında sıcaklık ve nem değişimlerinin, yüzeyde alınan ölçümlerle karşılaştırıldığında, çok az olduğu ve derinlik arttıkça bu değişimin azaldığı da saptanmıştır. Ayrıca Ürgüp'te kaya düşmesi açısından tehlikeli alanların bulunduğu belirtilerek, bölgede kaya

mekaniği, açıklıkların duraylılıkları ve uzun dönemli performansları ile korunmaları ve yeniden kullanılabilirlikleri konularında gelecekte daha fazla ve ayrıntılı çalışma yapılması gerektiği de vurgulanmıştır.

Kapadokya Bölgesi'ndeki arazi gerilmeleri konusunda çalışan Watanabe et al. (1999); Avanos ve Derinkuyu'da uyguladıkları Akustik Emisyon (AE) tekniğinin yanı sıra, dolaylı diğer üç farklı yöntemi de kullanarak, bölgedeki en büyük asal gerilmenin düşey, ortanca ve en küçük gerilmelerin ise KG ve DB yönlerinde etkiğini, ayrıca yatay ve düşey yöndeki gerilmelerin oranının (k) 0.5 civarında olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Ulusay et al. (1999), Seiki et al. (1999) ve Ito et al. (1999), bölgedeki bazı tüflerin mekanik özelliklerini belirlemişler ve krip deneyleriyle tütün zamana bağlı davranışını inceleyerek Derinkuyu Yeraltı Şehri'nin 7. katındaki açıklığın uzun süreli duraylılığını değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçları; derinliğin 40 m'den az olması koşulunda çevre kayasının herhangi bir duraysızlığa uğramamakla birlikte, zamana bağlı bazı deformasyonların gelişebileceğini, ancak kaya bozunma nedeniyle zayıflamadığı sürece, 1500 yıl sonunda gelişebilecek zamana bağlı deformasyonların duraysızlığa neden olabilecek bir düzeye erişemeyeceğini göstermiştir.

Ulusay et al. (2006), Kayakapı Mahallesi'nde (Ürgüp) yaklaşık 1200 adet kayadan oyma yapının restorasyonu ve yeniden kullanımı amacıyla kaya düşmesi sorunları ve açıklıkların duraylılığı da dahil olmak üzere, bölgeyi mühendislik jeolojisi açısından değerlendirmişlerdir. Bu alanda yapılan gözlemler ve deneysel çalışmalar, tüflerin mekanik özelliklerinde tabakalanmaya paralel ve dik yönde belirgin bir değişim olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, kayadan oyma yapıların duraylılığını denetleyen faktörler arasında süreksizliklerin ve fiziksel ayrışmanın daha önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Ayrıca, kayadan oyma yapıların yeniden kullanımı konusunda en önemli faktörlerin; yapısal özellikler tarafından denetlenen blok duraysızlıkları, erozyon ve açıklıkların topuklarındaki makaslama yenilmeleri olduğu belirlenmiştir. Bölgedeki kayadan oyma yapıların korunması için ise, gerekli kesimlerde istinat duvarları, kaya bloklarının yerinde

tutulması amacıyla kaya saplamalarının kullanılması ve düşme olasılığı bulunan blokların ortamdaki uzaklaştırılmasının uygun olacağı önerilmiştir.

Aydan et al. (2007a); Kapadokya Bölgesi'nin depremselliği, gerilme ortamı, yeraltı açıklıkları ve bunların içi ile çevresindeki iklimsel koşullar ve çevre kayasının kısa ve uzun süreli davranışı, indeks ve mekanik özellikleri ile su içeriğinin ve donma-çözülme süreçlerinin kaya bozunması üzerindeki etkilerini 1996 yılından bölgede yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri veriler ışığında değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, açıklıkların vadiye bakan topuklarında, rüzgar, yağmur ve donma-çözülme sonucu oluşan aşınma etkisinin çok büyük olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, içlerinde açıklık bulunan peri bacaları için yapılan analiz sonuçları, özellikle 1000 yıl sonra peribacalarının duraysızlık sorunlarıyla karşılaşma olasılığının arttığını göstermiştir. Araştırmacılar, bölgedeki antik kaya yapılarının korunması için özellikle aşınma olgusunun önlenmesi ve/veya yavaşlatılması için önlemlerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Aydan et al. (2007b), Derinkuyu yeraltı şehrinin uzun süreli davranışını gözlemsel, deneysel ve kuramsal kaya mekaniği çalışmaları ile sıcaklık, nem ve hava basıncı gibi çevre koşulları ölçümlerine ek olarak yapılan akustik emisyon ve yerin elektrik potansiyeli ölçümlerinden de yararlanarak değerlendirilmişlerdir. Elde edilen sonuçlar; yeraltı şehrinin yüzeye yakın kısımlarında iklimsel koşullar, yapılaşma ve trafikten kaynaklanan dinamik yüklerden dolayı yerel ölçekte bazı duraysızlıkların meydana gelebileceğini göstermiştir. Ancak, ilk üç kattan daha derindeki katlar için söz konusu nedenlerden dolayı, çevre kayasının özelliklerinde fazla değişim olmasının beklenmediği belirtilmiştir.

Ergüler and Ulusay (2007); zayıf, ince tabakalı ve kil içeren kayalarda tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenebilmesi için gerekli olan yüksek kalitede karot örneklerinin hazırlanmasının güçlüklerinden yola çıkarak, bu tür kayalarda tek eksenli sıkışma dayanımının dolaylı olarak belirlenebilmesi amacıyla Japonya'da geliştirilen iğne penetrometresi adı verilen aletle aralarında Kapadokya tüflerinden bazılarına ait örneklerin de bulunduğu çok sayıda örnek üzerinde deneyler yapmışlardır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri iğne penetrometresi deneylerinden elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, tek

eksenli sıkışma dayanımı ile iğne penetrometresi direnci arasında tüfler için de kullanılabileceği görülen oldukça iyi bir ilişki belirlenmiştir.

Tunusluoğlu ve Zorlu (2007), Ortahisar Kalesi'nde düşme tehlikesi bulunan kaya blokları için yaptıkları analizler sonucunda, blokların düşmeleri halinde 47 ile 133 m arasında bir yatay mesafe kat edecekleri sonucuna ulaşmışlardır. Üretilen kaya düşme tehlikesi haritasına göre, özellikle Balkan Vadisi'nin doğu/güneydoğu kesimlerinde blok boyutları ve blokların önündeki engellerin az olması nedeniyle durma mesafelerinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

Ulusay ve Aydan (2007), Kapadokya Bölgesi'nde seçilen bazı eski ve güncel kaya yapılarının içinde açıldığı bazı tüflerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile kaya kütlesi karakteristiklerini araştırdıkları çalışmalarında, tüflerin kısa süreli davranışını da değerlendirmişlerdir. Çalışmada, arazi ve laboratuvar deneylerine göre, tüflerin mühendislik özelliklerinin tabakalanmaya dik ve paralel yönde önemli değişiklikler göstermediği belirlenmiştir. Bölgedeki tüflerin, atmosferik koşullara karşı oldukça duyarlı oldukları vurgulanmış olup; Kavak ve Gördeles tüfleriyle karşılaştırıldığında, Zelve tufünün en yüksek şişme ve nem içeriği potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tuf kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülünün kaya malzemesinininkinin 1/5'i ile 1/3'ü arasında değiştiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, açıklıkların davranışında kayanın dayanım ve deformabilitesinde zamana bağlı olarak gelişen azalmanın rolünün baskın olduğu vurgulanmıştır.

Tuncay (2009), Kapadokya Bölgesi genelinde seçilen ve kaya kopmaları (rupture) ile bir adet topuk yenilmesini içeren 9 adet vaka seçerek, bu duraysızlıklar için gerekli olan kritik yenilme gerilmeleri ile ilksel kırık başlangıcı, sistematik kırık ilerlemesi ve kırıkların birleşmesi gibi kırık ilerlemesi aşamalarını tetikleyen gerilmeler arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Araştırmacı, her bir kopma vakasından aldığı örnekler için kuru ve doymuş koşullarda dolaylı çekme dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapmış ve deney sırasında gerilme artışına bağlı olarak örnek içerisinde gelişen deformasyon ve kırık ilerlemesi aşamalarını birim deformasyon ve akustik emisyon ölçümlerinden yararlanarak belirlemiştir. Bununla birlikte söz konusu çalışmada, krip deneylerinde uygulanan gerilmelerin

oldukça yüksek olduğu ve yapılan uygulamalarda bir kaç ay ya da bir kaç yıl içinde deney örneklerinin yenildiği, ancak bu tür deney sonuçlarının Kapadokya tüflerindeki çok daha uzun sürelerde (birkaç yüz ya da bin yıl) sonlanan yenilme mekanizmasını temsil edemeyeceği görüşüne yer verilmektedir. Araştırmacı sonuç olarak, Kapadokya bölgesindeki tüfler için bu kritik dayanımların (ilksel kırık başlangıcı ve/veya sistematik kırık ilerlemesinin tetiklendiği gerilmeler) tüflerin doruk çekilme ve tek eksenli sıkışma dayanımlarının %15 – 30'u arasında değişebileceğini belirtmiştir.

Ergüler (2009); Kapadokya Bölgesi'nde yüzeylenen tüflerin bozunma hızının belirlenmesi amacıyla yaptığı çalışmada, arazi gözlemlerinin yanı sıra, incelediği tüflerin mineralojik, fiziksel ve mekanik özelliklerini de belirlemiştir. Araştırmacı, incelediği tüflerde bozunma hızının belirlenmesi amacıyla da suda dağılmaya karşı duraylılık, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda su içeriğindeki artışa bağlı olarak, özellikle Kavak tüflerinin çekme dayanımı, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülünde yaklaşık olarak %99 ile %88 oranında bir azalma belirlenmiştir. Ayrıca Esbelli ve Kavak tüfleri için sırasıyla, 0.03 – 0.59 mm/yıl ve 0.4 – 2.5 mm/yıl arasında değişen bozunma hızları belirlenmiştir.

3.3. Kapadokya Bölgesi'nde Tarihi Alanların Restorasyonu Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Göreme çevresindeki kayadan oyma kiliselerin korunması amacıyla Granier (1976) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kayanın içerdiği süreksizliklerin kaya yapısına ilişkin sorunlar üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve koruma çalışmalarında buna dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada; kaya yüzeylerindeki erozyon ve bozunmanın kilise duvarlarındaki boyaların tahrip olmasında rol oynadığı, bununla birlikte, tüf yüzeyinde büyüyen bir bitki olan likenlerin dış etkilere karşı koruyucu bir tabaka oluşturduğu öne sürülmüştür.

Göreme Vadisi ve çevresindeki alanlardaki kayadan oyma kiliselerin korunması ve restore edilmesi amacıyla jeolojik incelemeler yapan Bowen (1982, 1987, 1988);

söz konusu kaya yapıları açısından deprenselliğin yapısal bir soruna neden olmayacağını, ancak yağış, rüzgar, kapilarite, donma-çözülme, bağıl nem, çözünebilir tuzlar, liken örtüsü, eklemleme (süreksizlikler) ve yoğun ziyaretçi trafiğinin kaya bozunmasında etkin olan başlıca faktörler olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca, çatlakların kapatılması için incelediği alandaki tufün de içine karıştırıldığı püskürtme beton ile kum ve kirecin kullanılmasını önermiştir.

De Witte (1987, 1993) ve De Witte et al. (1988) ise, Göreme'deki yapıların korunması konulu çalışmalarında, yüzeylerine tetraetil silikat uygulanmış tuf örneklerinin daha az bozunmaya uğradıklarını ve bu bozunmanın 1987–1992 yılları arasında 0.4 cm/yıl olduğunu, ancak kaya örneklerinde bazı çatlakların geliştiğini saptamışlardır.

ODTÜ (1987), Caner et al. (1988) ve Türkmenoğlu et al. (1991), Göreme'de tüflerin içinde açılmış kaya yapılarının korunması amacıyla bozunma mekanizmalarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda; Kavak tufünün mineralojik-petrografik, kimyasal, fiziksel, mekanik ve mikrobiyolojik özellikleri incelenmiş ve inceleme sonucunda tüfteki bozunma derinliğinin 10 cm olduğu belirlenmiştir. Ayrıca plajiyoklaz ve biyotit gibi minerallerin yanı sıra, Sc, Cr, Fe, Co ve (Ce + Sm + Eu) elementlerinin bolluğunun bozunma derinliğinin belirlenmesinde en önemli parametreler olduğu da Türkmenoğlu et al. (1991) tarafından ortaya konulmuştur. ODTÜ (1987) ve Caner et al. (1988), inceledikleri tüflerin tuz kristallenmesine karşı dirençli olmadıklarını ve donma-çözülme sürecine karşı da çok fazla direnç göstermediklerini belirlemişlerdir. Bu araştırmacılar, yukarıda belirtilen bazı araştırmacıların gözlemlerinin ve/veya önerilerinin aksine, tarihi yapıların yüzeyinde büyüyen likenlerin kayanın zayıflamasında rol oynayan olumsuz bir faktör olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu çalışmalarda ayrıca, ıslanma-kuruma sürecinin zararlı etkisinin azaltılması için suya karşı dayanıklı sentetik reçine uygulaması veya kaya yüzeyinde kalın bir koruyucu tabakanın oluşturulması gibi iyileştirici yöntemler de önerilmiştir.

Erguvanlı et al. (1989) Göreme’de Kavak tufü oyularak inşa edilmiş olan El Nazar Kilisesi’nin korunması ve güçlendirilmesi amacıyla yürütmüş olduğu deneysel çalışmalar sonucunda yüzey drenajı, kırık ve boşlukların uygun bir malzemeyle doldurulması gibi koruyucu önlemlerin alınması gerektiğini belirtmiştir.

Göreme’deki kayadan oyma kiliselerin korunması ve restorasyonu konularında çalışan Roselli (1994), kiliselerdeki kayanın bozunma sürecinin son 27 yılda önemli derecede hızlandığını ve kayacın zayıflamasında hem doğal bozunmanın, hem de turizm nedeniyle kayadan oyma kiliselere yapılan ziyaretlerin başlıca faktörler olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca, uygun yapısal iyileştirme yöntemleri uygulanmadığı takdirde, söz konusu kiliselerin kısa sürede yitirileceğini vurgulamıştır.

Garcia-Valles et al. (2003), Kapadokya Bölgesi’nde anıt niteliğindeki yapılarda likenlerin tüflerin ayrışması üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, fiziksel bozunma dikkate alındığında likenlerin koruyucu etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

3.4. Uluslararası Literatürde Tüflerin Jeo-Mühendislik Özellikleri ve Tarihi Yeraltı Açıklıkları Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Yukarıda değinilen araştırmaların yanı sıra, uluslararası literatürde daha çok son yıllarda tüflerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile bozunmaya karşı duyarlılıkları konusunda ve Kapadokya’dakilere benzer kaya ortamları içinde oluşturulmuş açıklıkların duraylılıklarının araştırılması amacıyla yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetle değerlendirilmiştir.

Esaki and Jiang (1999), tuf kullanılarak inşa edilmiş 150 yıllık tarihi bir köprüde tüflerin bozunmasıyla ilgili bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada; kayanın fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin bozunmaya bağlı olarak ve derinlikle değişimi incelenmiş ve “fiziksel bozunma derecesi indeksi” ile “kimyasal bozunma derecesi indeksi” olarak tanımlanan pratik indeksler önerilmiştir.

Tüflerde bozunma hızı ve dağılımını inceleyen Yokota and Iwamatsu (1999), tüflerde açılmış şevlerde, şev yüzeyinden derinliğe bağlı olarak tüflerdeki sertlik derecesi değişimi ve dayanım arasındaki ilişkiden yola çıkarak bozunma derinliği ile şev duraylılığını ilişkilendirmişlerdir. Araştırmacılar, bozunma kalınlığının, meydana gelen duraysızlık sonucunda yenilmeye maruz kalacak malzeme hacmini belirlediğini vurgulayan araştırmacılar ayrıca, kaya sertliğinin; kayalardaki renk değişimi, kil minerali içeriği ve tane boyundaki değişimlerle de ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Hachinohe et al. (1999), literatürde yumuşak kayaların bozunma derinliği ve hızının belirlenmesine yönelik çalışmalarda bozunma zonu arazide veya laboratuvarda doğrudan yapılan ölçümlerle belirlenemediğinden, söz konusu çalışmaların mühendislik uygulamaları için çok yararlı olmadığını vurgulamışlardır. Araştırmacılar, farklı tüflerde yapılmış sondajlardan elde edilen karot örnekleri üzerinde iğne penetrometresi ve gözenek-hacmi dağılımı deneyleri ile mineralojik ve kimyasal analizler gerçekleştirerek, bozunma derinliğini ve hızını araştırmışlardır. Bozunma derecesini, bozunmuş kesimin iğne penetrometresi direncinin (N_p) taze kesimin iğne penetrometresi direncine oranı olarak tanımlamışlardır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, N_p değerinin taze kesimde hemen hemen sabit olduğunu, ancak bozunmanın artışına bağlı olarak bu değerde belirgin bir düşüş gözlemlendiğini göstermiştir.

Yan et al. (2001), Çin Halk Cumhuriyeti'nde yaklaşık 1400 yıl önce kireçtaşı içinde açılmış olan kayadan oyma tapınağın duraylılığını etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla, kayanın mekanik özellikleri ile kaya kütlesi özelliklerini araştırmışlar ve sayısal çözümleme teknikleriyle açıklığın duraylılığını değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, yapılan analizler sonucunda mağaranın duraylılığı etkileyen faktörlerin; yamaçlar üzerindeki blokların duraysızlığı, süreksizlikler boyunca suyun kaya kütlesinin derinliklerine kadar nüfuz etmesi, korozyon ve bozunma olduğunu belirlemişlerdir. Süreksizlikler ve tabakalanma düzlemlerinin kesişmesinin, kayanın bozunmaya başlamasına ve bozunmanın yayılmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Sayısal analizler sonucunda; açıklığın bugün için duraylı olduğu belirlenmiş, ancak şiddetli yağışların duraylılığı olumsuz yönde etkileyeceğinin dikkate alınması gerektiği önerilmiştir.

Hatzor et al. (2002), İsrail'de 1000 yılı aşkın bir süre önce açılmış olan açıklıkların duraylılığını sürekli ve sürekli olmayan deformasyon analizleriyle (Discontinuous Deformation Analysis, DDA) incelemiştir. Yapılan sayısal çözümler sonucunda araştırmacı, çok büyük açıklıklarda özellikle tavan kesiminde gelişen duraysızlıkların sağlam kayanın çekme dayanımının aşılmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Bununla birlikte, analiz sonuçları topuklardaki yenilmelerin de tek eksenli sıkışma dayanımının aşılması sonucunda gerçekleşebileceğini göstermiştir. Ayrıca her iki tür yenilmenin birlikte gerçekleşebileceği "karmaşık yenilme durumu"nda ise, açıklıklarda "genel (yekpare)" bir yenilme sorunu yaşanabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, 30 ve 40 m'lik kısmı desteksiz olan iki açıklıkta yapılan hareket izleme çalışmaları sonucunda; deformasyonun devam ettiği, ancak anahtar blokların yerinden hareket etmemesi durumunda bu açıklıkların duraylılıklarını koruyacakları belirlenmiştir.

Aydan ve Geniş (2004), 3200 yıllık 3. Amenhotep kaya mezarlarının (Mısır) çevre kayasının ve açıklıklarının duraylılığını analitik ve sayısal çözümler yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Söz konusu analizler, kaya kütlelerinin kuru ve ıslak olduğu durumlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Analizler sonucunda, oluşabilecek en büyük asal gerilmelerin yerleri belirlenmiş ve meydana gelebilecek yenilmelerin çekilme gerilmelerinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Ayrıca mezarların güçlendirilmesi gereken kesimleri de belirlenmiş ve bu kesimlerde 3 adet kaya saplama yapılması önerilmiştir.

Chen et al. (2004), tüflerde donma-çözülme süreçlerine bağlı olarak gelişen bozunmanın kayanın doygunluk derecesi ile ilişkisini araştırdıkları çalışmalarında, % 0 ile % 95 arasında değişen doygunluk derecelerinde hazırladıkları örnekler üzerinde çeşitli deneyler yapmışlar ve örneklerin bozunmasını tek eksenli sıkışma dayanımı, P-dalgası hızı, porozite ve dış görünümdeki değişim açısından incelemiştir. Araştırmacılar, özellikle tek eksenli sıkışma dayanımında belirgin düşüşlerin gerçekleştiği %70 doygunluk derecesinden sonra kayanın belirgin şekilde bozunduğunu belirlemişler ve söz konusu kaya için bozunma açısından kritik doygunluk derecesinin %70 olduğunu vurgulamışlardır. Bunun yanı sıra, donmuş örneklerdeki gözenek suyu basıncı değişimini de inceleyen araştırmacılar,

örneklerin yüzeylerindeki doygunluk derecesinin, iç kesimlerdeki doygunluk derecelerinden yüksek olduğunu belirlemiştir.

Yassaghi et al. (2004), Tahran (İran)'da yapılacak bir otoyol projesi kapsamında, yaklaşık 500 m derinlikte açılacak olan tünellerde gözlenen tüflerin jeomekanik özelliklerini incelemiştir. Araştırmacılar jeomekanik anlamdaki değerlendirmelerini; malzeme parametrelerini, saha çalışmalarını ve kaya kütlesi sınıflama sistemlerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, tüflerin kütleli davranışının bölgedeki süreksizlere karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. Analitik ve sayısal çözümler sonucunda, söz konusu tüflerde destek sistemi uygulanmaksızın tünellerin duraylı kalamayacağı anlaşılmış ve uygulanabilecek destek sistemlerinin tasarımı da sayısal çözümlerle yapılmıştır.

Ma and Daemen (2004), tüflerden alınmış yaklaşık yüz adet karot örneği üzerinde mekanik özelliklerin deformasyon hızı ile ilişkisinin araştırılması amacıyla gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki beş temel sonuca ulaşmışlardır: (a) nihai dayanım, nihai aksel deformasyon ve sekant modülü değerleri deformasyon hızındaki azalmayla birlikte azalmakta, (b) herhangi bir deformasyon hızında dayanım değerleri aksel deformasyon ile çok fazla ilişkili olmakta, (c) yenilme genellikle mikro çatlaklar boyunca başlamakta, (d) aynı çaplı örneklerin dayanımı üzerinde boy farkı belirgin şekilde etkili ve (e) yenilmeden hemen önce hacimsel deformasyon hızında ani bir düşüş olmaktadır.

Guo et al. (2005), siltaşında açılmış ve yaklaşık 2000 yıllık tarihi açıklıklarda kayanın mekanik özelliklerini ve bozunma mekanizmasını inceledikleri çalışmalarında, kayanın içindeki kalsiyum karbonatın çözünerek, kaya yüzeylerinde kolaylıkla ufalanabilen bir malzeme oluşturduğunu belirlemiştir. Ayrıca, kaya içindeki simektitin yüksek şişme/büzülme oranına sahip olduğunu ve özellikle açıklıklarının giriş kısımlarında nem oranının değişkenlik göstermesine bağlı olarak şişme ve/veya büzülmenin kayanın parçalanmasına yol açtığını vurgulamışlardır.

Ma and Daemen (2006), tüfler üzerinde gerçekleştirdikleri beş adet krip deneylerinin sonunda; (1) deneye tabi tuttıkları tüflerin krip hızının zamana bağlı bir üssel fonksiyon olarak tanımlanabileceği, (2) tüfler için kararlı-hal krip hızının (steady-state creep rate) oldukça düşük olduğu ve bu hızın zamana bağlı olarak azaldığı, (3) ilk 50 saat için kararlı-hal krip hızının gerilmeye bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanabileceği gibi sonuçlara varmışlardır.

Aydan et al. (2008a), Kapadokya Bölgesi'nde tüflerde açılmış yeraltı ve yarı-yeraltı açıklıkları ile Mısır'da yumuşak kireçtaşları içinde açılmış birçok firavun mezarının çevre kayasının bozunma mekanizmalarını araştırmışlardır. Araştırmacılar, kısa ve uzun süreli duraylılıklarını inceledikleri Kapadokya Bölgesi'ndeki yeraltı ve yarı-yeraltı açıklıkları için uzun dönemde kaya mekaniği açısından en büyük sorunun malzemenin bozunmasından kaynaklanan dayanım kaybı ve uzun dönemli yükleme olduğunu belirlemişlerdir. Aynı araştırmacılar, Mısır'daki kaya mezarlarının duraylılığını araştırmak için bir dizi sayısal analiz yapmışlar ve analizler sonunda en büyük asal gerilmelerin kolonlarda biriktiğini ve daha çok çekme gerilemeleri şeklinde olduğunu belirlemişlerdir.

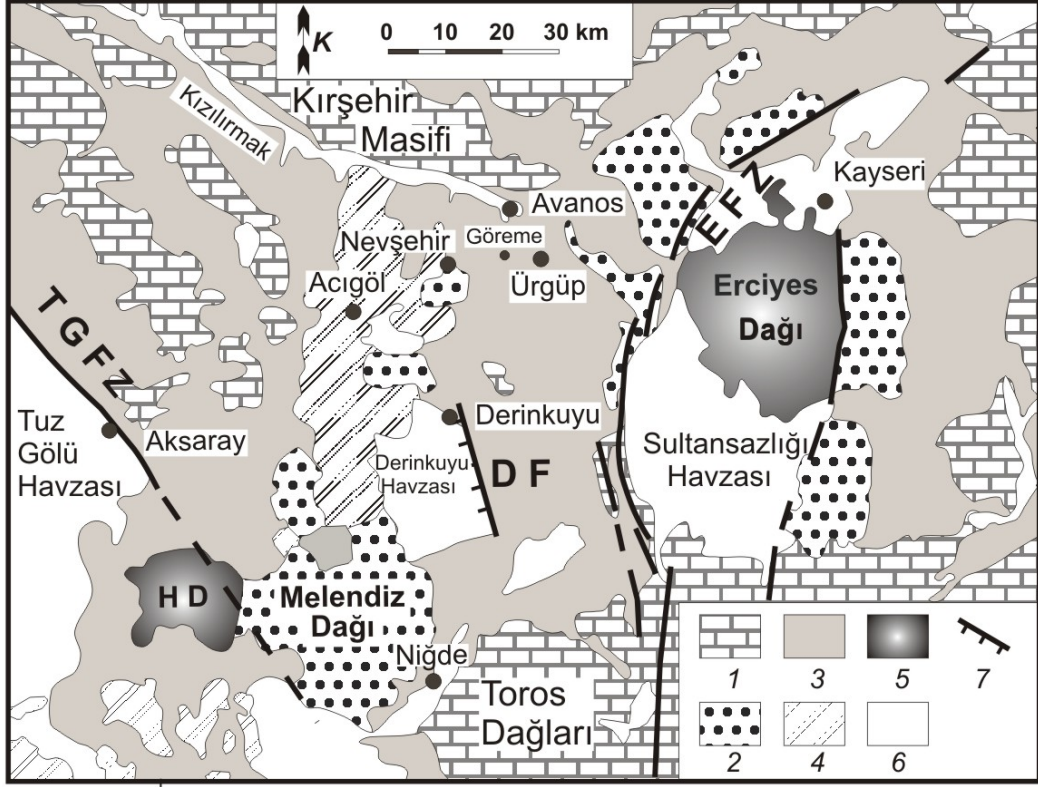
Aydan et al. (2008b), Kapadokya Bölgesi'ndeki Derinkuyu antik yeraltı şehrinde 1996 yılından bu yana yürüttükleri gözlemsel, deneysel ve kuramsal mühendislik jeolojisi çalışmalarının yanı sıra, uzun süreli akustik emisyon (AE) ve elektrik potansiyeli (EP) ölçümleriyle "yerinde izleme (in-situ monitoring)" çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu çalışmalar sonunda elde edilen verilere göre; sıcaklık ve nem değişimlerinin, yüzeyde alınan ölçümlerle karşılaştırıldığında, çok az olduğu ve derinlik arttıkça bu değişimin azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar, yeraltı şehrinin 5. ve 7. katlarında alınan AE ve EP ölçümleri sonuçlarının yer yer aşırı gerilme birikimlerine ve yerel yenilmelere işaret ettiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, yapılan visko-elasto-plastik sonlu elemanlar analizleriyle Derinkuyu'nun uzun süreli duraylılığı da araştırılmıştır. Analiz sonuçları; derinliğin 40 m'den az olması koşulunda çevre kayasının herhangi bir duraysızlığa uğramamakla birlikte, zamana bağlı bazı deformasyonların gelişebileceğini, ancak bozunma nedeniyle kaya zayıflamadığı sürece, 1500 yıl sonunda gelişebilecek zamana bağlı deformasyonların duraysızlığa neden olabilecek bir düzeye erişemeyeceğini göstermiştir.

4. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ

Kapadokya Bölgesi, jeolojik anlamda, Nevşehir-Niğde-Kayseri kentleri arasında kalan yaklaşık 40 000 km²'lik bir alanı kaplar. 1000 km³ kadar volkanik kökenli malzeme içeren bölgede riyolitik ve dasitik tüfler ile andezit ve bazalt kökenli lavlar gözlenir (Temel et al., 1998) (Şekil 4.1).

Afrika-Arap ve Avrasya plakalarının çarpışması sonucu Geç Miyosen'den Kuvaterner'e değin süren volkanizma, bölgede çeşitli tuf seviyelerini oluşturmuştur (Innocenti et al., 1975; Pasquare et al., 1988; Le Pennec et al., 1994; Schumacher and Schumacher; 1997; Le Pennec et al., 2005). Bu tuf seviyeleri, farklı volkanik patlamalar sırasında atmosfere dağılan kül ve diğer parçacıkların zamanla çökerek çok geniş alanlar kaplaması ve taşlaşması sonucu oluşmuştur. Kapadokya Bölgesi'nin oluşumuna esas olan bu mekanizmanın yanı sıra, tüflerin soğuması sırasında gelişen çatlak ve kırıklar ile yağmur ve rüzgarın etkisiyle peri bacaları olarak adlandırılan yer şekilleri gelişmiştir. Zaman içinde insanların nispeten yumuşak olan tüfleri oyarak yerleşime açmaları, Kapadokya'ya bugünkü görünümünü kazandırmıştır.




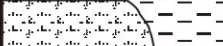

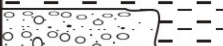
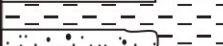


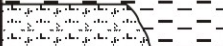


Kapadokya Bölgesi, Neojen-Kuvaterner yaşlı ve Toprak et al. (1994) tarafından "Kapadokya Volkanik Bölgesi" olarak adlandırılan bölgeye ait volkanik kaya birimleriyle örtülüdür. Bölge, uzun ekseni 300 km uzunluğunda ve KD-GB doğrultusunda uzanan bir kuşak şeklindedir (bkz. Şekil 4.1). Bu bölgedeki birimler; temel kayaları, Yeşilhisar formasyonu, Ürgüp formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyal çökellerdir. Temel kayaları; ofiyolitler (gabro ve piroksenit) ve siyenit ile monzonit gibi magmatik kaya birimlerinden oluşurken, Yeşilhisar formasyonu tabakalı akarsu çökelleriyle (kırmızı çamurtaşı, kumtaşı ve konglomera ardaalanmaları) temsil edilmektedir (Toprak et al., 1994). Tüm bu birimler, Şekil 4.1'deki jeoloji haritasında ayırtlanmaksızın gösterilmişlerdir. Yeşilhisar formasyonunu üzerleyen Ürgüp formasyonu, bölgede en geniş yayılıma sahip formasyon olup, volkanik kökenli kaya birimlerini içerir. Bölgedeki tüm yeraltı ve yarı-yeraltı kaya yapılarının ve peri bacalarının içinde yer aldığı bu formasyon, çeşitli piroklastik çökellerle ara tabakalı olarak bulunan karasal çökellerden



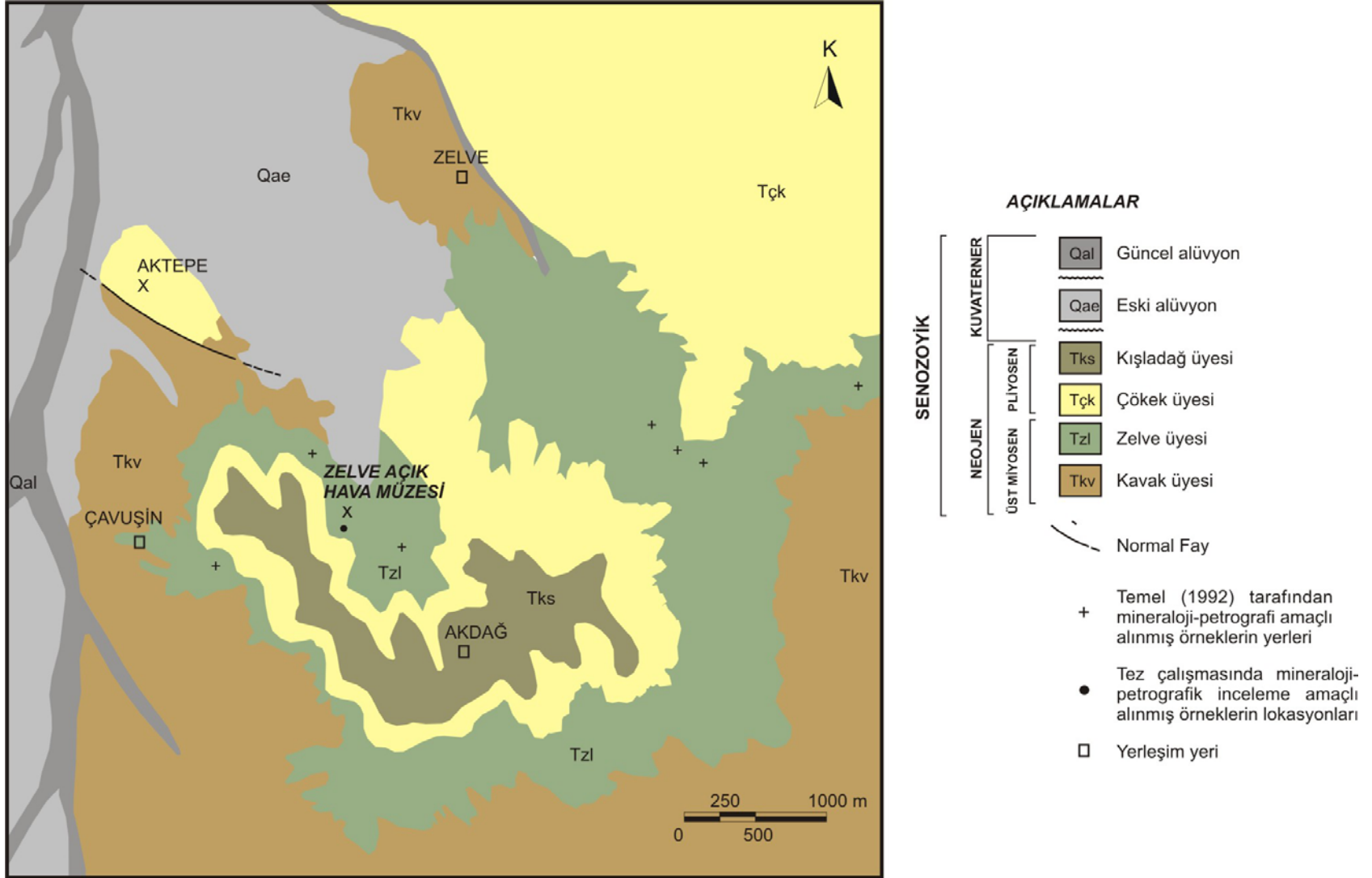
Şekil 4.1. Kapadokya Bölgesi'nin genel jeoloji haritası; 1. temel kayalar, 2. Miyosen-Pliyosen yaşlı volkanik birimler, 3. Ignimbiritler (tüfler) ve güncel karasal birimler, 4. Kuvaterner volkanizması (maar, dom ve lavlar), 5. büyük Kuvaterner volkanları, 6. Kuvaterner alüvyon, 7. önemli faylar (TGFZ: Tuz Gölü Fay Zonu, EFZ: Ececi Fay Zonu, DF: Derinkuyu Fayı) (Temel et al., 1998'den).

oluşmaktadır. Piroklastik birimlerde yapılan radyometrik yaş tayinlerine göre Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı oldukları belirlenen formasyon, Temel (1992) ve Temel et al. (1998) tarafından 10 volkanik üyeye (tuf ve lav akıntısı seviyelerine) ayırtlanmıştır. Ürgüp formasyonunu temsil eden ve içerdiği üyelerin yaşlıdan gence doğru dizilimini gösteren stratigrafik dikme kesit Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu formasyonu oluşturan Kapadokya volkanitleri; genellikle kirli beyaz, sarımsı gri ve pembe ve kırıntılı bir özelliğe sahip olup, iriden inceye pomza ve obsidyen parçalarını içeren, tuf ara tabakalı iri ve ince taneli malzemedir. Bu birimlerin arasında yer yer kil ve marn tabakaları da gözlenir.

Bölgedeki ikinci piroklastik akıntı ürünü olan ve tez çalışması için seçilen Zelve Açık Hava Müzesi ve yakın civarında Zelve Üyesi adı verilen tüfler, bölgedeki tuf seviyelerini ayrıntılı şekilde ilk kez belirleyen Temel (1992)'e ait jeoloji haritasından yararlanılarak ve ayırtlanmaksızın Şekil 4.3'de verilen haritada gösterilmişlerdir. Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen Zelve üyesi tek bir akıntıdan oluşmaktadır. Zelve üyesinin tahmin edilen hacmi ve alansal yayılımı sırasıyla 120 km³ ve 4200 km²'dir (Temel et al., 1998). Üye, tabanında, kalınlığı 5–12 m arasında değişen pliniyen döküntülü seviye ile başlamakta ve bu seviye sayesinde Kavak üyesinden kolaylıkla ayırt edilebilmektedir (Şekil 4.4). Söz konusu seviyenin üzerine yaklaşık 100 m kalınlığında tek bir piroklastik akıntıdan oluşan tuf gelmektedir. Pomzalar oldukça hafif, feldispat ve kuvars gibi minerallerce fakir olup, afirik-subafirik (kristalce fakir) bir özellik göstermekte ve ince uzun lifsi bir yapıya sahiptirler (Temel, 1992).

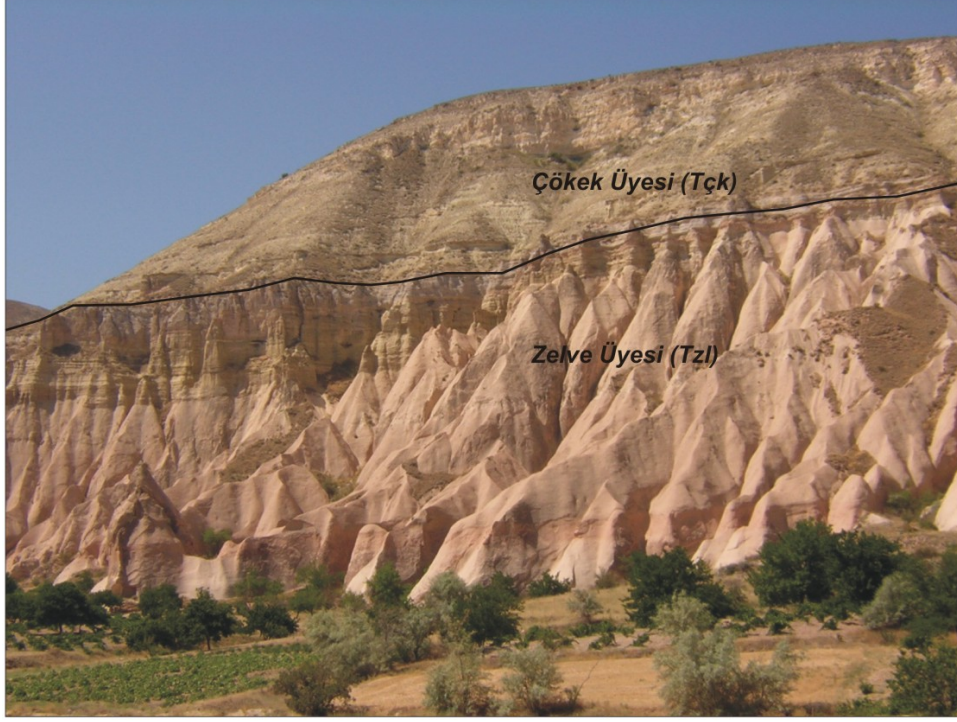
YAŞ	BİRİMLER	KALINLIK (m)	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	
KUVA.	KUMTEPE	1-7		Döküntü çökelleri	
PLİYOSEN	VALİBABA	5-15		Kaynaşmış ignimbirit	
	KIZILKAYA	4-60		Kaynaşmış ignimbirit	
GEÇ MİYOSEN	TOPUZDAĞ	50-70		Lav	
	SOFULAR	4-10		İgnimbirit ve tabanında döküntü çökelleri	
	GÖRDELES	7-20		İgnimbirit	
	TAHAR	4-80		İgnimbirit	
	CEMİLKÖY	10-110		İgnimbirit	
	DAMSA	12-100		Lav	
	SARIMADEN	4-15		İgnimbirit ve tabanında döküntü çökelleri	
	ZELVE	25-100		İgnimbirit ve tabanında döküntü çökelleri	
	KAVAK	10-150		İgnimbirit ile arakatkılı volkano-sedimanter ve gölsel çökeller	
					Gölsel ve akarsu çökelleri

Şekil 4.2. Kapadokya Bölgesi'ndeki ignimbirit (tüf) istifini içeren Ürgüp formasyonunun stratigrafik dikme kesiti (Temel et al., 1998'den düzenlenmiştir).

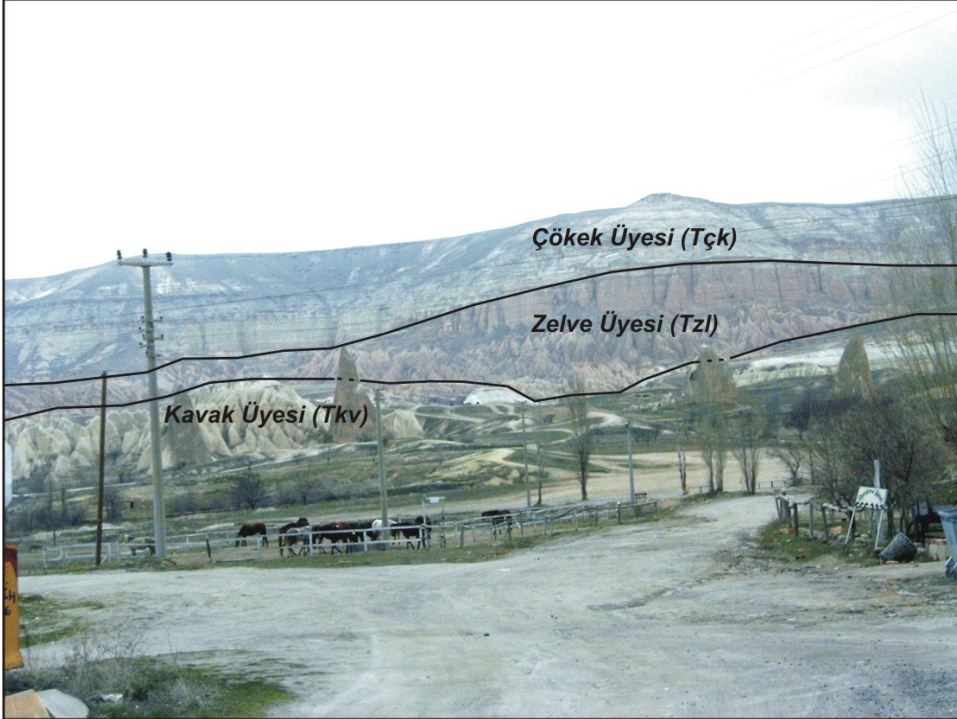


Şekil 4.3. İnceleme alanı ve yakın civarının jeoloji haritası (Temel (1992)'den düzenlenmiştir).

(a)



(b)



Şekil 4.4. Zelve Açık Müzesi civarında yüzeylenen (a) Çökek ve Zelve üyeleri ile (b) Çökek, Zelve ve Kavak üyelerinin genel görünümü.

5. SAHA ÇALIŞMALARI

İnceleme alanındaki tüflerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması ve vadi boyunca gözlenen duraysızlıkların mekanizmalarının belirlenebilmesi amacıyla tez çalışması kapsamında yapılan saha çalışmaları ve bunlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda sunulan alt bölümlerde verilmiştir.

5.1. Kaya Yapılarındaki Duraysızlıkların Gözlemsel Değerlendirmesi

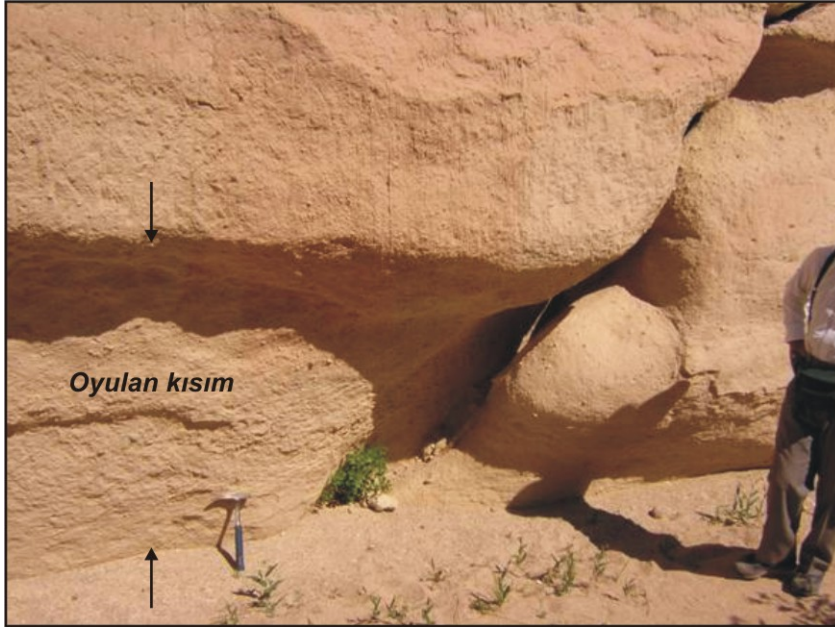
Bölgede yerleşimin oldukça eski dönemlerden itibaren yaygın olmasının en önemli nedenleri; günlük ve mevsimsel sıcaklık değişimlerin yüksek olması, tüflerin termal izolasyon özellikleri ve bu kaya birimlerinde açılan kaya yapılarının uzun süre desteksiz kalabilmeleri, kolay kazılabilirlik, düşman saldırılarına karşı korunma, deprem ve volkanik aktivite gibi doğa olaylarına karşı uygun saklanma yerlerinin açılabilmesi olarak sıralanmaktadır (Erguvanlı and Yüzer, 1977). Kapadokya'daki kayadan oyma yapıların birçoğu günümüzde halen duraylılığını korurken, bir bölümü ise zaman içinde duraysızlığa uğramışlardır.

Tez çalışması için Zelve Açık Hava Müzesi'nin 1. Vadisi'nde yapılan gözlemler dikkate alındığında, Zelve Vadisi'nde kaya düşmesi ve kayadan oyma yapıların duraysızlığı olmak üzere başlıca iki tür duraysızlık söz konusudur. Bu duraysızlıklar; tüfün bozunması (ayrışması) ve kayanın içerdiği yapısal süreksizliklerin varlığı ile ıslanma-kuruma ve donma – çözülme süreçlerinin kaya kütlelerinin dayanımında belirgin bir azalmaya neden olmasıyla ilişkilidir. Bozunma; gerek yüzeyde (doğal yamaç aynasında), gerekse süreksizlik yüzeyleri boyunca kaya kütlelerinin dayanımının azalmasına neden olmakta ve genellikle ıslanma-kuruma ve donma-çözülme süreçlerine bağlı olarak gelişmektedir. Ayrıca, bölgede rüzgarın da erozyona neden olan faktörlerden biri olarak rol oynadığı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, yapılan ölçümler ve gözlemler geçmişte vadi tabanında akan ve günümüzde mevsimsel yağışlara bağlı olarak akış haline geçen derenin de vadi yamaçlarının topuğunu oyarak (Şekil 5.1) duraysızlıkların gelişmesinde etkili olduğuna işaret etmektedir.

(a)



(b)



Şekil 5.1. Zelve 1. Vadi'nin tabanındaki mevsimsel derenin vadi yamaçlarının topuğunu oymasını gösteren (a) genel ve (b) yakın çekim görüntüleri.

Zelve Vadisi'nde yapılan incelemelere göre kaya yapılarında gözlenen duraysızlık türleri için aşağıda belirtilen üç model düşünülmüştür.

- 1) **Süreksizlik yüzeyi boyunca gelişen makaslama yenilmesi:** Bu duraysızlık türü; kayadan oyma yapıların bulunmadığı yamaçlarda, devamlılığı yüksek süreksizliklerin kesişmesiyle ve kazı yüzeylerinin varlığı nedeniyle oluşmuş büyük blokların kendilerini sınırlayan süreksizlik yüzeyleri boyunca makaslama yenilmesi (kama tipi kayma) şeklinde meydana gelen yapısal denetimli bir yenilmedir (Şekil 5.2).
- 2) **Topuğun sağladığı desteğin yitimi ve/veya topuğun oyulması sonucu blokların yerçekimi etkisiyle düşmesi:** Bu duraysızlık, genellikle içinde topuk bırakılan kayadan oyma yapıların bulunduğu yamaçlarda, topuğun yenilmesi sonucu meydana gelmekte ve yer çekimi etkisiyle bloğun düşmesiyle sonuçlanmaktadır. Benzer mekanizma, su ya da rüzgar gibi erozyon ajanlarının yamaç topuğunu oyması sonucu da meydana gelebilmektedir (Şekil 5.3).
- 3) **Gerilme boşalmasına bağlı olarak gelişen dilimlenme ve kavlaklanmalar:** Yamaçta meydana gelen erozyon veya duraysızlık nedeniyle bir miktar yükün kalkması, ya da yerleşim amacıyla kayanın oyulması sonucu oluşan gerilme boşalmasına bağlı olarak kayada dilimlenme ve kavlaklanmalar oluşabilmektedir (Şekil 5.4). Söz konusu kavlaklanmalar, yamaçta kayaların dilimler şeklinde ayrılmasına, boşluğun genişlemesine ve bu nedenle açıklık geometrilerinin değişmesine neden olabilmektedir.

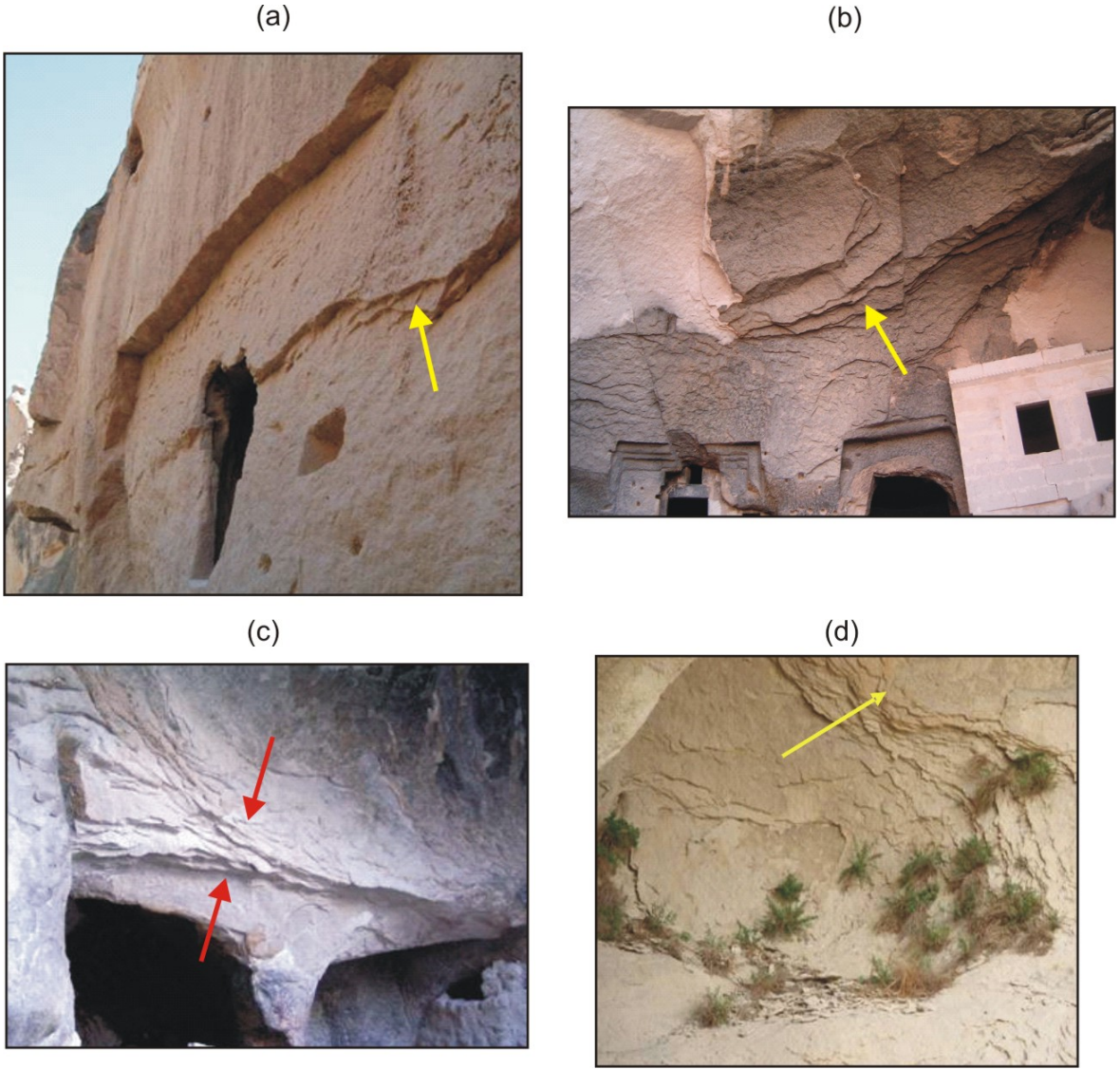
Yukarıda kısaca değinilen duraysızlık modellerinin yanı sıra, Zelve Vadisi'ndeki kaya yapılarında muhtemelen gerilme boşalmasına ve kapı, pencere ya da yaşam alanı olarak açılmış boşluklar nedeniyle değişen gerilme ortamına bağlı olarak gelişmiş ve ilerlemekte olan çatlaklar da gözlenmiştir. Bu çatlakların mevcut süreksizliklerle veya kayadan oyma açıklıkların kapı ve pencere gibi elemanları ile kesişerek duraysızlığa maruz kalabilecek bloklar oluşturması da (Şekil 5.5), inceleme alanında blok duraysızlığı açısından önemli diğer bir sorundur.



Şekil 5.2. Zelve 1. Vadi'de süreksizlik yüzeyleri boyunca gelişen makaslama yenilmesini gösteren bir duraysızlık.



Şekil 5.3. Zelve 1. Vadi'de topuk desteğinin yitimi sonucu bloğun yerçekimi etkisi altında düşmesi şeklinde gelişen bir duraysızlık.



Şekil 5.4. Zelve 1. Vadi'de (a) yamaçta alt kısmı kopmuş olan kavlaklanmalara bir örnek ile (b), (c) ve (d) kavlaklanmalar nedeniyle yarı-yeraltı açıklıkların geometrisinin değişmesine ilişkin tipik örnekler.



Şekil 5.5. Çeşitli nedenlerle oluşan ve ilerleyen çatlakların mevcut süreksizliklerle veya açıklıkların kapı, pencere gibi elemanlarıyla kesişerek duraysızlığa maruz kalabilecek yeni bloklar oluşturmasına ilişkin tipik görüntüler.

5.2. Envanter Çalışması

Önceki çalışmaların sunulduğu 3. Bölümde de belirtildiği üzere; Zelve Vadisi ve çevresi, Kapadokya Bölgesi'nde yapılmış olan ve genellikle jeoloji ve jeomorfoloji konulu çalışmalar kapsamında incelenmiştir. Bununla birlikte, özellikle Zelve Açık Hava Müzesi'nde vadiyle ilgili herhangi bir envanter bulunmamaktadır. Bu nedenle, tez çalışması sırasında yapılan saha çalışmalarına ve 1. Vadi'de bu çalışma sonrasında yürütülebilecek mühendislik ve koruma amaçlı çalışmalara altlık oluşturması amacıyla öncelikle bir envanter çalışması yapılmıştır. Söz konusu envanter çalışması aşağıda verilen alt başlıkları içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

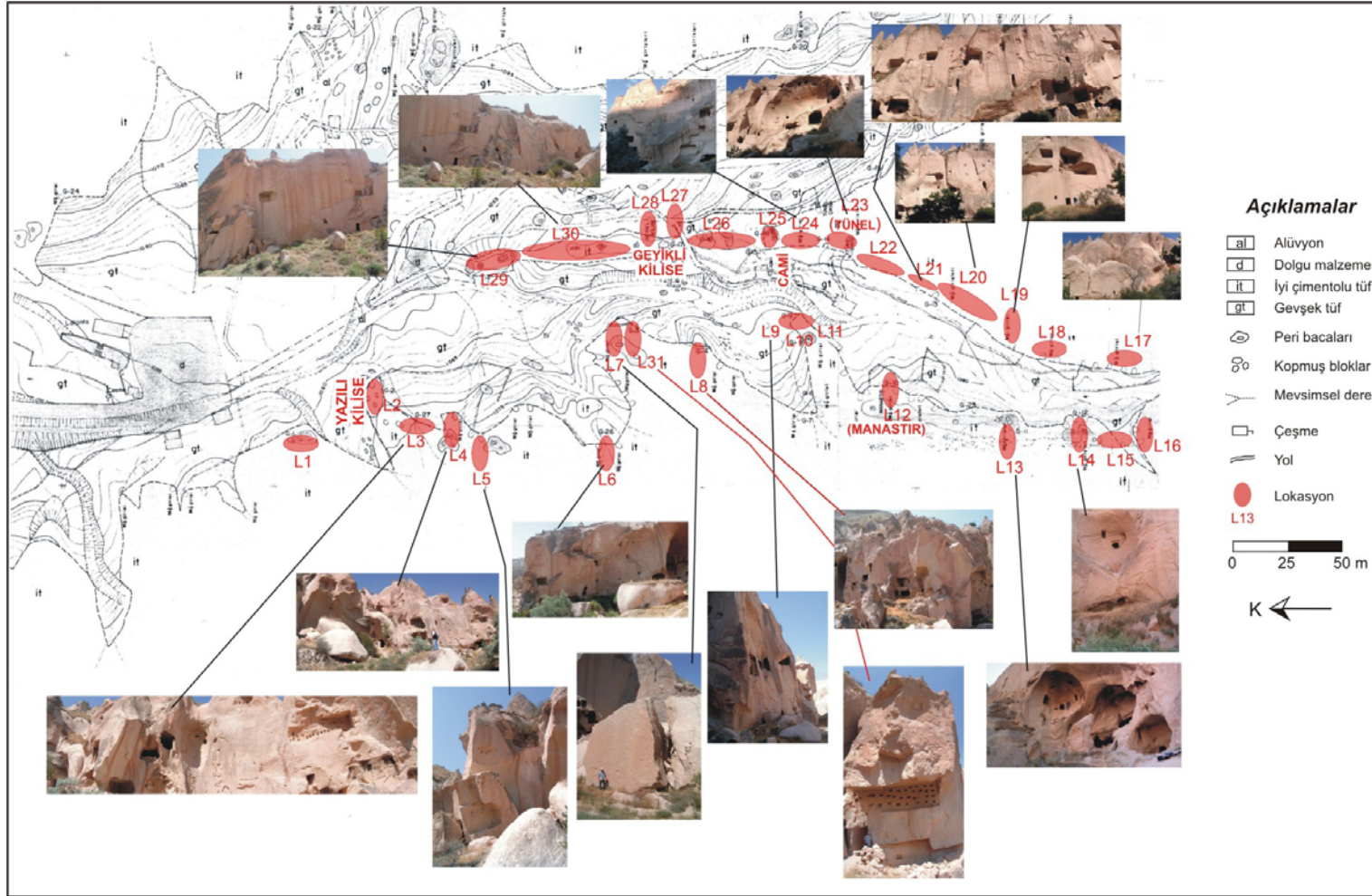
- a) Tüm kayadan oyma açıklıkların numaralandırılması,
- b) Açıklıklardan ölçekli ve yönlü fotoğraf çekimi,
- c) Duraysızlıkların yerlerinin ve türlerinin, ayrıca gözleme dayalı olarak mekanizmalarının belirlenmesi.

Envanter çalışması sırasında vadinin topoğrafik haritası üzerine envantere esas olan veriler işlenmiştir (Şekil 5.6).

5.3. Süreksizlik Karakterizasyonu ve Kaya Kütlesi Sınıflaması

5.3.1 Süreksizliklere ilişkin ölçümler

Zelve Vadisi'ndeki tüflerin içerdiği ve kaya yapılarının duraylılığı üzerinde etkili olan süreksizliklerin özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla; yüzeyde ve ölçüm alınmasının mümkün olabildiği bazı yarı-yeraltı açıklıklarında Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM, 2007) tarafından önerilen ölçütler kullanılarak süreksizlik özellikleri ölçülmüş ve/veya tanımlanmıştır. Yüzeyde alınan ölçümlerde hat etüdü tekniğinden yararlanılmış ve kaya yüzeyine serilen belirli uzunluktaki bir şerit metreyi kesen her süreksizlik için (a) yönelim (eğim ve eğim yönü), (b) süreksizlik aralığı, (c) devamlılık, (d) pürüzlülük ve dalgalılık, (e) süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki açıklık ve dolgu durumu (f) bozunmanın derecesi ve (g) süreksizlik yüzeyindeki su koşulu gibi özellikler tüm vadi yamacı boyunca ulaşılabilen



Şekil 5.6. Tez çalışmasıyla ilgili olarak ilk aşamada hazırlanmış olan Zelve Açık Hava Müzesi 1.Vadi'deki açıklıklara ilişkin envanter haritası.

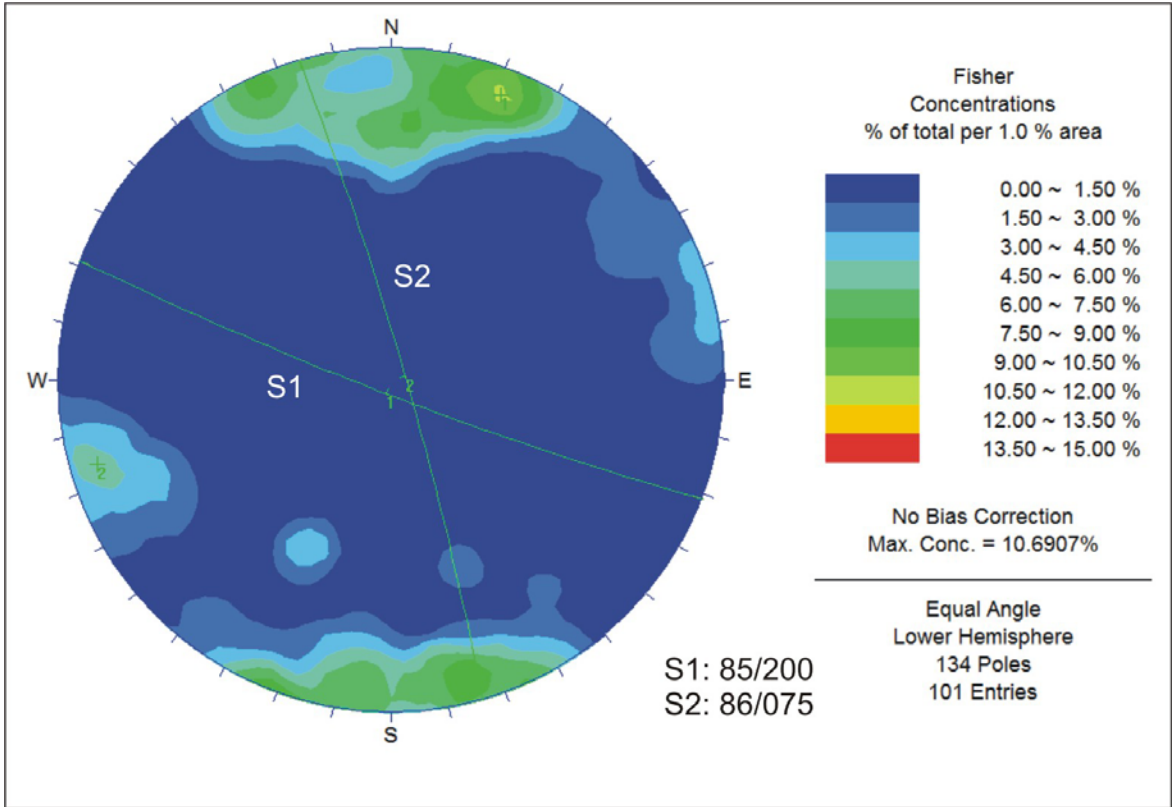
yerlerde, 4 ayrı lokasyonda yapılan hat etütleri sonucunda 134 adet süreksizlik ölçümü alınmıştır. Alınan ölçümlerin değerlendirilmesiyle, eklem türünde iki adet süreksizlik takımı (soğuma çatlağı) (85/200; 86/075) belirlenmiştir (Şekil 5.7). Bu süreksizlik takımlarından birinin vadinin doğrultusuna yaklaşık paralel, diğerinin ise vadiye yaklaşık dik-verrev dizilim gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5.8). Bu süreksizliklerin nispeten geniş aralıklarla tekrarlanıyor olması ve iki ana takımın varlığı, bu bölgedeki duraysızlıkların kütleli bir hareket şeklinde değil, süreksizlik denetimli olarak meydana geldiğine işaret etmektedir. Özellikle vadiye paralel konumlu süreksizlik takımı ile sınırlanan kaya dilimleri ana kütlede ayrılarak tehlike yaratmaktadır (Şekil 5.9).

5.3.2. Kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması

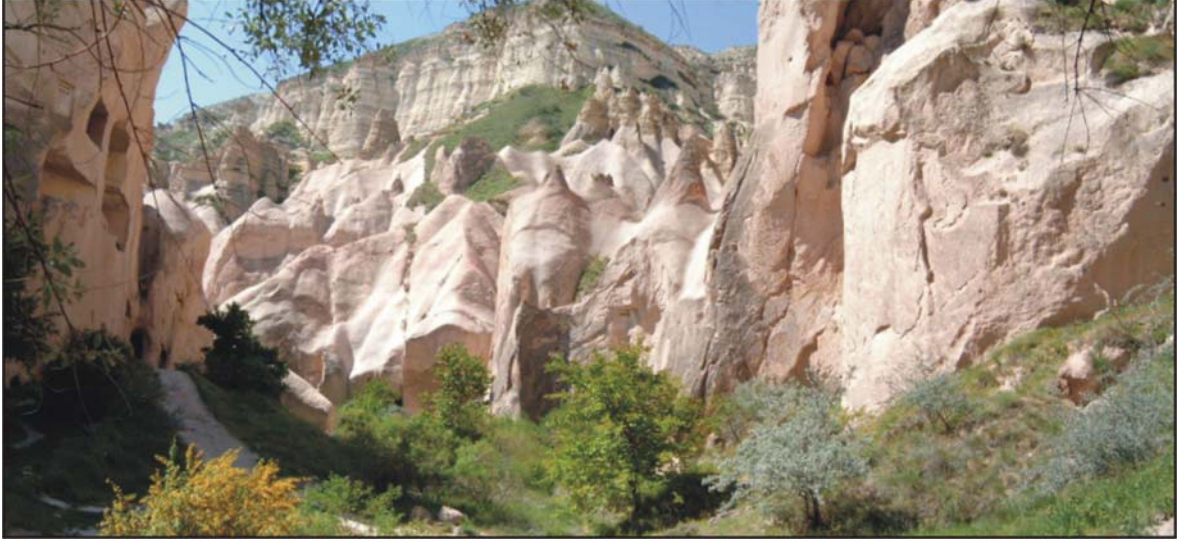
Kaya kütleleri içinde gerçekleştirilen kazılar ve bunların üzerinde inşa edilen yapılar, kaya kütlelerine etkiyen gerilme dağılımında değişime neden olurlar. Kaya kütlelerinin değişen gerilme koşullarına karşı sergileyeceği davranışın bilinmesi, kaya içindeki mühendislik yapısının duraylılığının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar.

Kaya kütleleri sınıflama sistemleri doğrudan bir tasarım yöntemi olmayıp, ön tasarım ve kaya kütlelerinin genel anlamda karakterize edilebilmesi amacıyla kullanılan bir araç olarak değerlendirilmektedirler (Bieniawski, 1989). Literatürde farklı amaçlara yönelik çok sayıda kaya kütleleri sınıflama sistemi önerilmiştir. Söz konusu sistemler arasında Kaya Kütleleri Puanlama Sistemi olarak adlandırılan RMR (Rock Mass Rating) Sistemi (Bieniawski, 1989), oldukça yaygın kullanımı olan sınıflama sistemlerinden biridir.

Çalışma alanında yapılan gözlemler ve ölçümler ışığında Zelve tufunun Bieniawski (1989) tarafından önerilmiş olan Kaya Kütleleri Puanlama Sistemi (RMR)'ne göre "Temel RMR" değeri ve kaya sınıfı belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, "Temel RMR" değerinin 64 ile 80 arasında değiştiği belirlenmiş olup (Çizelge 5.1), bu sınırlar "iyi kaya" sınıfına işaret etmektedir.



Şekil 5.7. Zelve 1. Vadi'deki tüfte ayırtlanan başlıca süreksizlik takımlarının yönelimleri.



Şekil 5.8. Zelve 1. Vadi'de gözlenen süreksizlik takımlarından görünüm.



Şekil 5.9. Zelve 1. Vadi'ye yaklaşık paralel konumlu süreksizlik takımıyla sınırlanan ve ana kütlede koparak tehlike yaratan kaya dilimlerinden tipik görüntüler.

5.4. Kavlaklanma Kalınlığı Ölçümleri

Zelve Açık Hava Müzesindeki yamaçlarda meydana gelen erozyon veya duraysızlık nedeniyle bir miktar yükün kalkması, ya da yerleşim amacıyla kayanın oyulması sonucu oluşan gerilme boşalımına bağlı olarak kayada oluşan kavlaklanmalar için gerek yamaçlarda, gerekse yeraltı açıklıklarında alınan ölçümlere göre (bkz. Şekil 5.4), kaya yüzeyinden içeriye doğru 35–40 cm kalınlığında zonlar halinde geliştikleri ve bu zonların içinde 1 ile 9 cm arasında değişen ve ortalama 3.2 cm kalınlığa sahip birbirine paralel ayrılmaların varlığı belirlenmiştir (Şekil 5.10). Söz konusu kavlaklanmalar nedeniyle bazı açıklıkların boyutları artmakta ve buna koşut olarak genişleyen bu açıklıklar giderek duraysızlık sorunuyla daha fazla karşı karşıya kalmaktadır.

5.5. Açıklıkların Boyutlarının Belirlenmesi

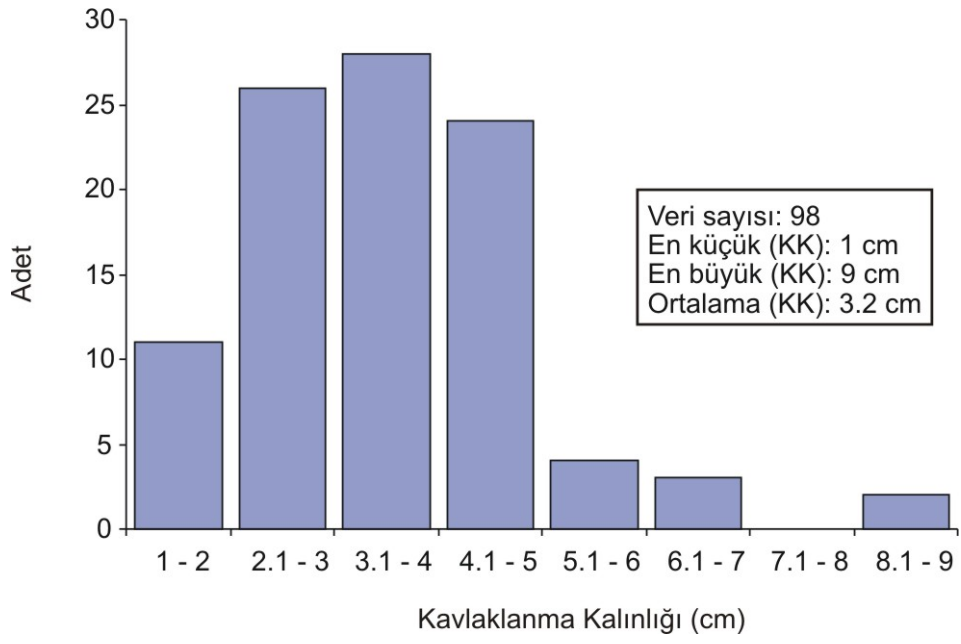
Sayısal çözümlerinde kullanılmak üzere, inceleme alanında duraysızlığa maruz kalmış ve/veya kalması olası ve geometrisi nispeten daha düzgün olan tipik birkaç açıklık seçilerek, bunların boyutları mesafe ölçer kullanılarak belirlenmiştir. Bu açıklıklardan birine ait görüntüler ve ölçülen açıklık boyutları Şekil 5.11’de verilmiştir. Çalışılacak açıklıkların belirlenmesi aşamasında, Zelve Vadisi’nde gözlenen mühendislik sorunları açısından temsil edici olan, ancak sayısal çözümlerinde geometrisi yönünden modellemede karmaşıklık yaratmayacak türde açıklıkların seçilmesine özen gösterilmiştir.

5.6. İğne Penetrometresi Deneyleri

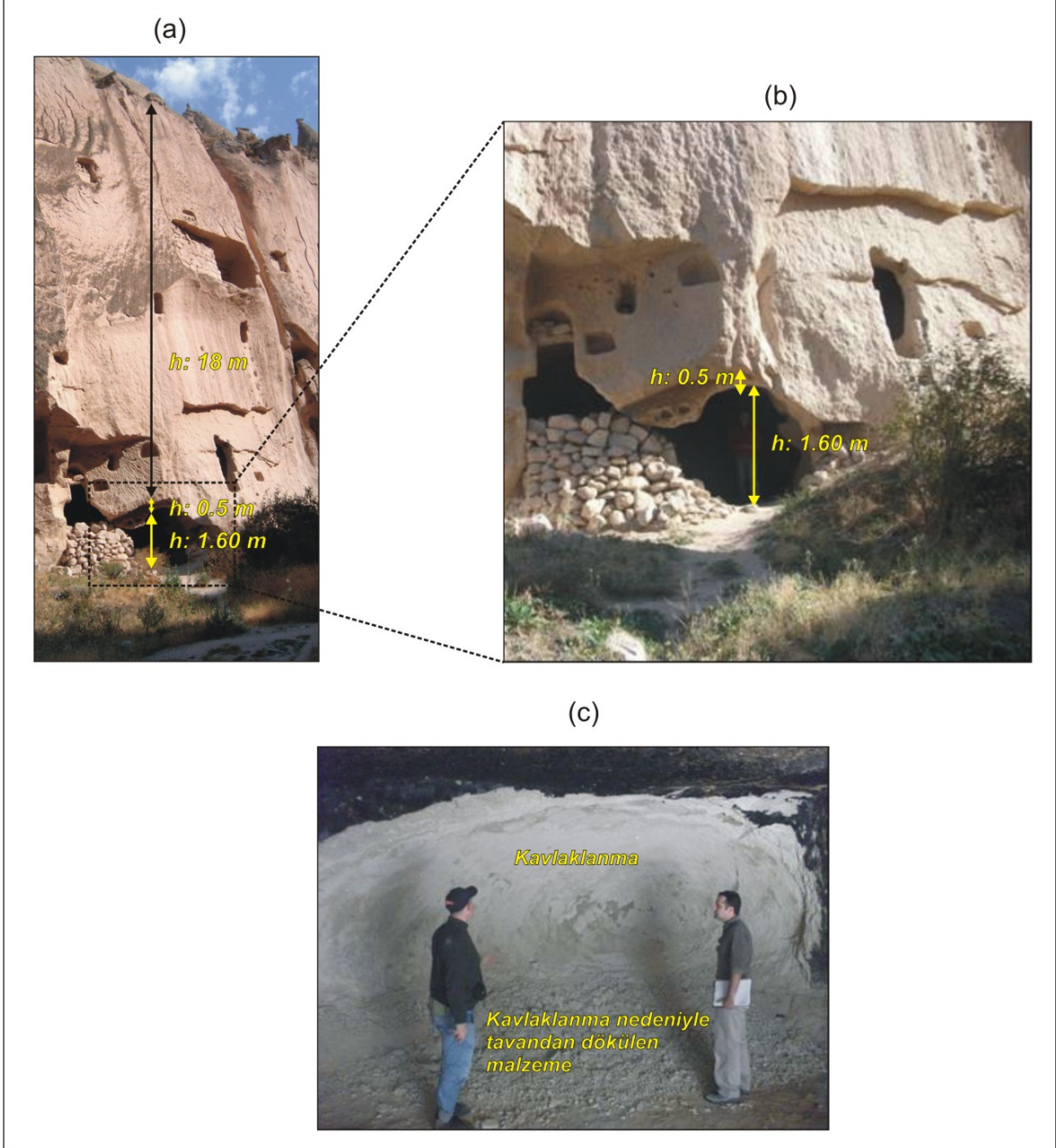
Zelve Vadisi’nde özellikle bozunmuş kesimlerden örnekleme yapılmasının sınırlı ve vadinin koruma altında olması nedeniyle laboratuvarında dayanım deneyleri için tüflerden örnek alımının her yerde mümkün olmayışı göz önünde bulundurularak, tek eksenli sıkışma dayanımının (σ_c) dolaylı yoldan tahmin edilmesi ve bozunmanın σ_c üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için iğne penetrometresi deneyleri yapılmıştır. Bozunma etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, ölçümler açıklıkların kapı ve pencere gibi kesimlerinde yüzeyden iç kesime doğru belirli bir

Çizelge 5.1. Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadide yüzeylenen Zelve tufünün RMR Kaya Kütleli sınıflama Sistemi'ne göre sınıflandırılması ve kaya sınıfı puanları.

Parametre	Parametrenin değeri ve puanı	
	En küçük	En büyük
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	3.8 (1 puan)	6.3 (2 puan)
Kaya kalite göstergesi (RQD, %)	90-100 (20 puan)	
Süreksizlik aralığı (mm)	420 (10 puan)	1100 (15 puan)
Süreksizlik yüzeyi koşulu	<p><i>Devamlılık:</i> 1-3 m (4 puan) <i>Açıklık:</i> 1-5 mm (1 puan) <i>Pürüzlülük:</i> Az pürüzlü (3 puan) <i>Dolgu:</i> Yumuşak dolgu < 5 mm (2 puan) <i>Bozunma:</i> Az bozunmuş (3 puan)</p> <p><i>Süreksizlik yüzeyi koşulu için toplam puan: 13</i></p>	
Yeraltısuyu durumu	Nemli (20 puan)	Kuru (30 puan)
Temel RMR puanı	64	80
Kaya sınıfı tanımı	İyi kaya	



Şekil 5.10. Zelve 1. Vadi'de gözlenen kavaklanmalara ait "Sıklık - Kavaklanma Kalınlığı (KK)" histogramı.



Şekil 5.11. Sayısal çözümlerinde kullanılmak üzere, (a) inceleme alanında duraysızlığa maruz kalması olası tipik bir açıklık, (b) boyutları ve (c) açıklık içindeki kavlanmalara ait görüntü.

hat boyunca alınmıştır. Ancak, yapılan ölçümler sonucunda penetrasyon değerlerinde kayanın yüzeyinden içine doğru belirgin bir değişim belirlenmemiştir. Bu durumun, yüzeysel bozunmanın söz konusu deney aletiyle belirlenebilecek seviyede bir derinliğe etki etmediğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ergüler and Ulusay (2007) kil içeren zayıf kayalarda tayin ettikleri NPR ve σ_c değerlerini, iğne penetrometresini üreten Maruto Corporation (2006)'ın verisiyle birlikte analiz ederek, NPI ve σ_c arasındaki ilişkiyi aşağıdaki görgül eşitlikle ifade etmişlerdir.

$$\sigma_c \text{ (MPa)} = 0.51 \text{NPR}^{0.8575} \quad (5.1)$$

Zelve Vadisi'nden çok sayıda örnek alınmasına izin verilmediği için, Zelve tufüne ait laboratuvarında tayin edilen σ_c değerlerinin artırılması amacıyla, belirlenen NPR değerleri (Çizelge 5.2) ve bu değerler kullanılarak Eşitlik 5.1'den dolayı olarak σ_c değerleri hesaplanmıştır. 6. Bölümde verilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin sonuçlarına göre en büyük, en küçük ve ortalama σ_c değerleri sırasıyla $\sigma_{cmax} = 6.32$ MPa, $\sigma_{cmin} = 3.85$ MPa ve $\sigma_{cort} = 4.95$ MPa olup, bu değerler Çizelge 5.2'de verilen ve NPR değerlerinden tahmin edilen σ_c değerleriyle genel olarak uyum göstermektedir.

5.7. Schmidt Çekici Deneyleri

Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının belirlenmesi amacıyla, ayrıntılarına 7. Bölümde değinilen ve Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi girişindeki yamaçta meydana gelmiş olan kama tipi duraysızlığın geriye dönük analizinde kullanılmak üzere, süreksizlik yüzeylerinin dayanımının belirlenmesi gerekmiştir. Bu amaçla uygulanan "Barton Yenilme Ölçütünde" (Barton, 1973) kullanılmak üzere, Schmidt Çekici deneylerinden yararlanılmış olup, bu amaçla L-Tipi Schmidt çekici kullanılmıştır.

Schmidt deneyleri ISRM (2007) tarafından önerildiği şekilde, her bir deney yerinde 10 ayrı noktada uygulanıp ölçülen Schmidt geri sıçrama değerlerinden en yüksek 5 tanesinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Sonuçlar, ortalama Schmidt geri sıçrama değerlerinin 16-20 arasında değiştiğine işaret etmektedir.

Çizelge 5.2. Yarı – yeraltı açıklıklarında yapılan iğne penetrometresi deneylerinin sonuçları.

Lokasyon	F (N)	ΔL (mm)	NPR (N/mm)	σ_c (MPa)	σ_{cort} (MPa)
L-2	100	3	33.3	10.32	6.98
	100	4.5	22.2	7.29	
	100	5	20.0	6.66	
	100	10	10.0	3.67	
L-6	100	6	16.7	5.69	5.89
	100	5	20.0	6.66	
	100	6.5	15.4	5.32	
L-11	100	10	10.0	3.67	4.34
	100	10	10.0	3.67	
	100	10	10.0	3.67	
	100	6	16.7	5.69	
	100	7	14.3	4.99	
L-16	100	4	25.0	8.06	5.89
	100	6.5	15.4	5.32	
	100	6	16.7	5.69	
	100	6	16.7	5.69	
	100	5.5	18.2	6.14	
	100	7	14.3	4.99	
	100	6.5	15.4	5.32	
L-34	100	6	16.7	5.69	4.16
	70	9	7.8	2.96	
	100	7	14.3	4.99	
	100	10	10.0	3.67	
	85	10	8.5	3.20	
	100	8	12.5	4.45	

F: Penetrasyon kuvveti; ΔL : Penetrasyon miktarı; NPR: Ortalama iğne penetrasyon direnci; σ_c : Eşitlik 5.1'den dolayı olarak tahmin edilen tek eksenli sıkışma dayanımı.

5.8. Meteoroloji İstasyonlarına Ait Verinin Değerlendirilmesi

Peltier (1950), Weinert (1964) ve Sanders and Fookes (1970) gibi birçok araştırmacı tarafından da belirtildiği üzere, kaya malzemelerinin ayrışmasında iklim koşulları önemli bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte; ıslanma – kuruma ve donma – çözülme süreçleri, birçok araştırmacı (Topal, 1995; Topal ve Doyuran 1997; Gökçeoğlu et al., 2000; Ergüler, 2009; Ergüler ve Ulusay 2009b) tarafından da belirtildiği üzere, tuf ve buna benzer kayaların ayrışmasını denetleyen önemli süreçlerdir. Bu nedenle, tez çalışmasının yürütüldüğü Zelve 1. Vadi'sinde söz konusu etki göz önünde bulundurularak, genel olarak Kapadokya Bölgesi ve özellikle Zelve Açık Hava Müzesi ile yakın civarındaki iklim koşulları da bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

Kapadokya Bölgesi'nin iklim ve bitki örtüsünün sunulduğu 2. Bölüm'de ayrıntılarına değinildiği üzere, bölgede genellikle kara iklimi hüküm sürmektedir. Bununla birlikte, donma – çözülme süreçleri sırasında ortamdaki suyun, başka bir deyişle yağışın varlığını birlikte değerlendiren Ergüler (2009)'e göre, bölgedeki ıslanma – kuruma ve donma – çözülme çevrim sayıları yıllık olarak sırasıyla, 34 ve 37 olarak belirlenmiştir. Topal (1995) tarafından Nevşehir Meteoroloji İstasyonu'nun 1990, 1991 ve 1993 yıllarında alınan kayıtlar ve 0 °C civarındaki değişimler esas alınarak yapılan değerlendirmeye göre ise, donma ve çözülme çevrimleri bu yıllar için sırasıyla 68, 38 ve 62'dir.

Zelve Açık Hava Müzesi'nde hüküm süren yerel iklim koşullarının (sıcaklık, nem ve yağış) belirlenmesi ve sürekli olarak izlenmesi amacıyla, tez danışmanı ile Japonya'dan araştırmacıların diğer bir araştırma için müze girişine ve içerisine yerleştirdikleri 2 adet meteoroloji kayıt istasyonundan (Şekil 5.12) alınan sırasıyla yaklaşık 4 yıllık veri ile Ekim 2009 ve Nisan 2011 arasındaki dönemi kapsayan yaklaşık 1.5 yıllık veri bu bölümde değerlendirilmiştir. Bu aşamada, iki istasyondan alınan kayıtlar değerlendirilmiş olmakla birlikte, özellikle müze girişine yerleştirilen ve daha uzun zamandır aralıksız olarak kayıt yapan istasyonun verisi kullanılmıştır. Mayıs 2006 ile Nisan 2011 tarihleri arasında alınan tüm veriye göre, bölgede en yüksek sıcaklıklar ortalama 32–33 °C ile Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleşmiş olup, kaydedilen en düşük ve en yüksek sıcaklıklar

(a)



(b)



Şekil 5.12. Zelve Vadisi'nin (a) girişinde ve (b) içinde kurulmuş olan meteoroloji kayıt istasyonları.

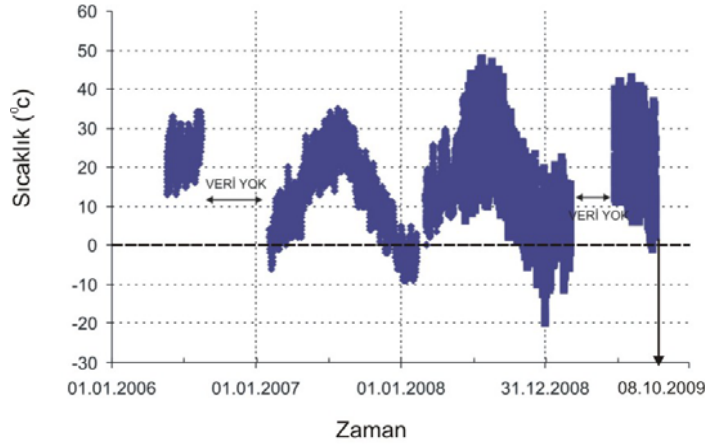
sırasıyla, -20°C (Ocak, 2009) ve 48°C (Temmuz, 2008)'dir (Şekil 5.13a). Yine ölçülen sıcaklık kayıtlarından donma olayının Kasım ve Mart ayları arasındaki dönemde meydana gelebileceği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, aynı istasyonlara ait nem kayıtları incelendiğinde, nem oranının yaz aylarında %20 ile %40, bahar ve kış aylarında ise %60 ile %80 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5.13b). Bununla birlikte, bölgede son 7 ayda kaydedilen sıcaklık ve nem verisinin gün içerisindeki kayıt aralığının eski veriye göre daha geniş olması nedeniyle, veri sayısı göreceli olarak daha azdır. Bu nedenle ve ayrıca son 7 ayda kaydedilen sıcaklık ve nem değişikliklerinin daha ayrıntılı gözlenebilmesi amacıyla bu veri ayrı tutularak değerlendirilmiştir. Buna göre, kaydedilen en düşük ve en yüksek sıcaklıklar sırasıyla, -7°C (Ocak, 2009) ve 24°C (Ekim, 2010)'dir (Şekil 5.13c). Aynı istasyonlardan alınan nem kayıtları incelendiğinde ise, bahar ve kış aylarında ortalama nem oranının % 50 ile %70 arasında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 5.13d).

Söz konusu istasyonlardan alınan yağış verisi Haziran – Eylül 2008 ve Haziran – Ekim 2009 dönemlerini içerdiğinden (Şekil 5.14), tüm bir yılı temsil edici sonuçlara ulaşamamıştır. Bu nedenle, donma – çözülme süreçleri sırasında ortamdaki suyun, başka bir deyişle yağışın varlığını birlikte değerlendiren Ergüler (2009) tarafından ıslanma – kuruma ve donma – çözülme çevrimleri için sırasıyla 34 ve 37 olarak belirlenen değerler bu çalışmada esas alınmıştır.

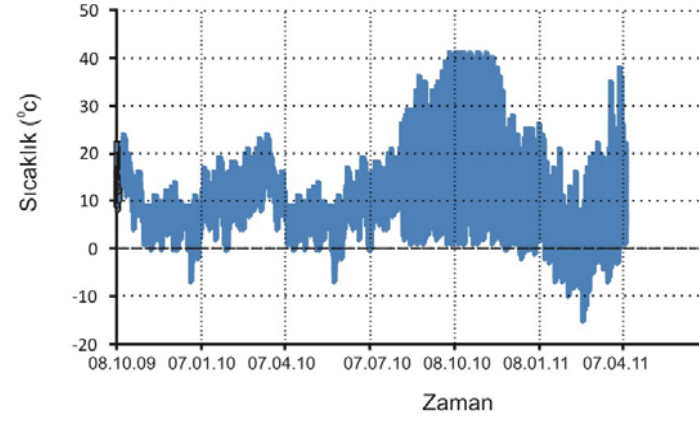
Tipik kara iklimi özelliklerinin hüküm sürdüğü Zelve Vadisi'nde gerek kış aylarında gerçekleşen donma - çözülme çevrimleri, gerekse gece ve gündüz sıcaklıkları arasındaki farklar ile bahar ve kış aylarının yağışlı geçmesi nedeniyle gerçekleşen ıslanma – kuruma çevrimlerinin vadide yüzeylenen tüfün ayrışmasında ve dolayısıyla dayanımının azalmasında önemli bir rol oynayabileceği düşünülmektedir.

5.9. Tüfteki Aşınma Miktarlarının Belirlenmesine Yönelik Ölçümler ve Değerlendirmeler

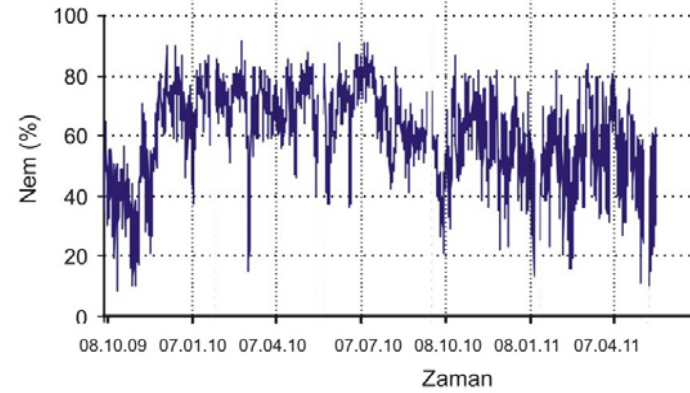
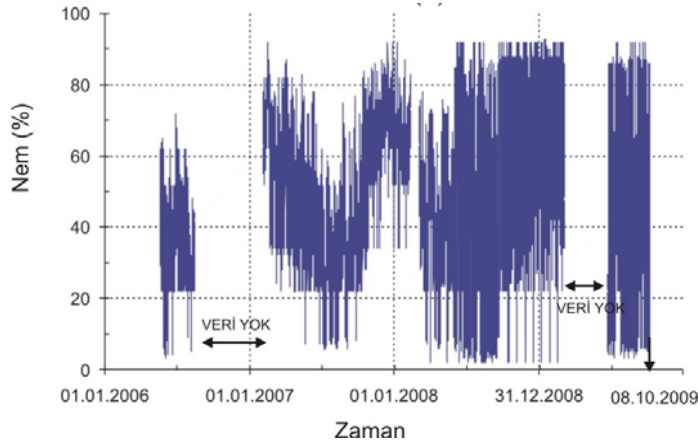
Zelve Vadisi'nde tüfler üzerindeki aşınma etkisinin (hızının) belirlenebilmesi amacıyla, Topal ve Doğan (1997)'in peri bacalarının içinde bırakılmış topuklarda gözlenen aşınmanın miktarının kaya içine paslanmaz çiviler yerleştirilerek ve



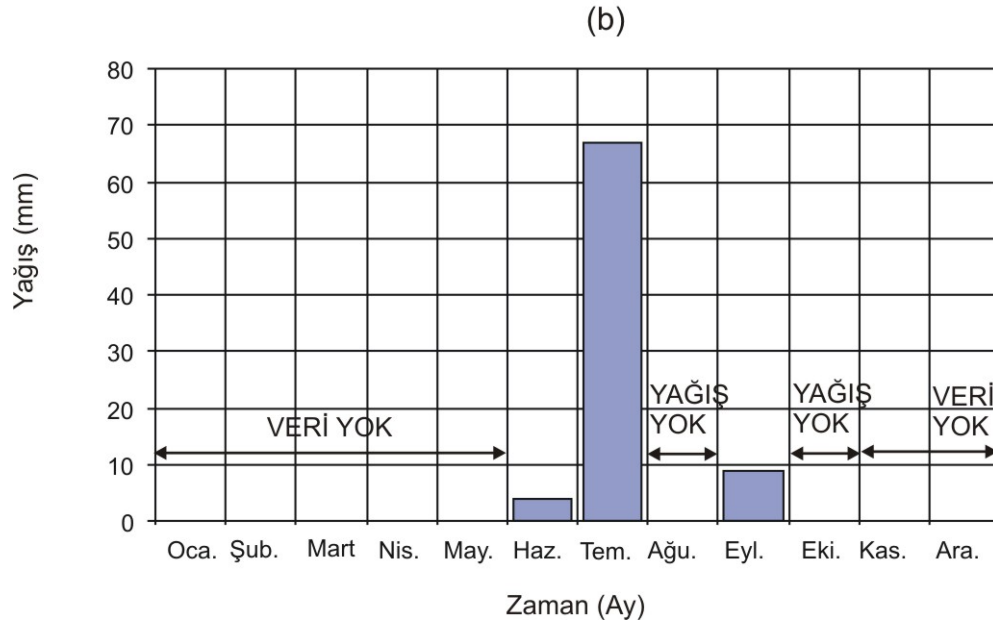
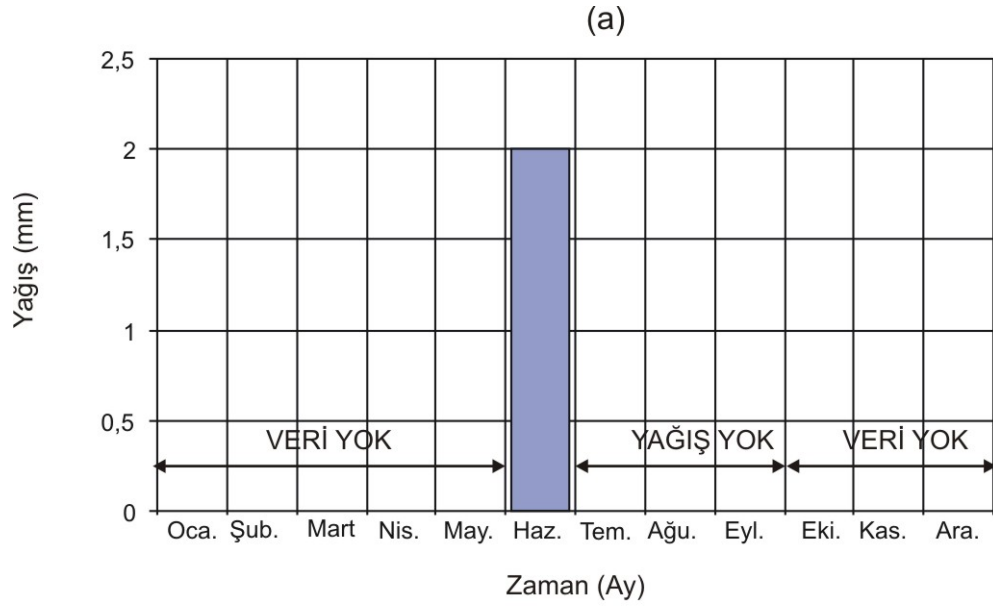
(a)



(b)



Şekil 5.13. Zelve Vadisi'nde tez çalışmasında da yararlanılması amacıyla kurulmuş olan meteoroloji istasyonlarından alınan 4 yıllık (a) sıcaklık ve (b) nem verileri 01.01.2006 – 08.10.2009 ve 08.10.2009 – 07.04.2011 dönemleri iki grafik halinde verilmiştir.

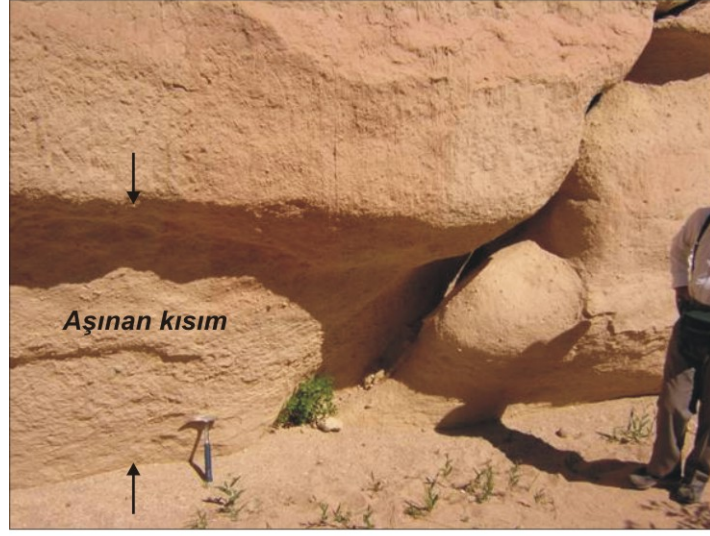


Şekil 5.14. Zelve Açık Hava Müzesi'nin iç kısmına kurulan meteoroloji istasyonundan alınan (a) 2008 ve (b) 2009 yıllarına ait aylık toplam yağış miktarları.

Çivilerin lülen uzunluklarındaki değişimin belirli zaman aralıklarında ölçülerek değerlendirilebileceği şeklindeki önerilerinin ışığında, kaya yüzeylerine ve vadideki dere yatağında bulunan birkaç kaya bloğunun zerine Japonya'dan temin edilen paslanmaz ve 10 cm uzunluğunda viler yerleştirilerek aşınma miktarı – zaman ilişkisinin belirlenmesine çalışılmıştır. Burada kullanılan yöntem oldukça basit olup, ilk aşamada kaya yüzeylerine yerleştirilen paslanmaz vilerin ilk boyları, başka bir deyişle kaya yüzeylerinden itibaren dışarıda kalan kısımlarının uzunlukları dijital kompasla ölçülmüştür. Daha sonraki aşamalarda ise, meydana gelen aşınma nedeniyle, vinin kaya içerisinden açığa çıkan kısmının uzunluğu, başka bir deyişle aşınma nedeniyle kaya yüzeyinde başlangıç ölçüm değerine göre oluşan farklılık belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Bu amaçla, öncelikle vadideki dere yatağındaki dik bir yamacın topuk kesiminde seçilen hatlar boyunca (şekil 5.15a) ve tabandan yukarı doğru kaya yüzeyine, ayrıca yine dere yatağındaki bir bloğa (şekil 5.15b) paslanmaz viler yerleştirilerek toplam 13 viden şekil 5.16'da görüldüğü gibi ölçümler alınmıştır. Ekim 2009'da yapılan arazi çalışmaları sırasında su etkisine maruz kalmayan kaya yüzeylerinde de aşınma miktarının belirlenebilmesi amacıyla, vadide akan derenin aşındırdığı yamacın karşı yamacına yerleştirilen 7 adet viden de ölçümler alınmıştır (şekil 5.17). Ayrıca, kavlaklanma etkisinin belirlenebilmesi amacıyla; kavlaklanmanın yoğun olarak gözlendiği tipik bir yarı-yeraltı açıklığının iç kısmına da Ekim 2009'da 3 adet vi takılarak burada da ölçümlere devam edilmiştir (şekil 5.17c).

İlk aşamada, vadideki dere yatağında yamacın topuk kesimine ve yine dere yatağındaki bloğa yerleştirilen vilerden, 2006 (Mart) ile 2011 (Nisan) yılları arasında yaklaşık 5 yıllık bir süre içinde alınan ölçümler sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde, vilerin yerleştirildiği kaya yüzeylerinde bu süre boyunca 1.07 mm ile 6.21 mm arasında değişen bir aşınmanın meydana geldiği belirlenmiştir (şekil 5.18). Bu veriye göre, aşınmanın homojen olduğu varsayımıyla, yıllık ortalama aşınma miktarının 0.21 mm/yıl ile 1.24 mm/yıl arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, meydana gelen aşınmanın özellikle vadi tabanına yakın yerlerde göreceli olarak önemli miktarlara ulaştığı ve aşınma miktarlarında kiş ve ilkbahar aylarında artış meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar ve vadinin yaklaşık 1000 yıl gibi bir süredir yerleşime açık olduğu dikkate alınırsa, sadece doğal nedenlerle kayada

(a)



(b)

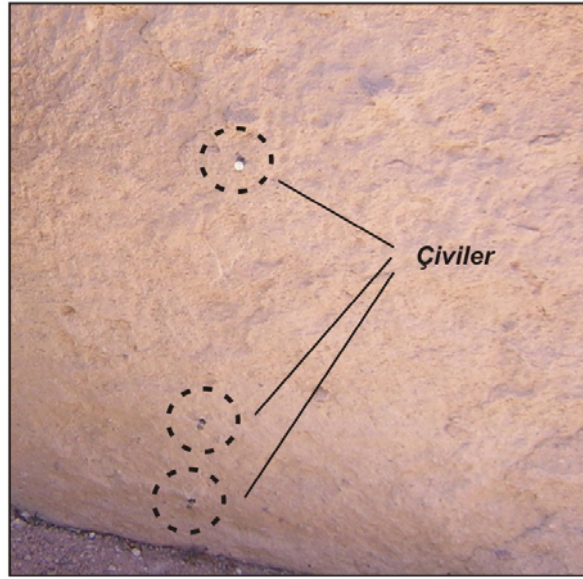


Şekil 5.15. Zelve 1. Vadi'nin tabanında aşınmanın etkisinin belirlenmesi amacıyla yerleştirilen çivilerin yerleri: (a) topuğu aşınan yamaç ve (b) vadi tabanında çivi yerleştirilen blok.

(a)



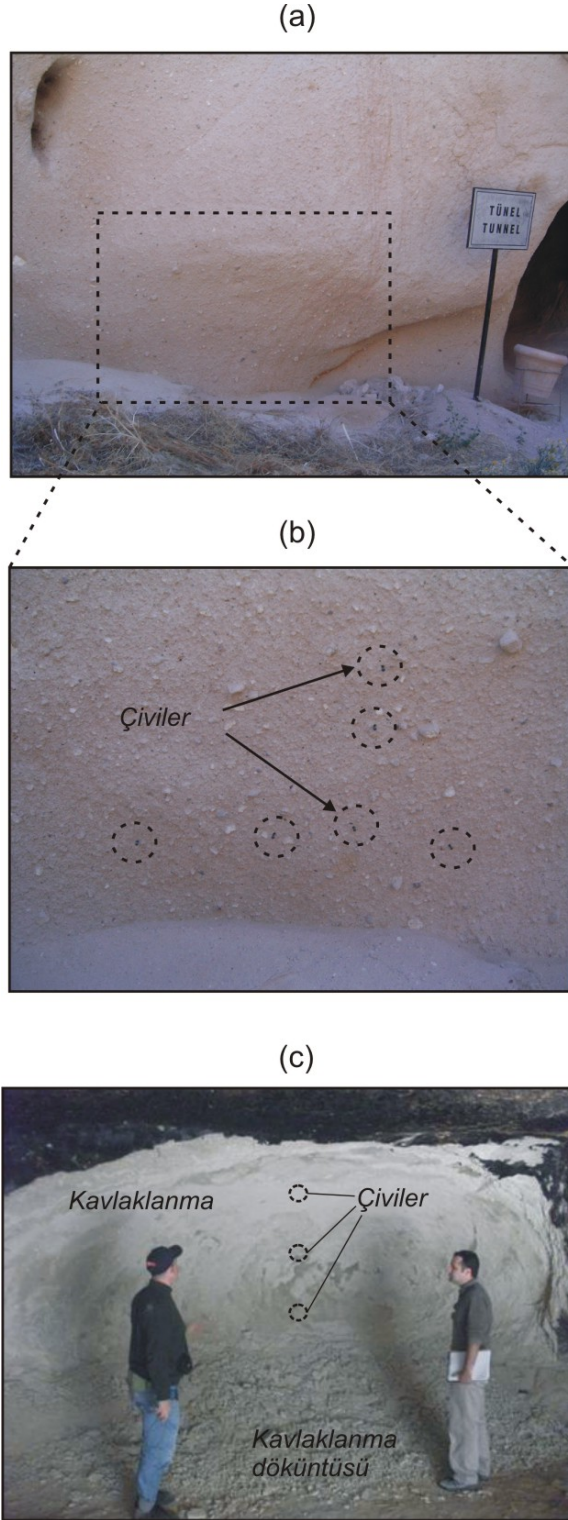
(b)



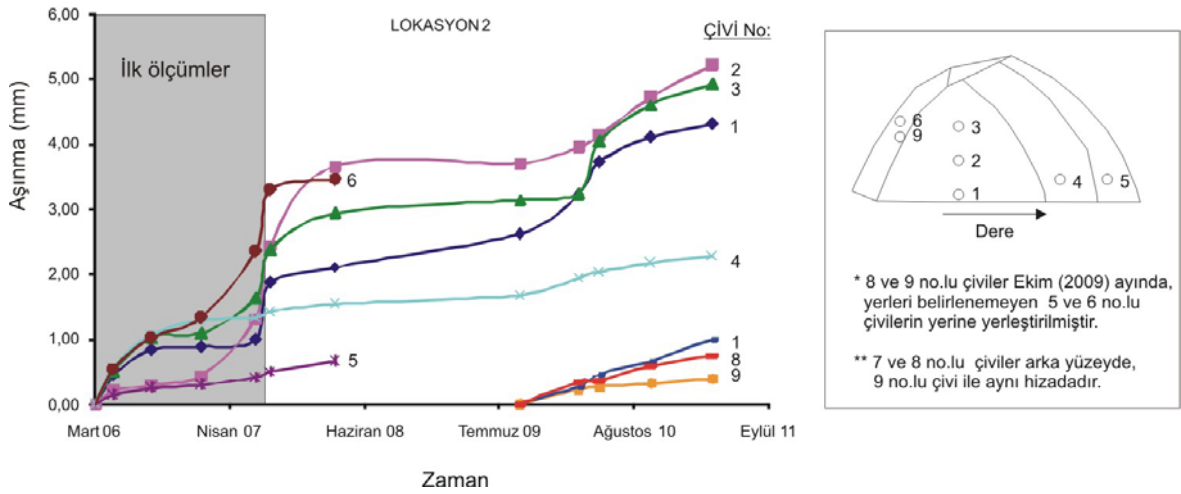
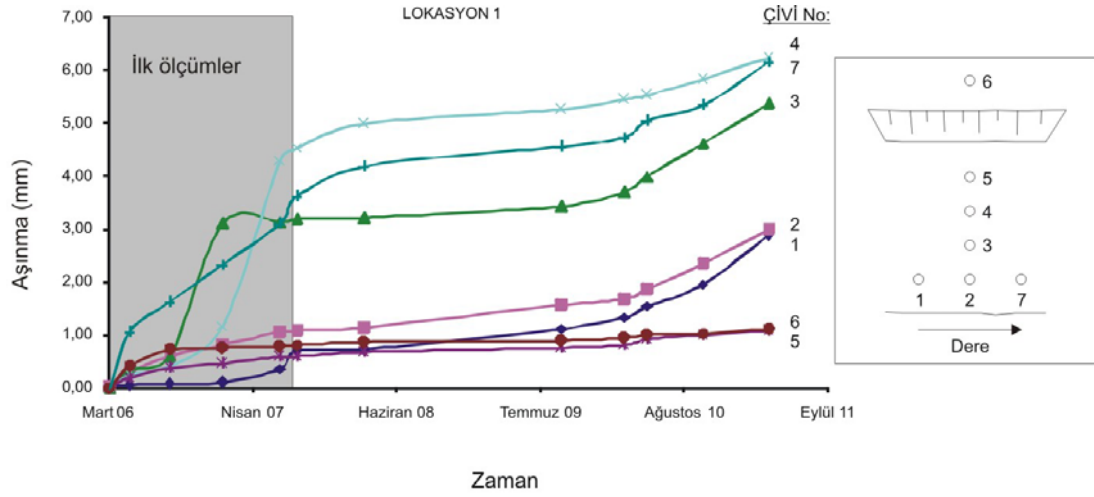
(c)



Şekil 5.16. Zelve 1. Vadi'de seçilen yerlerde aşınmanın belirlenmesi amacıyla (a) kaya yüzeylerine paslanmaz çivilerin yerleştirilmesi için delik açılması, (b) yerleştirilen çivilerin dizilimi ve (c) dijital kompasla çivilerden ölçüm alınması.



Şekil 5.17. Zelve 1. Vadi'deki dereden etkilenmeyen kesimlerde de aşınma miktarının belirlenebilmesi amacıyla (a), (b) yamaca yerleştirilen 7 adet çivi ve (c) kavaklanmanın miktarının tahmini amacıyla vadideki yarı-yeraltı açıklıklarından birine yerleştirilen 3 adet çivinin konumları.



Şekil 5.18. Zelve 1. Vadi’de iki lokasyonda takılı çivilerden 2006 (Mart) - 2011 (Nisan) arasında alınan ölçümlere göre “aşınma miktarı zaman” grafikleri.

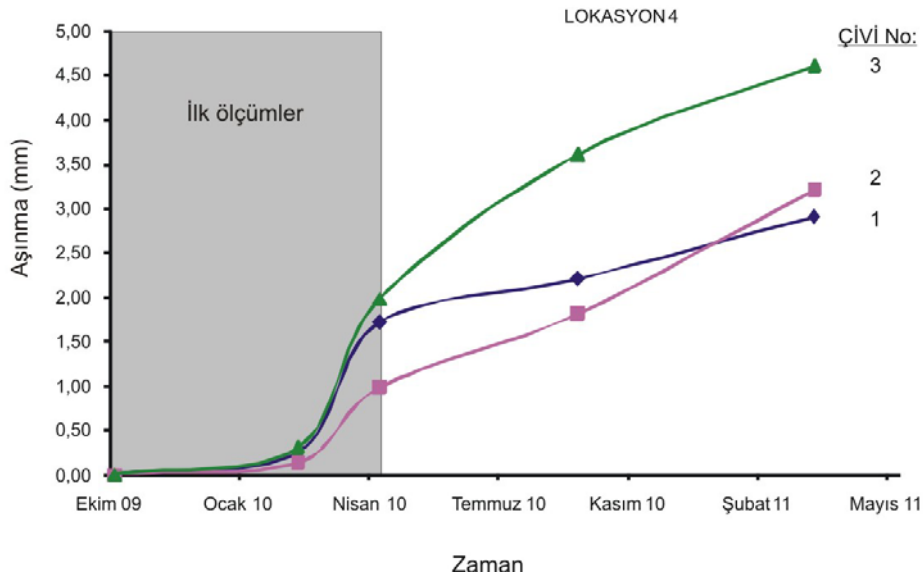
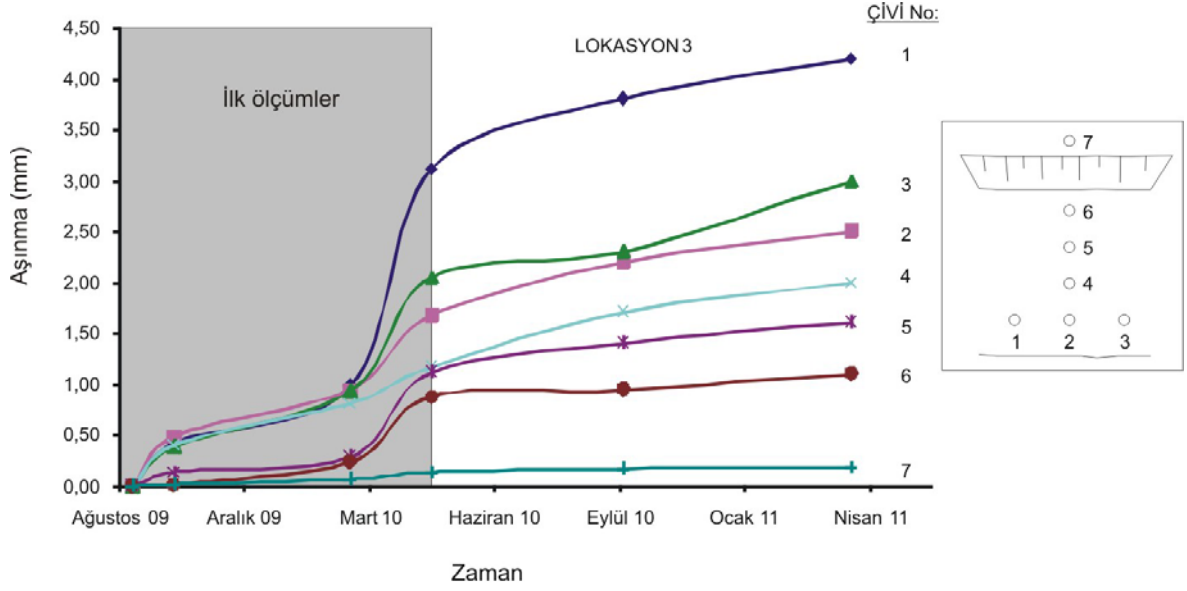
oluşabilecek aşınma miktarının Zelve Vadisi açısından oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Yukarıda değinilen ve Ekim 2009'da yerleştirilen toplam 10 adet ek çividen alınan ölçümler değerlendirildiğinde, çivilerin yerleştirildiği kaya yüzeylerinde bu süre boyunca 0.19 mm ile 4.2 mm arasında değişen bir aşınmanın meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 5.19). Ancak, çivilerin kaya yüzeylerine yerleştirilmesi sırasında oluşan çok az bir örselenmenin ilk ölçümleri arttırıcı yönde etkilemiş olması olasılığı dikkate alındığında, elde edilen aşındırma miktarlarının 1. ve 2. lokasyonlardan alınan ölçümlere göre daha düşük oldukları söylenebilir. Bu durum, Zelve tufünün aşınmasında, 1. Vadi'nin tabanında akan derenin etkisinin oldukça önemli olduğuna işaret etmektedir. Başlangıç ölçümleriyle ilgili olası örselenme etkisinin belirtilmesi amacıyla Şekil 5.18 ve 5.19'da ilk ölçümleri kapsayan dönem gri fonla gösterilmiştir. Bununla birlikte, diğer çivilere benzer şekilde, bahar aylarında aşınma ve kavlaklanma miktarlarında artış gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu durum, Zelve tufünün özellikle ıslanma – kuruma süreçlerine karşı oldukça duyarlı olduğuna işaret etmektedir.

Kapadokya Bölgesi'nin değişik kesimlerinde tarihi yapılardan tahmin edilen ve ayrıca arazi ölçümleriyle belirlenen tüflerdeki erozyon miktarları 0.04 ile 1.6 mm arasında değişmektedir (Aydan et al., 2008). Zelve 1. Vadi'deki ilk iki lokasyonda alınan ölçüm sonuçları belirtilen aralıkta yer almaktadır. Ancak kavlaklanmanın gözlemlendiği yarı-yer altı açıklığında ölçülen aralık (0.19 - 4.2 mm) bu değerlerden büyüktür. Bu durum, ölçüm alınan açıklıktaki kavlaklanmanın yüksek hızıyla ilgilidir.

5.10. Örnek Alımı

Jeomekanik laboratuvar deneyleri ve mineralojik-petrografik çözümlenmeler için Zelve 1. Vadi'den örnekler alınmıştır. Çalışma alanının tarihi bir saha olması nedeniyle örnekler sınırlı sayıda alınabilmiş ve özellikle yarı-yeraltı açıklıkları ile doğal yamaçların içinde ve topuklarında düşmüş veya düşmek üzere olan askıdaki blokların alınmasına özen gösterilmiştir. Örnekleme işlemi, temsil edici olması açısından vadinin farklı noktalarında yapılmıştır.



Şekil 5.19. İki lokasyonda takılı çivilerden 2009 (Ekim) - 2011 (Nisan) arasında alınan ölçümlere göre “aşınma miktarı zaman” grafikleri.

6. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Zelve Açık Hava Müzesi'nde yamaçların ve yarı-yeraltı açıklıklarının duraylılığının araştırılması amacıyla yapılan ve ayrıntılarına 7. Bölümde değinilen analitik ve sayısal çözümlerinde ve malzeme davranışının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere, Zelve Vadisi'nde yüzeyleyen tufün indeks, dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, saha çalışmaları sırasında tüflerden alınan blok örneklerden hazırlanmış karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Henüz bir standart veya önerilmiş bir yöntemi olmaması nedeniyle iğne penetrometresi deneyi hariç, tüm deneyler ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Bu deneylerin yanı sıra, mineralojik tayinler ve petrografik değerlendirmeler için ince kesit çözümlenmeleri ve X-ışınları kırınım analizleri de yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

6.1. İnce Kesit Çözümlenmeleri

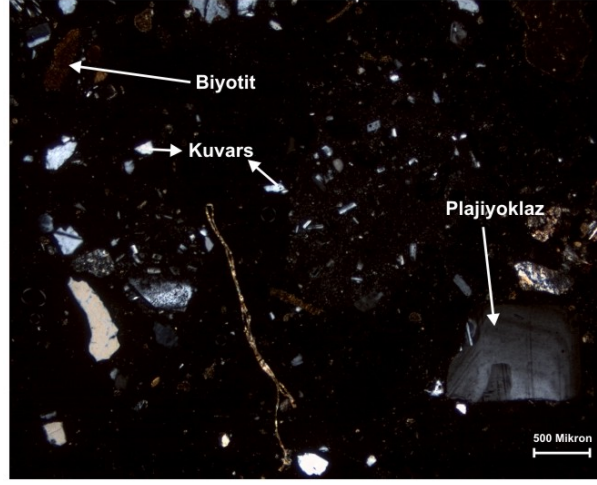
Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen tufün mineralojik bileşiminin belirlenebilmesi amacıyla istif boyunca aşağıdan yukarıya doğru 1. Vadi'deki 10 yerden (Şekil 6.1) alınan el örneklerinden Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarı'nda ince kesitler hazırlanmıştır. Tüflerin oldukça dağılgan olması nedeniyle ince kesitler hazırlanırken örnekler "Kanada Balzamu"na doyurulmuştur. Aynı bölümün Mineroloji ve Petrografi Anabilim Dalı öğretim üyelerinin desteğiyle yapılan ince kesit çözümlenmeleri sonucunda Zelve tufünde kayaç bileşenleri olarak; oldukça yüksek miktarlarda plajiyoklaz, göreceli olarak daha az miktarda kuvars ve biyotit minerallerine rastlanılmıştır. Tipik ince kesit görüntüleri Şekil 6.2'de verilmiştir. Kuvars minerallerinin parçalanmış ve kırıklı bir yapıya sahip oldukları gözlenmiştir.

Zelve tufünün diğer bir bileşeni olan pomzanın genellikle bol ve yuvarlak gözenekli, ayrıca genellikle şiddetli patlamayı işaret eden lifsi yapıda oldukları (Şekil 6.2b) belirlenmiş olup, tüm kayaç bileşenlerinin yaklaşık olarak %40'ını pomzanın oluşturduğu anlaşılmıştır.

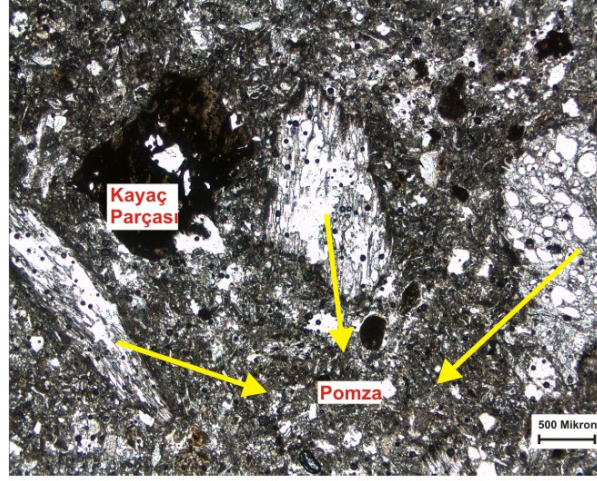


Şekil 6.1. İnce kesit çözümlmeleri ve X-ışınları kırınım analizlerinin yapılması amacıyla Zelve Vadisi'nden alınan örneklerin yerleri.

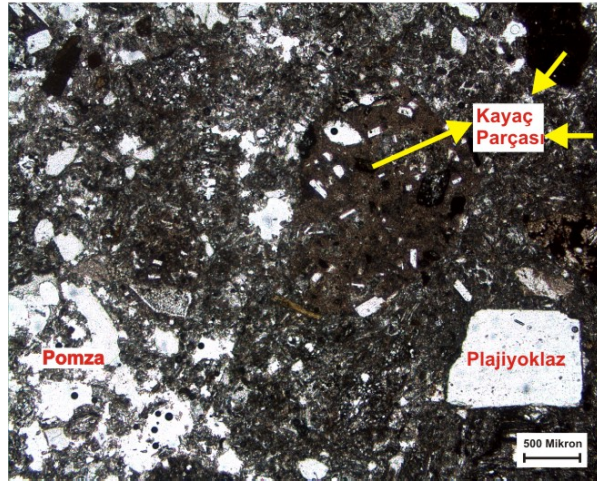
(a)



(b)



(c)



Şekil 6.2. Zelve tufünün kayaç bileşenleri, pomza ve kayaç parçalarını gösteren tipik mikroskop görüntüleri (Örnek No.: (a) L2, (b) L10, (c) T3).

Zelve tufünde gözlenen diğer bileşenler ise, kül ve yer yer bozunarak killeşmiş volkanik kökenli kayaç parçalarıdır.

Temel (1992) tarafından, Şekil 4.3'de gösterilen lokasyonlardan alınan Zelve tufüne ait örneklerde yapılan ince kesit çözümlenmeleri sonucunda da, Zelve tufünün plajiyoklaz, çok az miktarda kuvars ve biyotit ile pomza ve volkanik kayaç parçaları içerdiği belirlenmiştir. Özşekli – yarı özşekli olan kuvars kristallerinde dalgalı yanma sönmenin tipik ve plajiyoklazların yarı özşekli olduğu, ayrıca yer yer zonlu doku ve polisentetik ikizlenme gösterdikleri sonucuna varılmıştır.

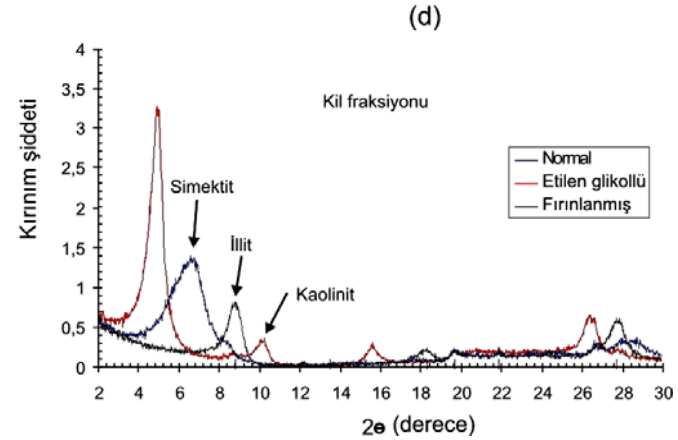
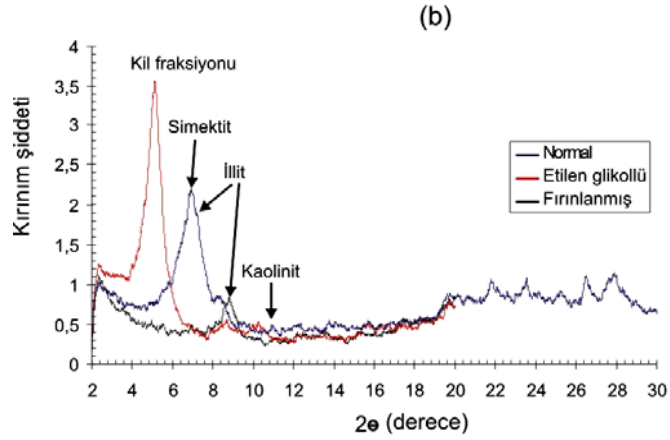
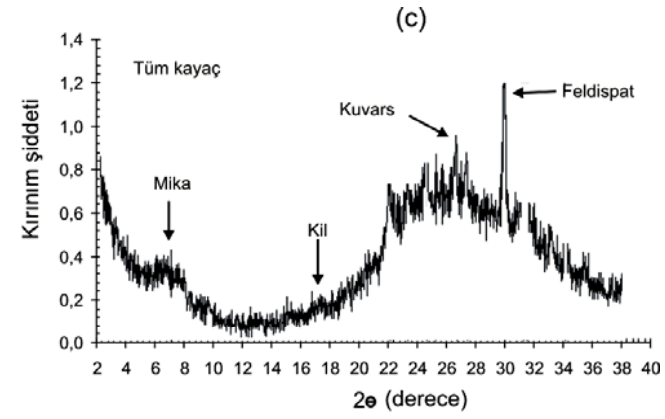
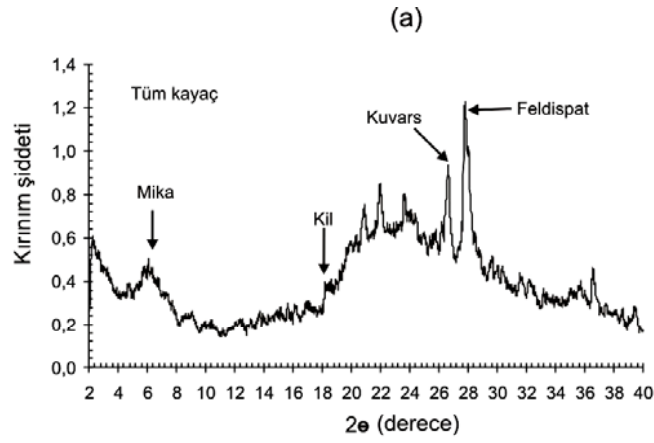
6.2. X- Işınları Kırınım Analizleri

Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeylenen tüften alınan örnekler üzerinde, mineral içeriklerinin yarı-niceliksel olarak belirlenebilmesi amacıyla X-ışınları kırınım çözümlenmeleri (XRD) gerçekleştirilmiştir. XRD difraktogramları Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nün X-ışınları Mikro Analiz Laboratuvarı'nda, 2⁰ dakika hızlı gonyometreye sahip, Philips PW-1140 model difraktometre ve normal, fırınlanmış (490°C) ve etilen-glikol ile hazırlanmış örnekler kullanılarak elde edilmiştir. Analizlerden elde piklerin temsil ettiği minerallerin belirlenmesi için ASTM (1972)'nin kartotekslerinden yararlanılmış, minerallerin nicel yüzdeleri ise Gündoğdu (1982) tarafından önerilen yöntemle göre hesaplanmıştır.

Ayrıca, Zelve tufünün mineral içeriğinin vadi boyunca kuzey – güney doğrultusunda 6 adet ve vadi tabanından tavanına doğru değişiminin incelenebilmesi amacıyla alınan 3 adet olmak üzere, inceleme alanından (bkz. Şekil 6.1) toplam 10 adet örnek üzerinde X-ışınları çözümlenmeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1'de sunulmuş ve tipik bazı difraktogramlar Şekil 6.3'de örnek olarak verilmiştir. Tüm kayaç analizleri sonucunda; kil minerallerinin baskın olduğu belirlenmiş olup, bu durum bozunmanın varlığına işaret etmektedir. Bununla birlikte, Zelve tufünde az

Çizelge 6.1. Zelve tufüne ait X-ışınları kırınımı çözümlerinin sonuçları.

Örnek No.	TÜM KAYAÇ (%)				KİL FRAKSİYONU (%)			
	Feldispat	Kuvars	Mika	Kil	Simektit	İllit	Kaolinit	
Bu çalışma	T1	19	4	4	73	85	10	5
	T2	23	3	11	63	95	3	2
	T3	13	3	5	79	88	8	4
	T4	17	4	7	72	94	6	0
	L5	62	2	14	22	100	0	0
	L6	16	4	-	80	91	6	3
	L8	23	7	-	70	90	5	5
	L10	23	3	6	68	83	11	6
	L12	10	5	-	85	96	2	2
	L13	29.9	1.7	12.9	36	82	11	7
Temel (1992)	22.8	4.3	3.6	69.4	92	4	4	
Aydan and Ulusay (2003)	2.5	3.5	6	88	89.5	1.5	9	



Şekil 6.3. Zelve tufünden alınan örneklerde yapılan X-ışınları kırınım çözümlerinden elde edilen bazı tipik tüm kayaç ve kil difraktogramları (Örnek No.: (a) ve (b) L10 ile (c) ve (d) T2).

miktarda feldispat ve çok az miktarda kuvars minerallerine rastlanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kil minerallerinin içinde simektit grubu kil minerallerinin baskın olduğu belirlenmiştir. Vadi boyunca ve vadi tabanından tavanına doğru (T1 – T4 örnekleri, Şekil 6.1) mineral içeriklerindeki değişim incelendiğinde, gerek vadi tabanı boyunca (kuzey – güney doğrultusunda) gerekse vadi tabanından tavanına doğru mineral içeriklerinde belirgin bir artış ya da azalma belirlenmemiştir. Bu durum, gerek vadi tabanı boyunca gerekse, vadi tabanından tavanına doğru bozunma açısından belirgin bir farklılığın söz konusu olmadığına işaret etmektedir.

Çözümlemelerden elde edilen sonuçlar, Zelve tufünü Kapadokya Bölgesi'ndeki diğer tuf seviyelerinden ayırtlayarak adlandıran Temel (1992) tarafından elde edilen X-ışınları kırınım analizi sonuçlarıyla (bkz. Çizelge 6.1) karşılaştırıldığında, tez çalışmasında belirlenen mineral içerikleri ile Temel (1992) tarafından belirlenenlerin birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Aydan ve Ulusay (2003) tarafından Zelve tufünde yapılan XRD çözümlerinden elde edilen sonuçlar ile (bkz. Çizelge 6.1) tez çalışmasında belirlenen mineral içeriklerinin de birbirine oldukça yakın oldukları görülmektedir.

6.3. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

6.3.1. Fiziksel Özellikler

Kayaların fiziksel özelliklerinin mekanik davranışları üzerindeki etkisini inceleyen birçok araştırmacıdan (örneğin; Price, 1960; Deere and Miller, 1966; Dube and Singh, 1972; Bell, 1978; Howarth and Rowlands, 1986; Hoshino, 1993; Vernik et al., 1993; Lashkaripour and Nakhaei, 2001; Ergüler and Ulusay, 2009a;), yüksek gözeneklilik değerlerinin, gerilmelerden kaynaklanan mikro-çatlakların ilerlemesini kolaylaştırdığını belirlemişlerdir. Boving and Grathwohl (2001) ise, gözeneklilik ile etkin difüzyon katsayısı arasında oldukça yakın bir ilişki belirlemişlerdir. Söz konusu çalışmalardan anlaşılacağı üzere; birim hacim ağırlık, gözeneklilik ve su emme değerlerinin kayaların mekanik özellikleri ve ayrışma davranışları

konusunda yararlı birer göstergelerdir. Zelve Vadisi'nde yüzeylenen tüften alınmış örnekler üzerinde birim hacim ağırlık (kuru ve doymuş), gözeneklilik (porozite), boşluk oranı, ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.2'de deneylerde kullanılan örnek sayılarıyla birlikte verilen sonuçlar; ortalama birim hacim ağırlık değerlerinin oldukça düşük olduğunu göstermekte olup, bunun başlıca nedeninin tüfün ağırlıklı olarak çok hafif pomza parçacıklarından oluşmasından kaynaklanmaktadır. Gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri ile buna bağlı olarak ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin de göreceli olarak yüksek olduğu belirlenmiştir.

6.3.2. Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

Zelve tüfünden alınan örneklerin kısa süreli mekanik özelliklerini incelemek amacıyla, özellikle sayısal modellemelerin yapılması için seçilen yarı-yeraltı açıklıklarından alınmış bloklardan hazırlanan kuru ve ıslak örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma ve dolaylı çekme (Brazilian deneyi) dayanımı deneyleri yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 6.3'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, kuru koşulla karşılaştırıldığında, doymuş koşulda Zelve tüfünün hem çekme hem de tek eksenli sıkışma dayanımı oldukça azalmaktadır (Çizelge 6.3 ve Şekil 6.4). Kuru ve doymuş koşullardaki dayanımlar karşılaştırıldığında (Şekil 6.5), tek eksenli sıkışma ve çekme dayanımlarının ortalama değerlerindeki azalış sırasıyla %83.8 ve %74.6'dur. Diğer yandan, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımının, ortalama çekme dayanımına oranı ise kuru ve doymuş durumlar için sırasıyla, 7.3 ve 4.4'tür. Kayanın özellikle yağışlı mevsimlerde su içeriğinin artacağı düşünülürse, dayanımdaki azalmaya koşul olarak olası duraysızlık sorunlarının bu tür dönemlerde artması beklenebilir.

Söz konusu tüf örneklerinin deformabilite özelliklerinin (Young modülü ve Poisson oranı) da tayin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, tüf örneklerinin üzerine birim deformasyon ölçerler yapıştırılmış, ancak örnek yüzeylerinin pürüzlü olması ve tellerin temassızlığı nedeniyle deneyler sırasında okuma alınamamıştır.

Çizelge 6.2. Birim hacim ağırlık, gözeneklilik (porozite), boşluk oranı, ağırlıkça ve hacimce su emme deneylerine ait sonuçlar.

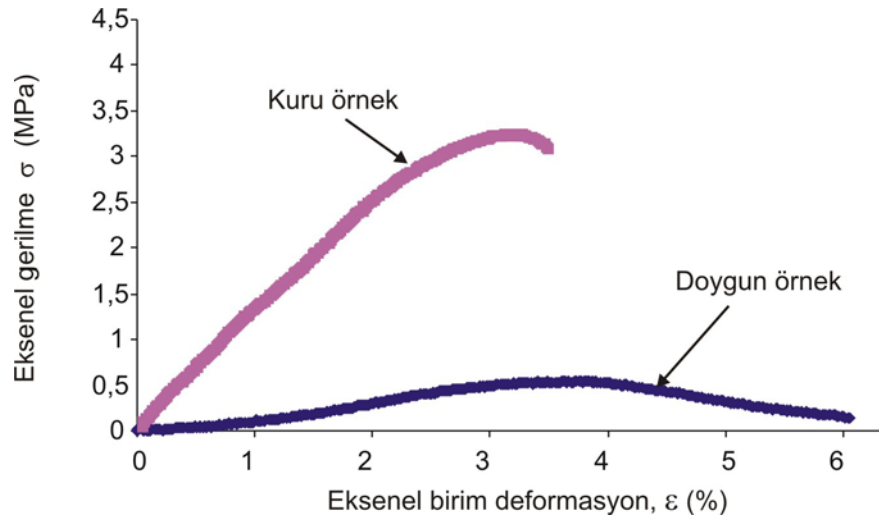
	Kuru	Doymun
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	11.90 – 14.61 (12.89 ± 0.69) *69	14.34 – 19.34 (15.50 ± 0.86) *46
Gözeneklilik (%)	19.52 – 41.10 (29.24 ± 4.72) *46	-
Boşluk oranı (%)	24 - 70 (42 ± 10) *46	-
Ağırlıkça su emme (%)	13.70 – 33.21 (22.29 ± 3.94) *46	-
Hacimce su emme (%)	19.52 – 41.10 (29.24 ± 4.72) *46	-

Parantez içindekiler "Ortalama± Standart Sapma" değerlerini, *69: Toplam deney örneği sayısını göstermektedir.

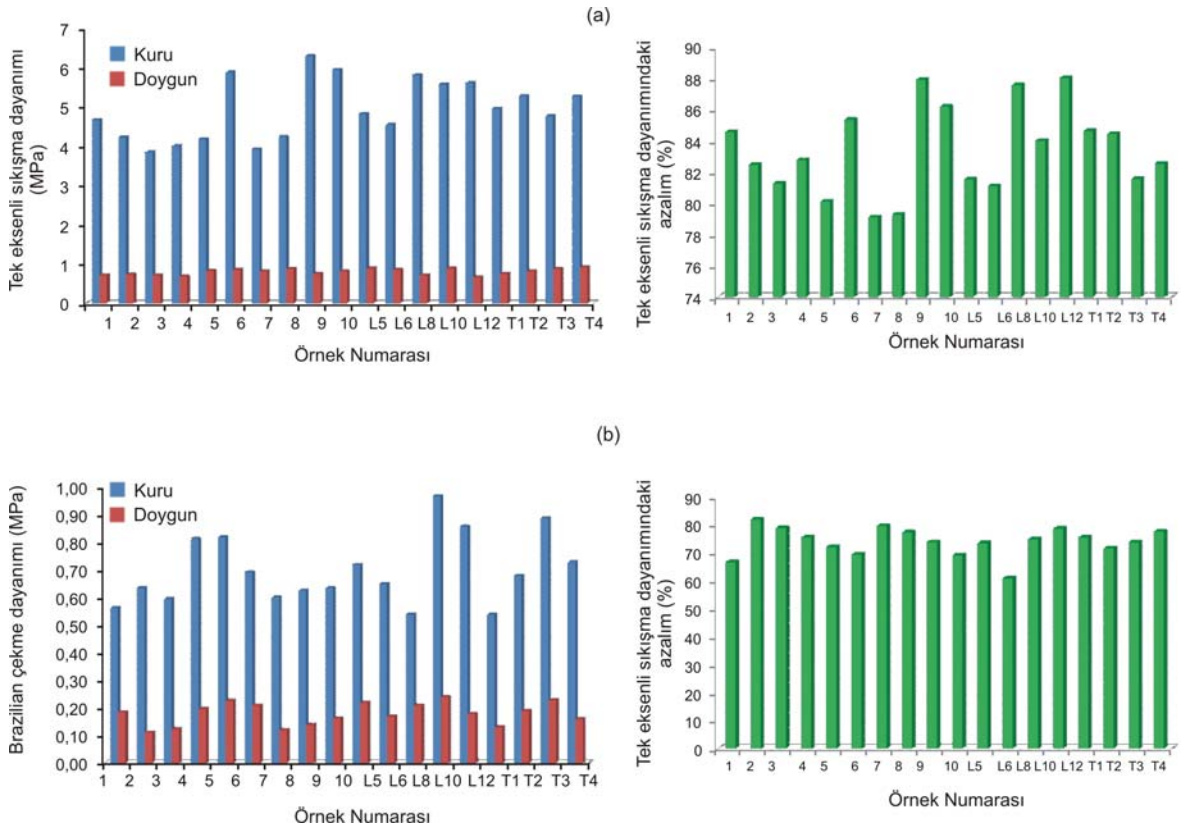
Çizelge 6.3. Tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü deneylerine ait sonuçlar.

	Kuru	Doymun	Doymun koşuldaki azalım (%)
Tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) (MPa)	3.85 - 6.32 (4.95 ± 0.77) *26	0.67- 0.92 (0.80 ± 0.08) *19	(83.8)
Dolaylı çekme dayanımı (MPa)	0.52 - 0.97 (0.68 ± 0.13) *26	0.11 - 0.24 (0.18 ± 0.04) *19	(74.6)
Teğetsel Young modülü (E_t) (GPa)	0.64 – 0.96 (0.82 ± 0.087) *19	0.21 – 0.43 (0.32 ± 0.063) *19	(60.9)

Parantez içindekiler "Ortalama± Standart Sapma" değerlerini, *19: Toplam deney örneği sayısını göstermektedir.



Şekil 6.4.(3) no.lu örneğe ait kuru ve doymuş durumlar için “eksenel gerilme - birim deformasyon” grafiği.



Şekil 6.5. Zelve tufü için kuru ve doygun koşullarda: (a) tek eksenli sıkışma ve (b) çekme dayanımlarındaki azalımın karşılaştırılması.

Bu sorun nedeniyle, söz konusu deneyler LVDT (Linear Variable Differential Transducer: Doğrusal Değişken Farksal Dönüştürücü) kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu aşamada ise, sadece düşey yöndeki LVDT'den okuma alınabilmiş ve dolayısıyla sadece aksenal birim deformasyon değerleri belirlenebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kayanın elastisite modülünün de dayanıma benzer şekilde azalmakta olduğunu ve bu azalmanın %60.9'a kadar çıktığına işaret etmektedir. Yatay yöndeki LVDT'den yine muhtemelen karot yüzeylerine yeterli temasın sağlanamaması nedeniyle okuma alınamamış ve dolayısıyla Zelve tufüne ait Poisson oranı değerleri belirlenememiştir. Bu nedenle, 7. Bölümde ayrıntılarıyla sunulmuş olan sayısal çözümlerinde Zelve tufü için Aydan ve Ulusay (2003) tarafından tayin edilmiş Poisson oranı değeri kullanılmıştır.

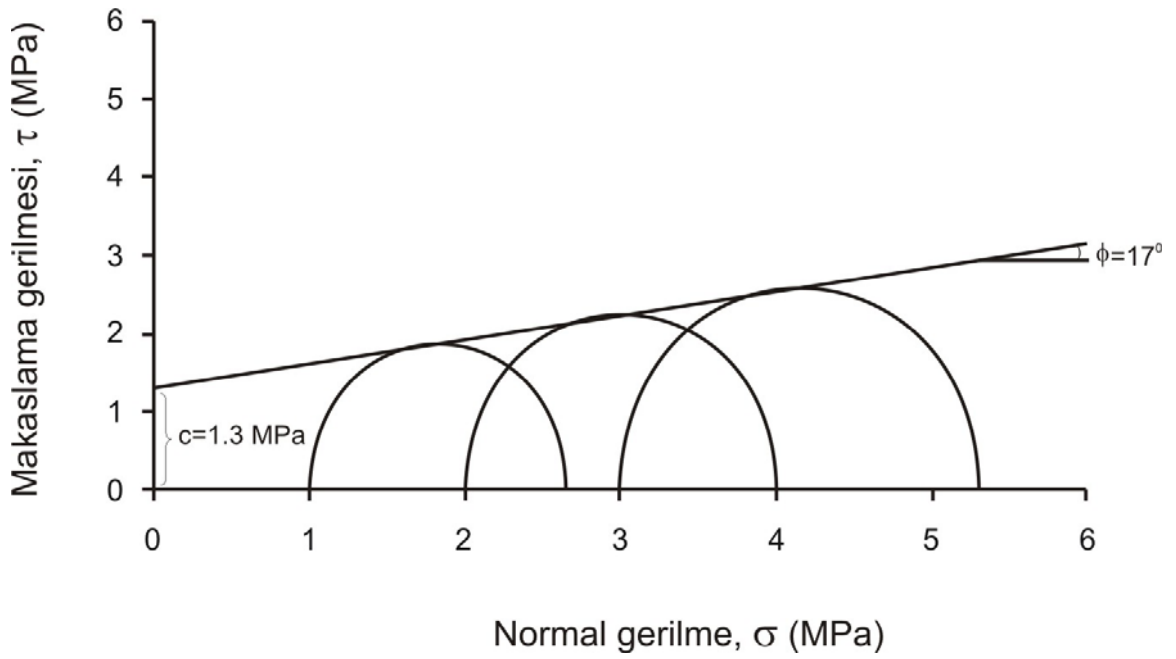
6.3.3. Üç – Eksenli Sıkışma Deneyleri

Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeylenen tufün dayanım parametrelerinin 3-eksenli koşullarda belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler Zelve 1. Vadi'den alınan blok örneklerden hazırlanan NX çaplı ($R=54.7$ mm) ve 3 örnekten oluşan 1 deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında örneklere çok düşük bir yükleme hızı (0.05 mm/dak) ve sırasıyla 1, 2 ve 3 MPa'lık hücre basınçları (yanal basınç) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Zelve tufü için ortalama makaslama dayanımı parametreleri $c=1.3$ MPa, $\phi= 17.1^0$ olarak belirlenmiştir (Şekil 6.6).

6.4. İndeks Özelliklerin Belirlenmesine Yönelik Deneyler

6.4.1. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyleri

Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_d) bir tasarım parametresi olmayıp, kayaların atmosferik koşullarda ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı gösterecekleri direncin veya davranışın bir göstergesidir. ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemde, su dolu bir hazneye yerleştirilen delikli bir tambur içine konmuş örneğe iki kez ıslanma ve kuruma çevriminin uygulanması gerekmektedir. Ancak, gerek Ulusay et al. (1995) bir kömür işletmesindeki marndan oluşan döküm harmanlarında, gerekse Gökçeoğlu (1997) ve Gökçeoğlu et al. (2000) farklı kaya birimleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda, özellikle kil içeren zayıf kayalar için bu deneyde iki çevrim uygulanmasının bu davranışın karakterize edilmesi açısından



Şekil 6.6. Zelve tûfû üzerinde yapılan üç eksenli deneyler sonucunda elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.

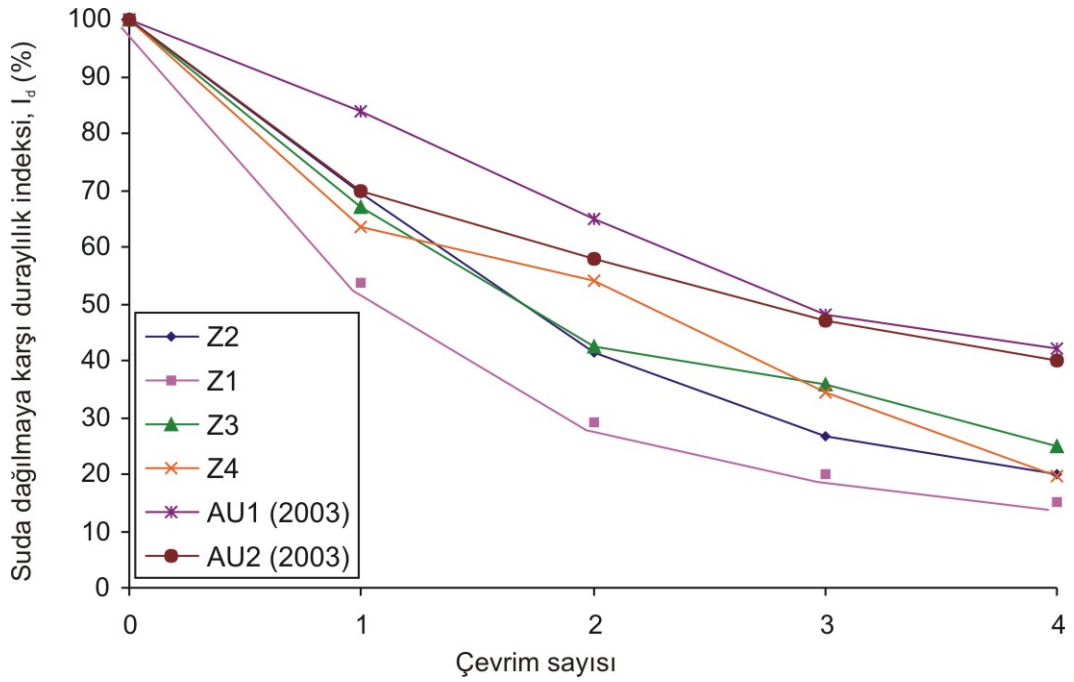
yetersiz kaldığını belirlemişler ve özellikle kil içeren kayalarda iki yerine dört çevrim yapılmasını önermişlerdir. Bu husus gözetilerek, bu çalışmada da deneyler dört çevrim uygulanarak yapılmıştır. 4 çevrim için hesaplanan suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir. Ayrıca, I_d 'nin çevrim sayısına bağlı değişimi de deneye tabi tutulan her örnek için Şekil 6.7'de, örneklerin her çevrim sonundaki görünüşleri de Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, deneye tabi tutulan örneklerin I_d değerlerinin 4. çevrim sonunda, %19.7 ile %25'e düştüğü, dolayısıyla Zelve Vadisi'nde yüzeylenen Zelve tufunun atmosferik etkilere karşı oldukça duyarlı ve dağılılabile eğiliminin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışması sırasında yapılan deneylerin sonuçları ile Aydan ve Ulusay (2003) tarafından belirlenen değerler karşılaştırıldığında (bkz. Şekil 6.7), I_d değerlerinde 4 çevrim sonunda benzer bir eğilim gözlenmektedir.

6.4.2. İslanma – Kuruma ve Donma – Çözülme Deneyleri

Birçok araştırmacı (Topal, 1995; Topal and Doyuran 1997; Gökçeoğlu et al., 2000; Aydan et al., 2008b; Ergüler, 2009; Ergüler and Ulusay 2009b) tarafından da belirtildiği üzere, ıslanma – kuruma ve donma – çözülme süreçlerinin tuf ve buna benzer kayaların ayrışmasını denetleyen önemli süreçlerdir. Ayrıca, literatürde tekrarlı donma süreçleri sırasında gelişen gerilmelerin, özellikle dar ve kapalı süreksizliklerde 200 MPa'a kadar ulaştıkları ve bir yıl içinde kayanın çekme dayanımını defalarca aşarak kayanın ayrışmasında önemli rol oynadıkları belirtilmektedir (Ollier, 1984). Bununla birlikte, bazı araştırmacılara (Gökçeoğlu, 1997; Ergüler and Ulusay, 2009b) göre, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneylerinde, deney yönteminin doğasından kaynaklanan mekanik etki nedeniyle kayanın deney sırasındaki dağılma süreci, doğada meydana gelen ıslanma – kuruma süreçlerine göre daha farklı ve dinamik bir şekilde olmaktadır. Bilindiği üzere, ıslanma – kuruma süreçleri doğada statik bir şekilde meydana gelmektedir. Yukarıda bahsedilen gerekçeler ve suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneylerindeki sınırlamalar nedeniyle, atmosferik etkiler altında Zelve Vadisi'nde yüzeylenen tufün davranışının ve mekanik özelliklerindeki değişimin daha iyi bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla ASTM (1994) standartlarına göre ıslanma – kuruma ve donma – çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.4. Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi (I_d) deneylerine ilişkin sonuçlar.

Örnek No.	1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim
	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	I_{d3} (%)	I_{d4} (%)
Z1	53.74	29.12	20.08	15.13
Z2	69.51	41.49	26.60	20.06
Z3	66.92	42.50	35.81	24.95
Z4	63.34	53.88	34.42	19.65



Şekil 6.7. Zelve tufü örneklerinde (Z1-Z4) suda dağılmaya karşı duraylılık indeksinin çevrim sayısına bağlı değişimi (AU1 (2003) ve AU2 (2003): Aydan ve Ulusay (2003) tarafından aynı tufü üzerinde yapılan deneylere aittir).

1. çevrim sonrası



2. çevrim sonrası



3. çevrim sonrası



4. çevrim sonrası

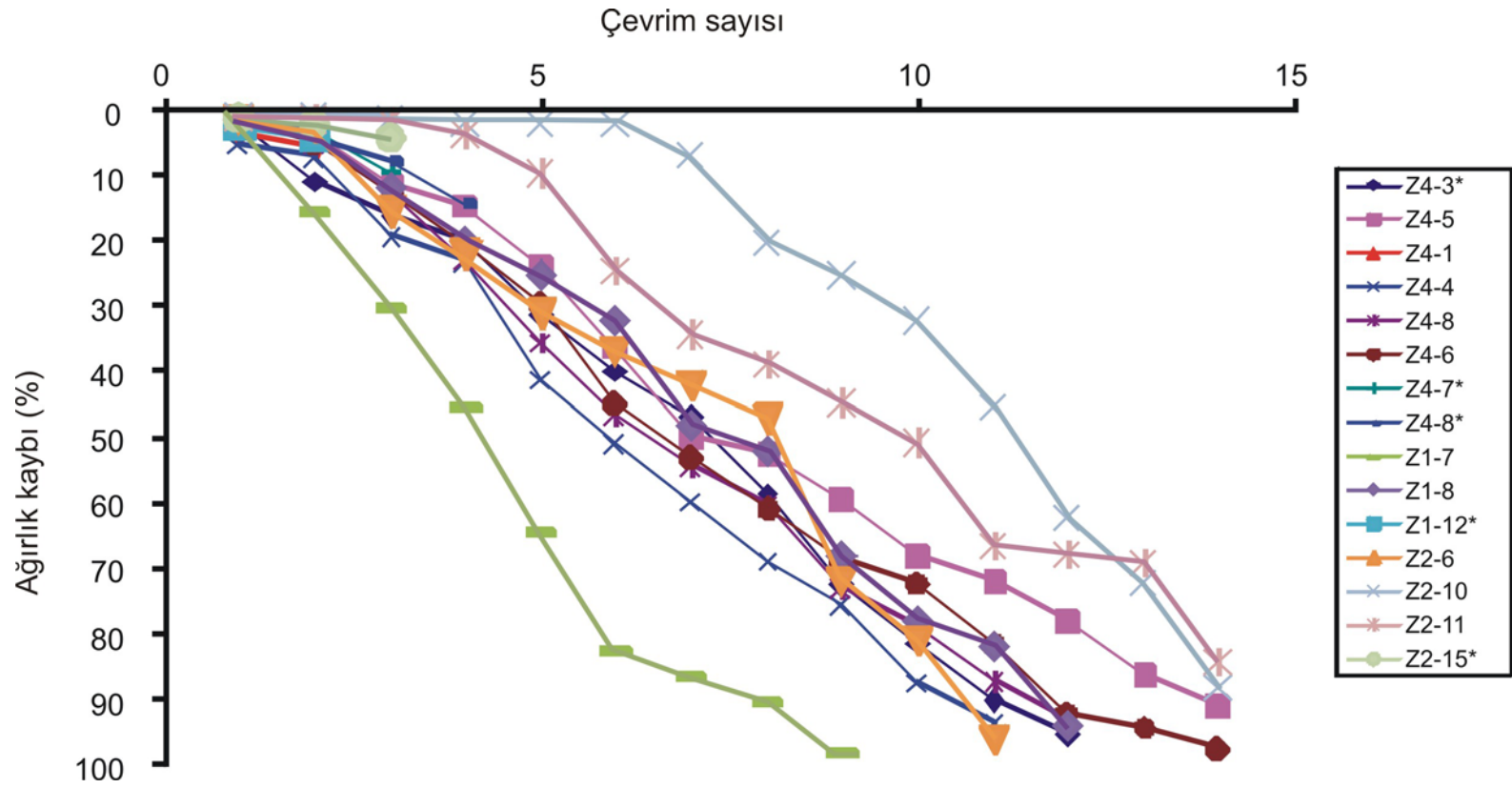


Şekil 6.8. Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeyleyen Zelve tufunun suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneylerinde uygulanan her çevrim sonrasındaki durumları.

Kapadokya Bölgesi ve özellikle Zelve Açık Hava Müzesi ile yakın civarındaki iklim koşullarının irdelendiği 5. Bölüm'de de belirtildiği üzere, donma – çözülme süreçleri sırasında ortamdaki suyun, başka bir deyişle yağışın varlığını birlikte değerlendiren Ergüler (2009)'e göre, bölgedeki ıslanma – kuruma ve donma – çözülme çevrimleri sırasıyla, 34 ve 37 olarak belirlenmiştir. Topal (1995) tarafından Nevşehir Meteoroloji İstasyonu'nda 1990, 1991 ve 1993 yıllarında alınan kayıtlar ve 0 °C civarındaki değişimler esas alınarak yapılan değerlendirmeye göre ise, donma ve çözülme çevrimleri bu yıllar için sırasıyla 68, 38 ve 62'dir. Bununla birlikte, yine 5. Bölüm'de belirtildiği üzere, Zelve Açık Hava Müzesi'nin girişine yerleştirilen meteoroloji istasyonlarından alınan yağış verisinin sadece Haziran – Eylül 2008 ve Haziran – Ekim 2009 dönemlerini temsil etmemesinden dolayı (bkz. Şekil 5.14), tüm bir yılı temsil edici veriye ulaşılammıştır. Bu nedenle, bu çalışmada donma – çözülme süreçleri sırasında ortamdaki suyun, başka bir deyişle yağışın varlığını birlikte değerlendiren Ergüler (2009) tarafından ıslanma – kuruma ve donma – çözülme çevrim sayıları için sırasıyla 34 ve 37 olarak belirlenen değerler esas alınmıştır.

Islanma – kuruma ve donma – çözülme deneyleri için Zelve Açık Hava Müzesi'nden alınan blok örneklerden NX çaplı (R=54.7 mm) karot örnekleri hazırlanmıştır. Örnek hazırlama aşamasında, çevrimler sonunda örneklerin üst kısımlarının ayrışacağı ve belirli çevrimler sonunda tek eksenli sıkışma dayanımındaki (σ_c) azalmanın belirlenmesi amacıyla yapılacak tek eksenli deneyler için örneklerin üst kesimlerinin kesilmesi suretiyle örnek hazırlanabileceği öngörülerek, örnek boyları mümkün olduğunca standartlarda belirtilenden daha uzun tutulmaya çalışılmıştır. Hazırlanan karot örnekleri, 24 saat süre ile 15 – 20 °C sıcaklıktaki saf suda bekletilmiş ve daha sonra 105 °C'lik fırında kurutulmuştur. Bir saatlik soğuma süresinden sonra kuru ağırlıkları tartılan örneklerin her bir çevrim sonrasındaki ağırlık kayıpları belirlenmiştir (Şekil 6.9).

Söz konusu deneylerden elde edilen sonuçlar, 10. çevrim sonunda örneklerin % 67.8 – 87.5 arasında değişen ağırlık kaybına uğradıklarını ve hemen hemen tamamen dağıldıklarını göstermektedir. Örneklerin 2, 5, 8 ve 10. çevrimler sonundaki görünüşleri de Şekil 6.10'da verilmiştir. Islanma – kuruma süreçlerinin Zelve tufunun tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) üzerindeki etkisinin



Şekil 6.9. Zelve tûfû örneklerinde ıslanma - kuruma çevrimleri sonunda ağırlık kaybındaki değişimi gösteren grafik (* : Çevrimler sonunda tek eksenli sıkışma deneyi yapılan örnekler) .

2. çevrim sonrası



5. çevrim sonrası



8. çevrim sonrası



10. çevrim sonrası

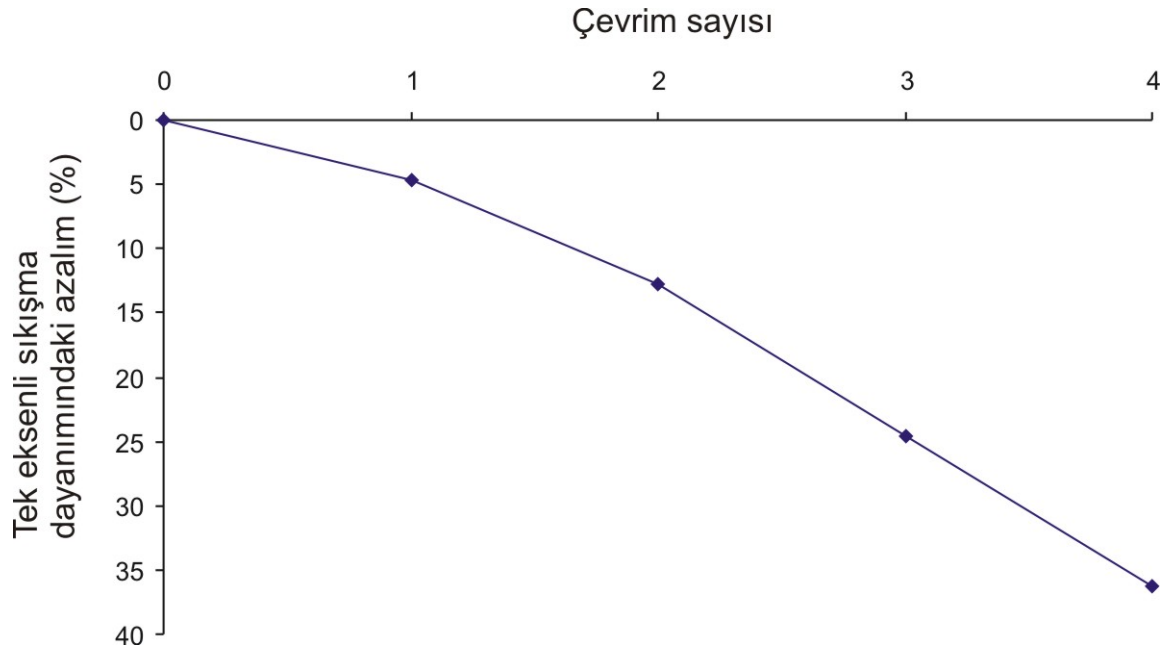


Şekil 6.10. Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeylenen Zelve tufünün ıslanma - kuruma deneylerinin 2, 5, 8 ve 10. çevrimler sonrasındaki durumları.

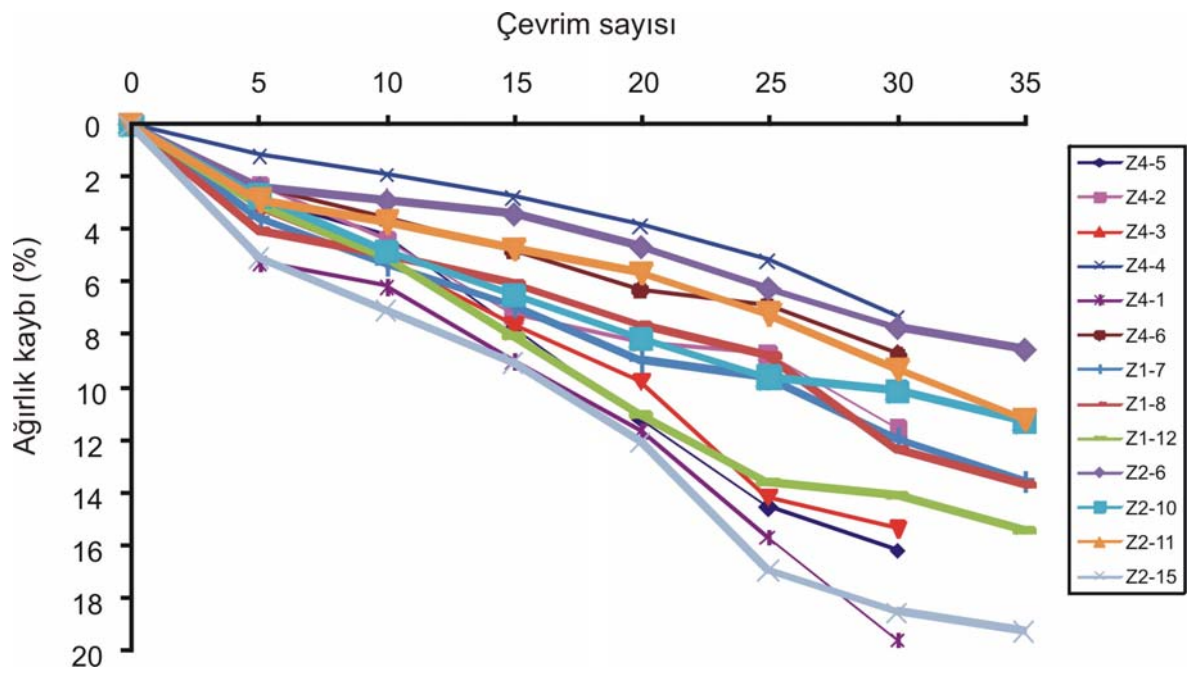
belirlenebilmesi amacıyla ilk dört çevrim sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 4. çevrim sonunda σ_c değerinde % 36.3 gibi önemli düzeyde bir azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 6.11). Topal (1995), Zelve tufüne oranla daha dayanıklı olan Kavak tufünde gerçekleştirdiği ıslanma – kuruma deneylerinin 10, 34, 44 ve 52. çevrimleri sonrasında σ_c değerindeki azalmanın belirlenmesi amacıyla, tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapmıştır. Bu tez çalışmasında ise, 4. çevrimden sonraki ıslanma – kuruma çevrimleri sonunda deney örneklerinin tek eksenli sıkışma deneylerinde kullanılabilecek karot özelliklerini büyük ölçüde yitirmeleri nedeniyle (bkz. Şekil 6.9) dördten sonraki çevrimlerin ardından tek eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirilememiştir.

Donma çözülme deneyleri için de ıslanma – kuruma deneylerindekiyle aynı yöntem uygulanmış, ancak örneklerin 12 saat süre ile $-18^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'lik derin dondurucuda donmaları sağlanmış ve her çevrim sonunda ağırlık kayıpları belirlenmiştir (Şekil 6.12). Elde edilen sonuçlara göre, özellikle 20. çevrim sonunda örneklerde ağırlık kaybının, bir başka deyişle dağılmanın arttığı gözlenmiştir. 35. çevrim sonunda ise, örneklerde %8.5 ile %19.2 arasında değişen bir ağırlık kaybının meydana geldiği belirlenmiştir. Örneklerin 5, 10, 15 ve 20. çevrimler sonundaki görünüşleri de Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Donma-çözülme süreçlerinin de σ_c üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla her 5. çevrim sonunda yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin sonuçları incelendiğinde, 30. çevrim sonunda σ_c değerlerinde %39.8 oranında bir azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 6.14).

Aydan et al. (2007a, 2008b), Kapadokya tüfleri üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalara göre, donma-çözülme çevrim sayısına bağlı olarak tufün mekanik özelliklerinin değiştiğini ve bu değişimin kuru koşullardaki değişime göre daha fazla olduğunu belirtmektedirler. Araştırmacılar, suya doymuş örneklerde donma süreci boyunca boşluk suyunun donmasının oluşturduğu hacimsel genişlemenin ve boşluk çevresindeki kaya malzemesinin büzülmesinin kaya örneğinde örselenmeye yol açtığını belirtmektedirler. Bununla birlikte, söz konusu tüfler tamamen doymuş hale gelmedikleri için ortamda ıslanma – kuruma süreçlerinin



Şekil 6.11. Zelve tufü örneklerinin ıslanma - kuruma çevrimleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımındaki azalış.



Şekil 6.12. Zelve tüfü örneklerinin donma - çözülme çevrimleri sonunda ağırlık kaybının değişimi.

5. çevrim sonrası



10. çevrim sonrası



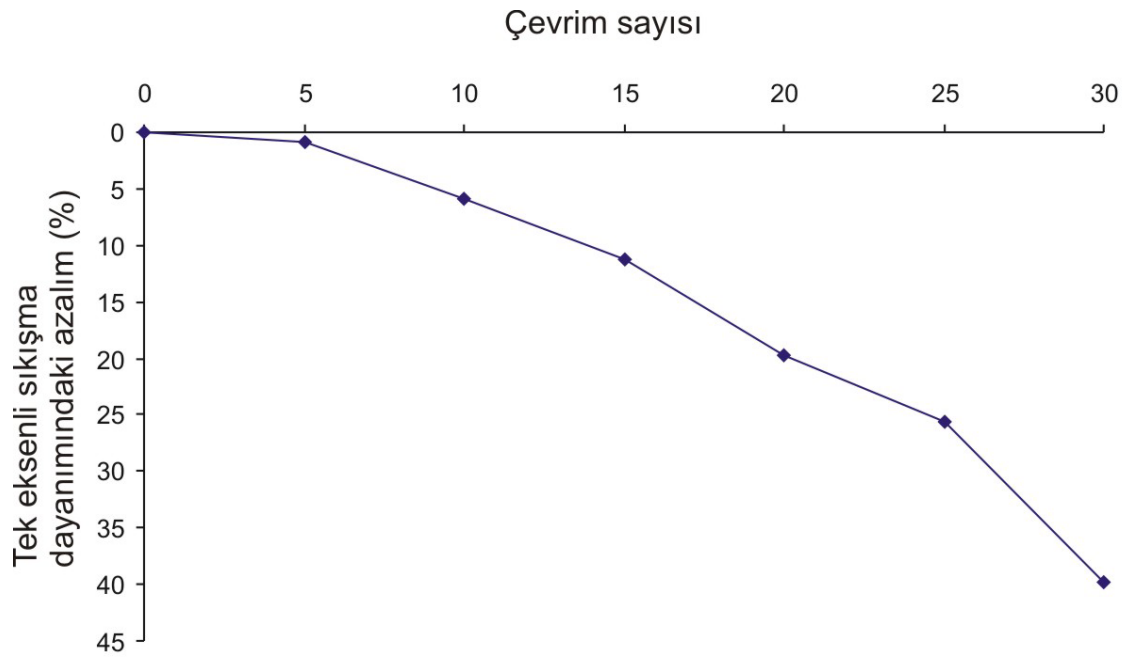
15. çevrim sonrası



20. çevrim sonrası



Şekil 6.13. Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeylenen Zelve tufünün donma-çözülme deneylerinin 5, 10, 15 ve 20. çevrimler sonrasındaki durumları.



Şekil 6.14. Zelve tûfü örneklerinin donma - çözülme çevrimleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımındaki azalış.

etkisi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada yapılan her iki deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında da, Zelve Vadisi'nde yüzeyleyen tûfün dağılmasında ve dayanımının azalmasında ıslanma – kuruma süreçlerinin donma – çözülme süreçlerine göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

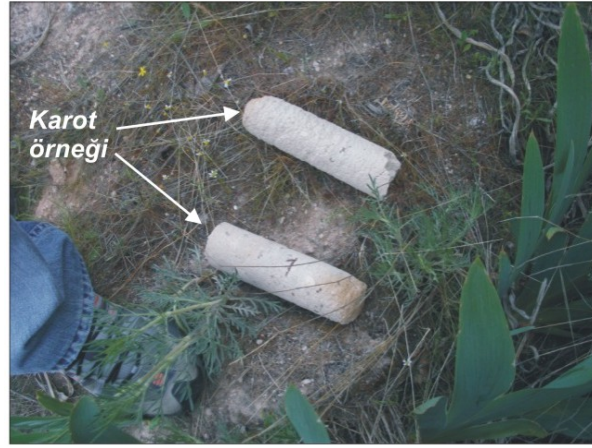
ASTM (1994) standartlarına göre izlenen yöntemin doğası gereği ıslanma – kuruma deneylerinde hazırlanan karot örnekleri, 24 saat süreyle 15 – 20 °C sıcaklıktaki saf suda bekletilmekte ve daha sonra 105 °C'lik fırında kurutulmaktadır. Donma – çözülme deneylerinde ise, ek olarak örneklerin 12 saat süreyle $-18^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'lik derin dondurucuda donmaları sağlanmaktadır. Bu süreçler, deneyler sırasında özellikle Zelve tûfû gibi dağılmaya karşı oldukça duyarlı kayaların dağılmasını doğada gerçekleşen ıslanma – kuruma ve donma – çözülme süreçlerine göre oldukça önemli miktarlarda hızlandırmaktadır. Bu nedenle, laboratuvar ortamında yapılan deneylere ek olarak, söz konusu süreçlerin Zelve Vadisi'nde yüzeyleyen tûfün davranışı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, Şubat 2010'da iki tanesi Zelve Açık Hava Müzesi içinde kurulmuş olan ve halen kayıt alan meteoroloji istasyonunun üzerine, iki tanesi de vadi içinde aşınma ölçümlerinin alındığı blok üzerine delikli ve dolayısıyla içerisinde suyun birikmesini önleyecek şekilde plastik kafes içerisine boy, çap ve ağırlıkları önceden belirlenmiş olan toplam dört adet karot örneği yerleştirilmiştir (Şekil 6.15).

Mayıs 2010'da alınan ilk ölçümlere göre, karot örneklerinde 2.5 aylık dönem içinde belirgin bir ağırlık kaybı belirlenememiştir. Söz konusu zaman aralığının yağışlı bir dönemi içermesine rağmen belirgin bir ağırlık kaybı oluşmamasının nedeninin, kafesler içerisine yerleştirilmiş karot örneklerinin sadece üzerlerine gelen yağıştan etkilenmesi, dolayısıyla zeminin kurumması sırasında oluşan nemden etkilenmemesi olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle, Şekil 6.14'de yerleri gösterilen karotlardan birer tanesi ziyaretçilerin girmesine izin verilmeyen, dolayısıyla herhangi bir insan etkisine maruz kalmayacağı düşünülen ve önceki yerlerine birkaç metre uzaklıkta kafes kullanılmaksızın tekrar bırakılmış (Şekil 6.16) ve geriye kalan birer karot ise kafeslere yerleştirilmiştir. Temmuz 2011'de yapılan saha çalışmasında kafes kullanılmaksızın bırakılan karotlar yerlerinde bulunamamış ve bu nedenle ağırlık ölçümü yapılamadığından ağırlık kaybı belirlenememiştir. Bununla birlikte,



Şekil 6.15. Atmosferik etkilerin Zelve tüfü üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla Zelve Açık Hava Müzesi'nde (a) meteoroloji istasyonunun üzerine ve (b) vadi tabanında yer alan blok üzerine yerleştirilmiş plastik kafesler içindeki karotlar.

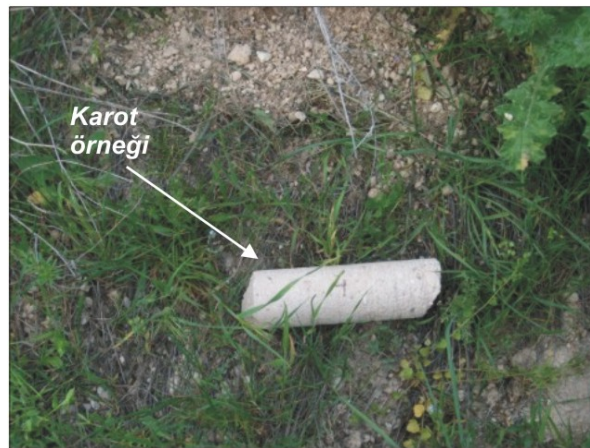
(a)



(b)



(c)



Şekil 6.16. Islanma - kuruma ve donma - çözülme süreçlerinin Zelve tüfü üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla Zelve Açık Hava Müzesi içinde (a) meteoroloji istasyonu ve (b) ile (c) vadi içinde çivi ölçümü alınan bloğun yakınına yerleştirilen aynı karot örnekleri.

kafeslere yerleştirilen karotlarda yapılan gözlemler ve ölçümler sonucunda, söz konusu karotlarda belirgin miktarda malzeme kaybı gerçekteştiği (Şekil 6.17) ve yaklaşık 1.5 yıllık bir süre sonunda toplam ağırlık kaybının % 42'ye ulaştığı belirlenmiştir.

6.5. Süreksizliklerin Makaslama Dayanımı

Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi girişindeki yamaçta meydana gelmiş olan kama tipi duraysızlığın geriye dönük analizinde kullanılmak üzere, süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi amacıyla, Schmidt çekici deneylerinin sonuçları ile süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük derecesini dikkate alan ve Barton (1973) tarafından önerilmiş görgül yenilme ölçütünden yararlanılmıştır. Doruk makaslama dayanımını belirleyen bu ölçüt:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (6.1)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada,

τ : Makaslama dayanımı (MPa)

JRC: Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı

JCS: Süreksizlik yüzeyinin dayanımı (MPa)

σ_n : Normal gerilme (MPa)

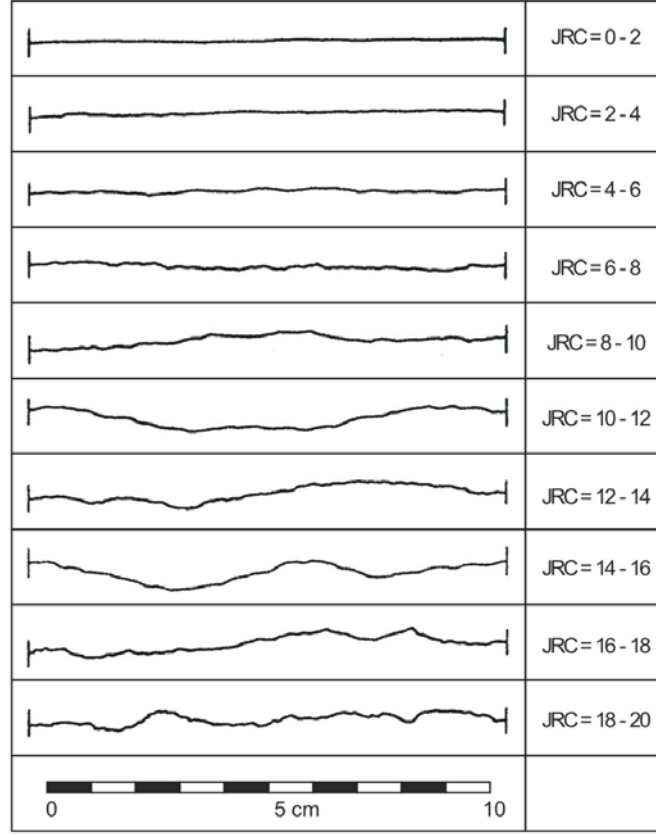
ϕ_b : Temel sürtünme açısı (derece)'dir.

JRC parametresi, Şekil 6.18a'da verilen pürüzlülük profillerinin süreksizlik yüzeyiyle karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Buna göre, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük katsayıları çoğunlukla 6-12 arasındaki JRC profilleriyle uyum göstermekte olup, hesaplamalarda JRC=8 alınmıştır. JCS abağındaki en düşük birim hacim ağırlık değerü tüflerin birim hacim ağırlık değeründen yüksektir. Bu sınırlama nedeniyle abaktaki en düşük birim hacim ağırlık değerü kullanılarak, hesaplamalarda abaktan belirlenen JCS=18 değerü dikkate alınmıştır. Temel sürtünme açısı, düz ve pürüzsüz bir yüzeyin içsel sürtünme açısı olup, bu parametre tuf örneğinden düz yüzeyler elde edilecek şekilde kesilmiş örnekler üzerinde yapılan makaslama deneyleriyle 14^0 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.18b).

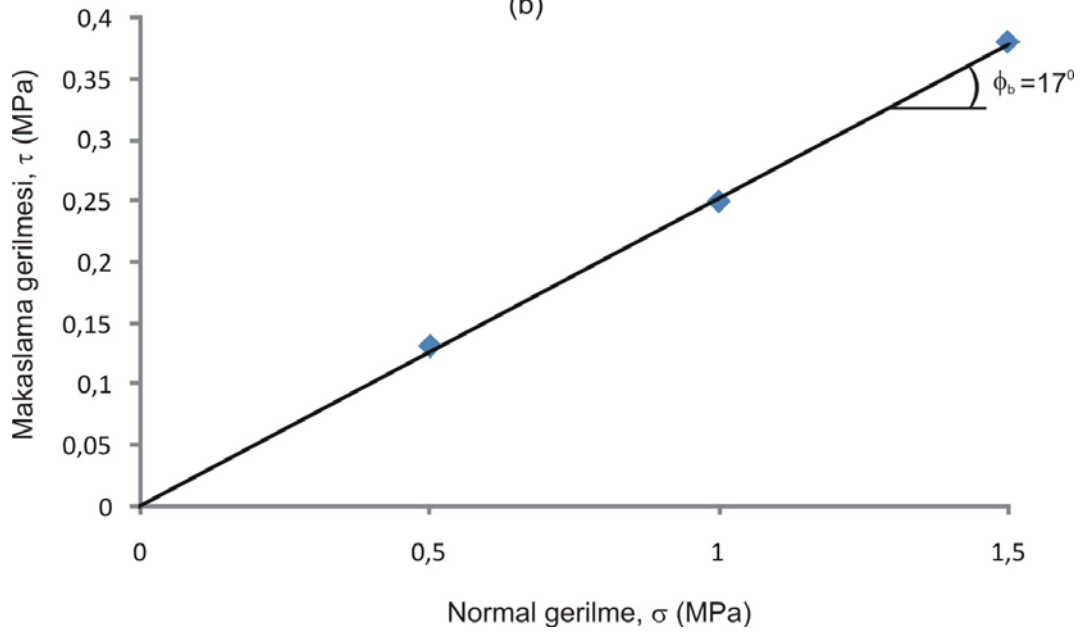


Şekil 6.17. Şekil 15a'da görülen ve atmosferik koşullardan etkilenmiş örneğin 21.07.2011 tarihindeki durumu.

(a)



(b)

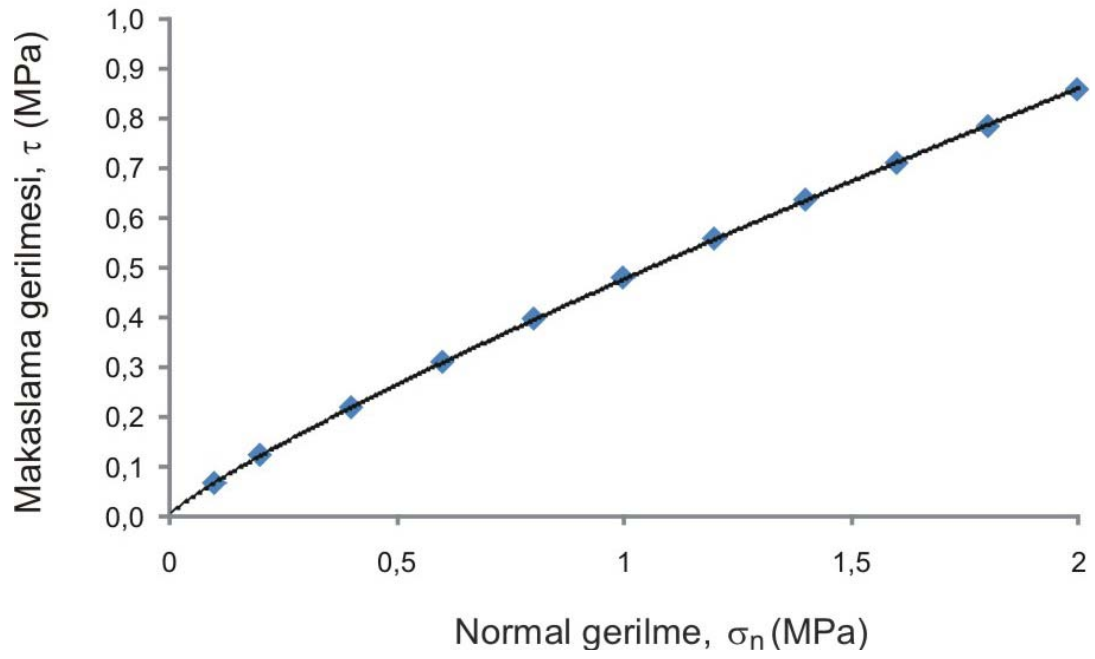


Şekil 6.18. (a) Süreksizlik yüzeyi pürüzlülük katsayısı (JRC) profilleri (ISRM, 2007), temel sürtünme açısı (ϕ_b)'nın tayini amacıyla yapılan makaslama deneylerine ait yenilme zarfı.

Çalışma alanında etkiyen normal gerilme aralığı da örtü kayasının kalınlığındaki değişim ve tüflerin ortalama birim hacim ağırlığı esas alınarak hesaplanmıştır. Bu değişim aralığı dikkate alınarak ve JRC, JCS ve ϕ_b değerleri Eşitlik 6.1'de yerine konularak elde edilen $\sigma_n - \tau$ çiftleri ile eğrisel yenilme zarfı elde edilmiştir (Şekil 6.19).

6.6. Kapadokya Bölgesi'ndeki tüflerle ilgili önceki çalışmalara ait deney sonuçlarının karşılaştırılması

Kapadokya Bölge'sinde yapılan ve 3. Bölümde ayrıntılarıyla sunulan jeo-mühendislik amaçlı önceki çalışmalar arasında Zelve tufünün yanı sıra, diğer tuf birimlerinin de fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlendiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu bölümde Zelve tufü ve Kapadokya Bölgesi'nde yüzeyleyen diğer tüfler üzerinde yapılmış önceki çalışmaların sonuçları ile tez çalışması sırasında elde edilen sonuçlar derlenerek Çizelge 6.5'de sunulmuştur. Söz konusu çizelge esas alınarak; dayanım, deformasyon ve indeks özellikleri açısından Zelve tufü Kapadokya Bölgesi'nde yüzeyleyen diğer tüflerle karşılaştırıldığında, bu tufün diğerlerine göre göreceli olarak daha zayıf olduğu söylenebilir. Söz konusu çizelgede sadece Zelve tufüne ait veriler dikkate alındığında, bu tufün tez çalışmasında belirlenen mühendislik özelliklerine ait değişim aralıklarının bu tufle ilgili önceki çalışmalarda belirlenen değerlerle benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 6.19. Zelve tufündeki süreksizlik yüzeyleri için Barton yenilme ölçütüyle belirlenen yenilme zarfı.

Çizelge 6.5. Kapadokya Bölgesi'nde daha önce yapılmış çalışmalarda değişik tuf birimleri için belirlenmiş fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerin karşılaştırılması.

	(K) Erguvanlı and Yüzer (1977)	(K) Erdoğan (1986)	(K) ODTÜ (1987)	(K) De Witte et al. (1988)	(K) Erguvanlı vd. (1989)	(K) Topal and Doyuran (1997)	Binal (1996)		Aydan and Ulusay (2003)			(Z) Aydan vd. (2007a)	(K) Ergüler (2009)	(Z) Tuncay (2009)	(Z) Bu çalışma
							Kızılkaya T.	Selime T.	(K) Ürgüp	(Z) Avanos	(G) Derinkuyu				
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	11.50					13.60	18.60	14.40	11.2- 17.3	10.9- 15.1	13.8-14.3	13.6	13.6	13.3	11.9- 14.6
Doğun birim hacim ağırlık (kN/m ³)	-					17.75	20.50	17.30	15.6- 19.0	13.4- 16.0	14.8-16.0	-	-	15.8	14.3- 19.3
Görünür porozite (%)	28	28.76	32.72	42	28.76	38.3	10.10	26.60	28.0- 37.6	28.8- 41.6	14.1-28.5	-	-	26	19.5- 41.1
Atmosferik basınç altında ağırlıkça su emme (%)	25	27.50	-	-	27.50	21.6	10.10	18.80	-	-	-	-	-	-	13.7- 33.2
Tek eksenli sıkışma dayanımı (kuru- tabakalanmaya dik yönde) (MPa)	5.50	6.50	6.07	-	6.50	6.53	48.60	5.40	2.5- 10.4	1.0-7.0	2.5-8.0	5.40	8.12	4.2	3.85- 6.32
Tek eksenli sıkışma dayanımı (doğun- tabakalanmaya dik yönde) (MPa)	-	3.0	-	-	3.0	2.16	-	-	-	-	-	-	1.26	0.83	0.67- 0.92
Çekme dayanımı (kuru) (MPa)	0.60	0.70	0.83	-	0.70	0.69	3.70	-	0.3- 0.46	0.26- 0.46	-	0.35	0.91	0.55	0.52- 0.97

Çizelge 6.5 (devam ediyor).

Çekme dayanımı (doğgun) (MPa)													0.01	0.07	0.11-0.24
Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi $I_{d2} - I_{d4}$ (%)	-	-	-	-	-	84	98.20	85	53.5	55.1	-	-	29 - 19	-	41.7-19.9
Elastisite modülü – tabakalanmaya dik yönde, E (GPa)	1.40	2.40	-	-	2.40	3.08	-	3.80	0.5-4.0	0.5-2.2	1.5-3.6	0.85	-	-	0.64-0.96
Poisson oranı - tabakalanmaya dik yönde, ν	-	-	-	-	-	0.2	-	0.33	0.24-0.31	0.27-0.31	-	0.12	-	-	-
Elastisite modülü – tabakalanmaya paralel yönde, E (GPa)	-	-	-	-	-	3.26	-	-	2.0-2.7	0.5-2.0	3.7	-	1.11	-	-
Poisson oranı - tabakalanmaya paralel yönde, ν	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Boşluk oranı (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	38.9-43.7	40.4-50.8	-	-	28.7	-	24-70

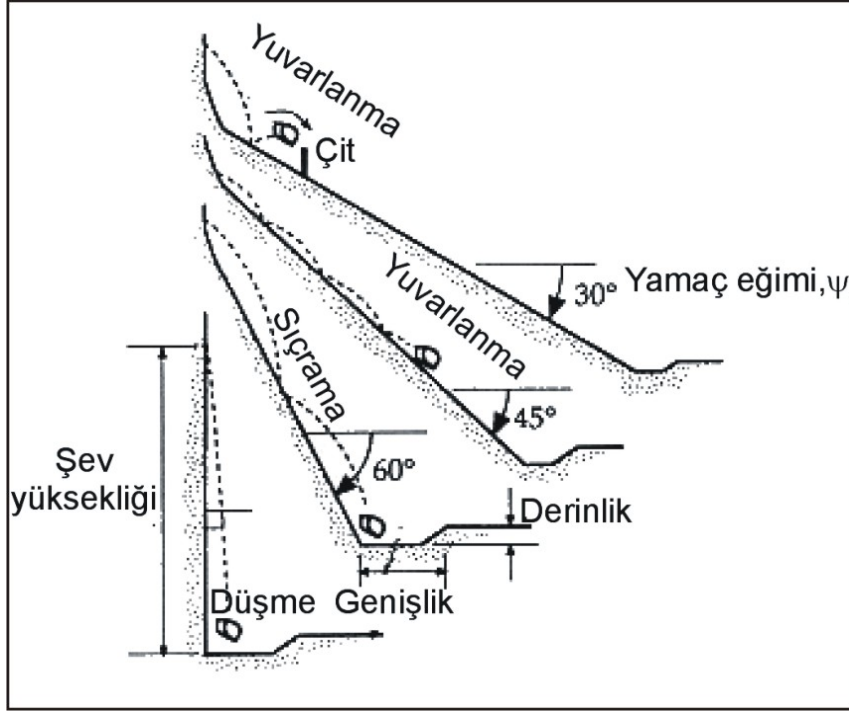
(K) Kavak tütü, (G) Gördeles tütü, (Z) Zelve tütü (gri fonla gösterilmiştir)

7.DURAYSIZLIKLARIN SAYISAL ÇÖZÜMLEME TEKNİKLERİYLE İNCELENMESİ

Kaya kütlelerinde süreksizlik takımları tarafından sınırlanan kaya bloklarının, dik bir yamaçtan yerçekimi etkisi altında serbest düşmesiyle gelişen duraysızlıklar çok hızlı bir hareket türü olup, ciddi can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Kaya düşmeleri; eklemlerin, bozunmanın, donma-çözülmenin, suyun, deprem ve ağaç köklerinin etkisiyle oluşabilmektedir (Chen et al., 1994; Wasowski and Gaudio, 2000; Marzorati et al., 2002; Dorren, 2003).

Kaya düşmeleri, yamacın eğimine göre; (a) serbest düşme, (b) yuvarlanma ve (c) sıçrama türünde olabilmektedir (Şekil 7.1). Bu duraysızlık türü, yamaç eğiminin 45°'den az olduğu durumlarda yuvarlanma, 45° ile 70° arasında olduğu durumlarda sıçrama ve 70°'den büyük olduğu durumlarda ise serbest düşme şeklinde gelişir (Ritchie, 1963; Dorren, 2003'den). Topoğrafik profil boyunca yamaç eğimindeki değişimler nedeniyle, herhangi bir profil boyunca kaya düşmesi türlerinden biri, ikisi veya üçü birlikte gözlenebilir. Bunun yanı sıra; kayacın ilk düşme hızı, düşen kaya bloğunun ağırlığı ve şekli ile yamacı oluşturan kaya türünün özelliği kaya düşmesini önemli ölçüde denetleyen başlıca faktörlerdir (Giani, 1992; Azzoni et al., 1995; Chau et al., 1998; Dorren, 2003).

İnceleme alanında gözlenen duraysızlıklar literatürde yuvarlanma ve sıçrama şeklinde tanımlanmış olan sınıflamaya girmemekte olup, yapılan gözlemler kaya şevlerinde meydana gelen duraysızlıkların kaya düşmesinden çok kaya kopması şeklinde meydana geldiğini işaret etmektedir. Önceki bölümlerde de değinildiği üzere, Zelve Vadisi'ndeki duraysızlıkların; (a) süreksizlikler boyunca bozunmanın etkin bir rol oynaması, (b) ıslanma-kuruma ve donma-çözülme süreçlerinin kaya malzemesinin dayanımını belirgin şekilde azaltmasına ve parçalanmasına neden olması, (c) kaya malzemesinde insanlar tarafından oluşturulan açıklıklar nedeniyle gerilme ortamının değişmesine bağlı olarak gelişen ikincil süreksizliklerin kaya kütlelerinin davranışını olumsuz yönde etkilemesi gibi nedenlerle geliştikleri düşünülmektedir. Bu nedenle söz konusu duraysızlıklarla ilgili çözümler; (a) geriye dönük çözümler, (b) duraysızlık olasılığı bulunan mevcut



Şekil 7.1. Yamaç eğimine göre gelişen farklı kaya düşmesi türleri (Ritchie, 1963; Dorren, 2003'den).

yamaç/kayadamların sayısal çözümlenmeleri olmak üzere farklı aşamalarda yapılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

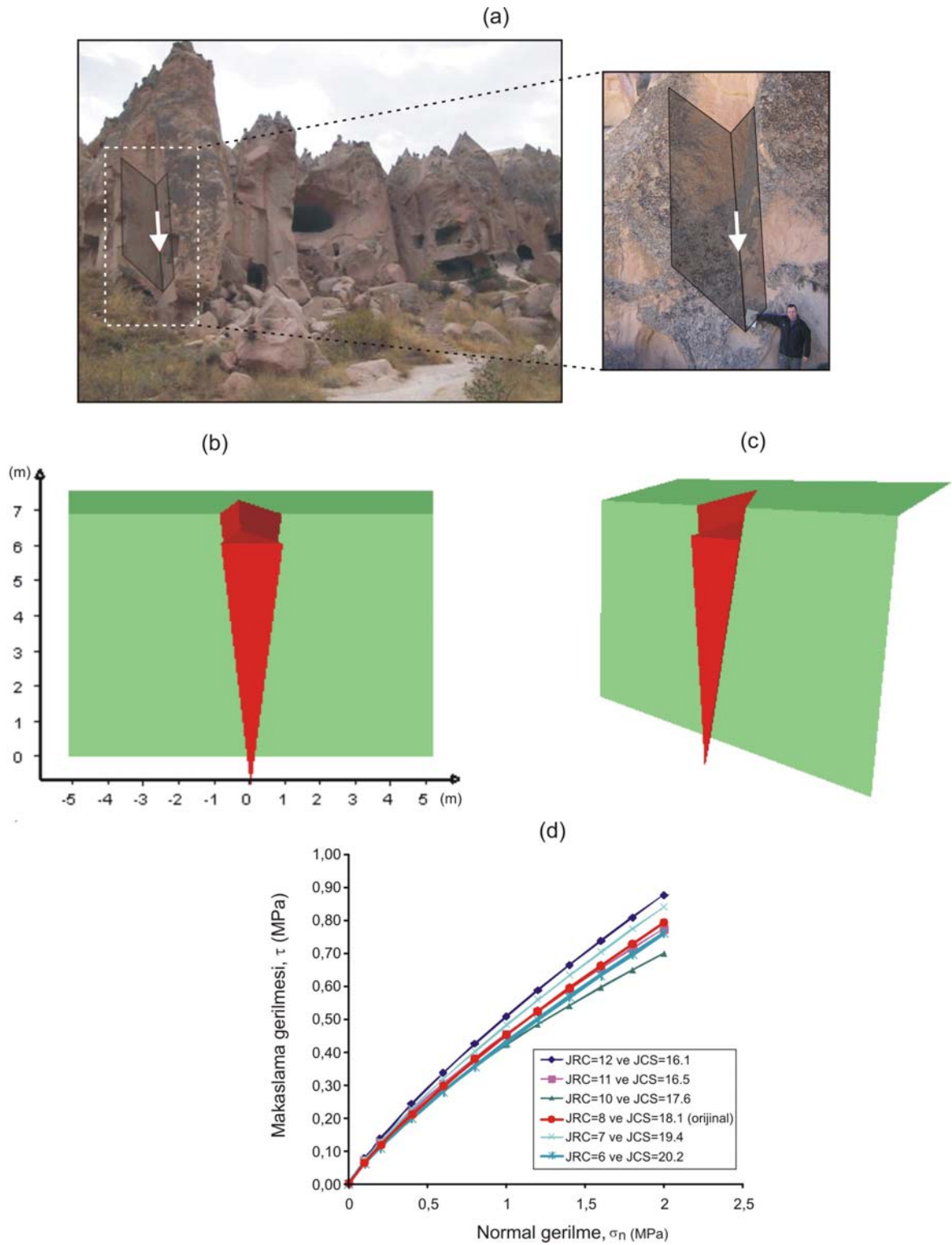
7.1 Geriye Dönük Çözümlenmeler

Süreksizliklerin yenilme anındaki makaslama dayanımının belirlenmesi amacıyla, Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi'nin girişindeki yamaçta meydana gelmiş olan kama tipi duraysızlık (Şekil 7.2a) esas alınarak, bu kaymanın geriye dönük çözümlenmesi yapılmıştır. Çözümlenmeler; kaya yamaçlarında iki süreksizlik ve yamaç yüzeyinin kesişmesiyle oluşan kama tipi kaymaların çözümlenmelerinde kullanılan ve Barton (1973) tarafından önerilmiş görgül yenilme ölçütünden yararlanılmasına olanak sağlayan SWEDGE 5.0 (Rocscience, 2009) programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 7.2b ve 7.2c).

Çözümlenmelerde laboratuvar deneyleriyle belirlenen temel sürtünme açısı ($\phi_b=14^0$) sabit tutularak, limit denge koşulunu sağlayan ($F=1$) "JRC – JCS çiftleri" belirlenmiştir. Çözümlenmeler sonucunda elde edilen "JRC – JCS çiftleri"nin Eşitlik 6.1'de yerine konulmasıyla beş farklı çift için eğrisel yenilme zarfları çizilmiştir. 6. Bölüm'de belirtildiği şekliyle, JRC ve JCS değerlerinin ortalaması kullanılarak elde edilen eğrisel yenilme zarfı (bkz. Şekil 6.18) ve geriye dönük analizler sonucunda çizilen yenilme zarfları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.2d'de sunulmuştur. Söz konusu grafik incelendiğinde, süreksizliklerin makaslama dayanımına ilişkin olarak kama türü yenilmenin gerçekleştiği yamaçta yapılan saha çalışmalarından elde edilen parametreler ile geriye dönük analizlerden elde edilen parametreler kullanılarak çizilen yenilme zarflarının, dolayısıyla bu parametrelerin son derece uyumlu olduğu görülmektedir.

7.2 Duraysızlık Olasılığı Bulunan Yamaçların Sayısal Çözümlenmeleri

Tez çalışmasının bu bölümünde, Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki mevcut yamaçların ve/veya yamaç topuklarının duraylılığı, bir başka deyişle yenilme durumunun belirlenmesi ve yenilme açısından genel bir süre kestiriminde bulunulması amacıyla sayısal çözümlenmeler yapılmıştır. Bununla birlikte, yamaç topuklarının aşınması nedeniyle ve yerçekimi etkisiyle bloğun kopması sonucu meydana gelen duraysızlıklar ile kaya kütesinin çekme dayanımı aşamalı olarak



Şekil 7.2. (a) Geriye dönük çözümü yapılan kama türü duraysızlıktan uzak ve yakın görünüşler, (b) ve (c) yamaç geometrisi ile (d) geriye dönük çözümler sonucunda elde edilen yenilme zarfları.

azaltılarak yapılan sayısal çözümler sonucunda yenilmenin gerçekleştiği an için geçerli olan çekme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla da sayısal çözümler yapılması gerekli görülmüştür. Ayrıca, su etkisine maruz kalmayan kaya yüzeylerinde de aşınma miktarının belirlenebilmesi amacıyla, vadide akan derenin aşındırdığı yamacın karşı yamacında ölçülen aşınmanın duraylılık üzerindeki etkisinin belirlenmesine yönelik olarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözümler, kaya ve toprak zeminlerde yeraltı ve/veya yüzey kazılarının iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini esas olarak modellenmesini sağlayan Phase2 (Rocscience, 2006) yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

7.2.1. Yamaç Duraylılığının Değerlendirilmesi

Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi'deki tüfler üzerindeki aşınma etkisinin belirlenebilmesi amacıyla; kaya yüzeylerine paslanmaz çiviler yerleştirilerek "aşınma hızı – zaman" ilişkisinin belirlenmesine yönelik olarak, çalışmanın başlangıcından bu yana yaklaşık 5 senedir ölçüm alınan vadideki dere yatağındaki dik bir yamacın (Şekil 7.3) sayısal çözümleri yapılmıştır.

Modelin oluşturulması aşamasında, 13495 blok ve 7003 düğüm noktası kullanılmış olup, açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla sonlu elemanlar ağı diğer bölgelere göre daha sık bir biçimde kurgulanmıştır (Şekil 7.4). Sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında; yatay yönde yer değiştirmenin önlenmesi, dolayısıyla modelin/sistemin bu yönde uygulanan gerilmelere (örneğin, yer çekimi, ek yük vb.) tepki verebilmesi amacıyla açıklık modelinin yan duvarları sabitlenmiş ve modelin tabanında hem düşey hem de yatay doğrultuda yer değiştirmeye izin verilmemiştir.

Çözümlerinde; kaya malzemesi (intact rock) için laboratuvar deneyleriyle belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri ile Sönmez and Ulusay (2002) tarafından önerilen niceliksel GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) abağından GSI=70 saptanarak, Çizelge 7.1'de verilen kaya kütleli parametreleri belirlenmiştir. Çözümler sırasında bu değerler esas

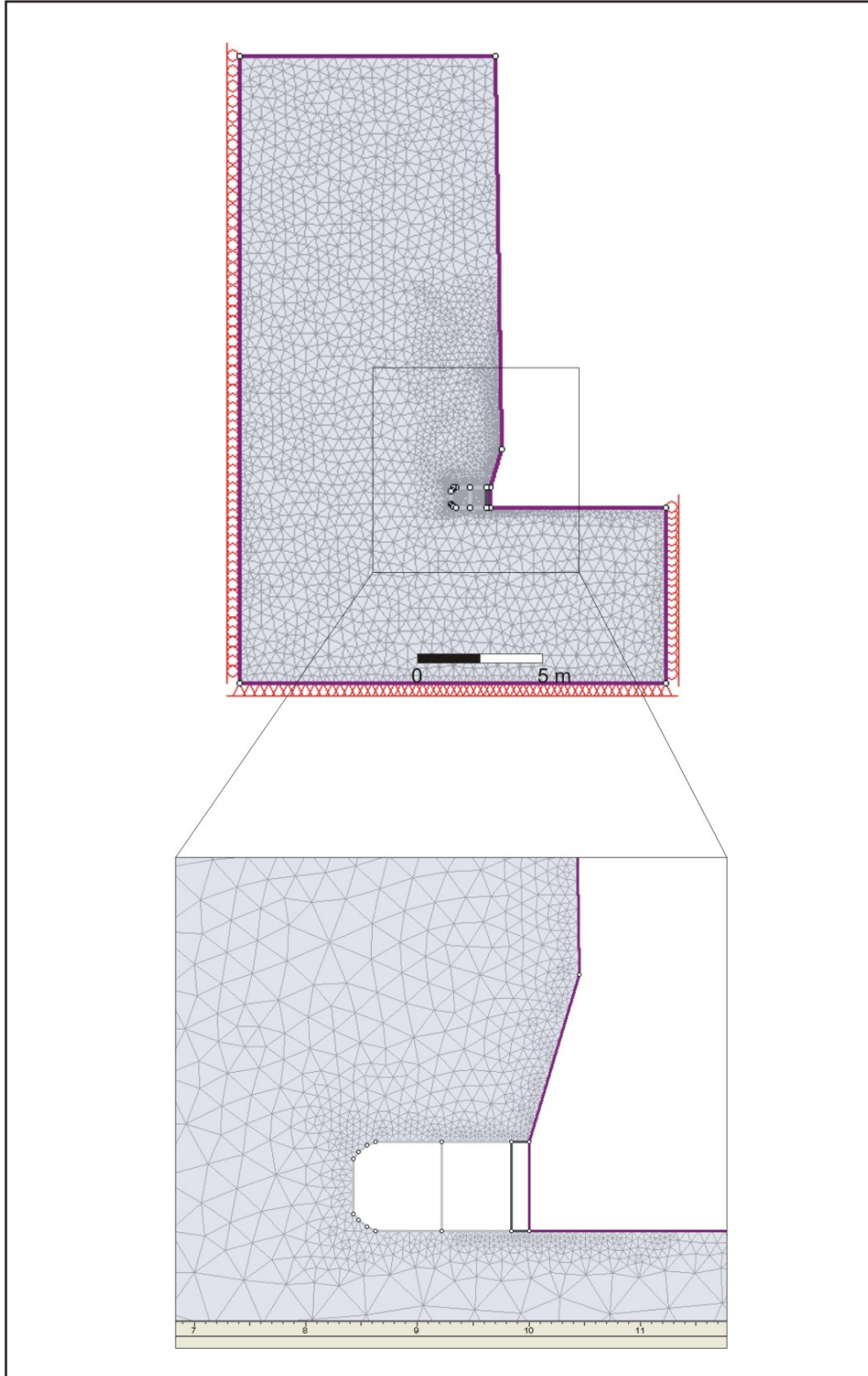
(a)



(b)



Şekil 7.3. Aşınma miktarı ölçümlerinin alındığı ve sayısal çözümü yapılan yamaçtan tipik görüntüler.



Şekil 7.4. Yamaçların duraylılığının değerlendirilmesi amacıyla yapılan sayısal çözümlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı ve yamaç geometrisi.

alınmış ve kaya malzemesinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uygun olarak davrandığı kabul edilmiştir.

Çizelge 7.1. Sayısal çözümlemede kaya kütlesi için belirlenen özellikler.

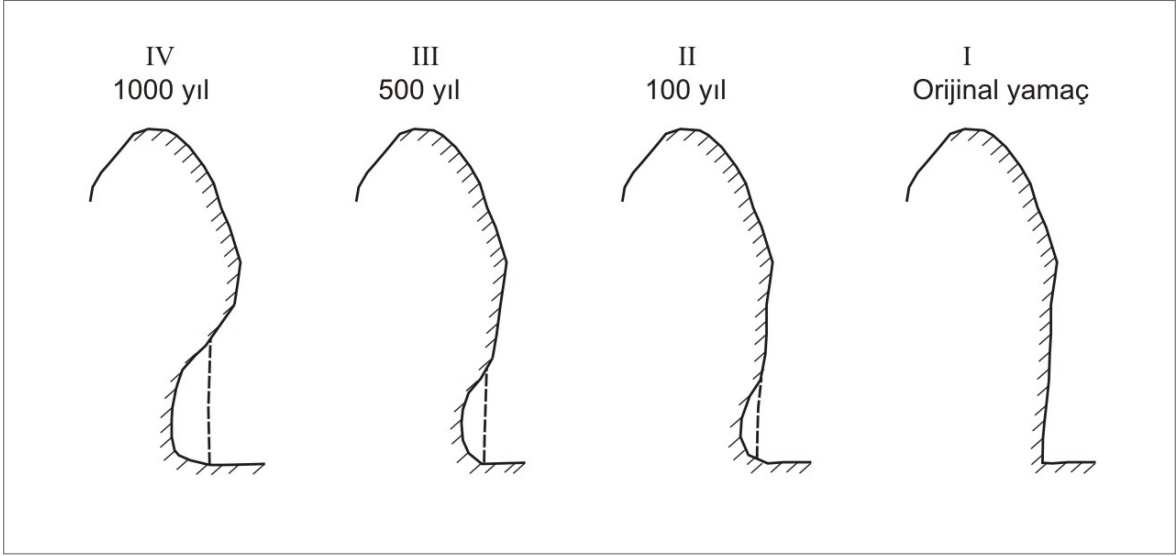
σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (MPa)	ν	γ (kN/m ³)
0.93	0.04	600.9	0.29	12.9

σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı; σ_t : Çekme dayanımı; E: Elastisite modülü; ν : Poisson oranı; γ : Birim hacim ağırlık.

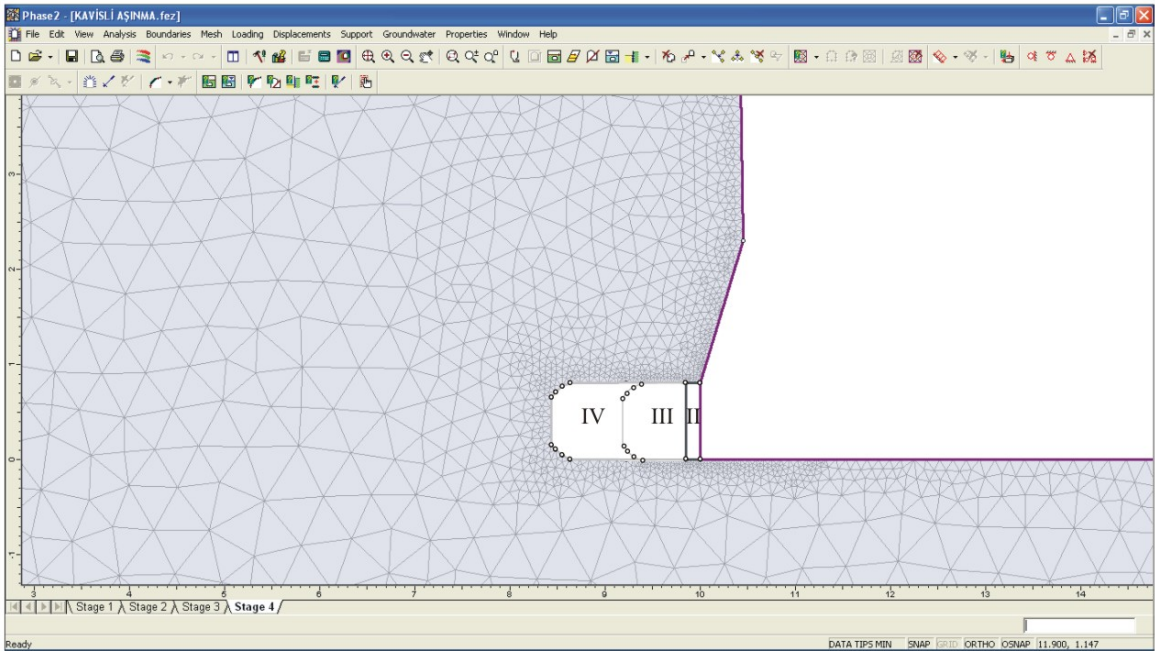
Çözümleme aşamasında, yamacın mevcut geometrisi başlangıç olarak kabul edilmiş ve günümüzden itibaren 100, 500 ve 1000 yıllık süreler boyunca meydana gelebilecek aşınma sonucunda oluşabilecek yamaç geometrileri 4 aşamada modellenmiştir (Şekil 7.5). Ortalama aşınma miktarının belirlenmesi amacıyla, 2006 (Mart) ile söz konusu çözümlerinin gerçekleştirildiği 2010 (Mayıs) dönemi arasında geçen 3.5 yıllık bir süre içinde tüfe takılmış çivilerden alınan ölçümler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve çivilerin yerleştirildiği kaya yüzeylerinde bu süre boyunca 0.90 mm ile 5.51 mm arasında değişen bir aşınmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, aşınmanın homojen şekilde meydana geldiği varsayımıyla, yıllık ortalama aşınma miktarının 0.25 mm ile 1.57 mm arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. En kötü senaryonun irdelenebilmesi amacıyla, çözümlerinde yukarıda belirtilen ortalama aşınma miktarı aralığının en yüksek değeri (1.57 mm) kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, 100 yıllık senaryo sonunda makaslama ve çekme gerilmeleri açısından önemli değişiklik beklenmemekle birlikte, 500 ve 1000 yıllık senaryolara göre, yamaç üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olacağı yenilme bölgesinin sırasıyla 50-60 cm ve 90-100 cm kalınlığında dilimler şeklinde gelişeceği belirlenmiştir (Şekil 7.6). Bununla birlikte, meydana gelecek toplam yer değiştirme miktarlarının, 500 ve 1000 yıllık senaryolar sonunda, 2.1 ile 2.5 mm arasında değişebileceği belirlenmiştir (Şekil 7.7a ve 7.7b). Ayrıca oluşan yer değiştirmeleri gösteren yer değiştirme vektörleri incelendiğinde (Şekil 7.7c), çekme

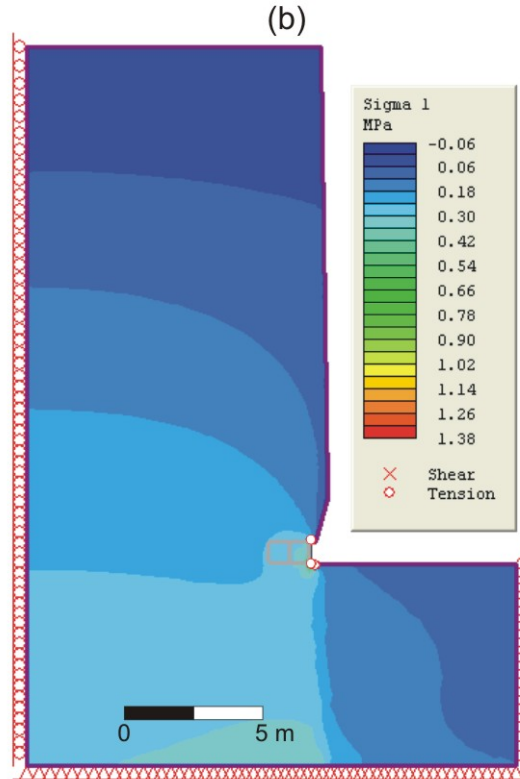
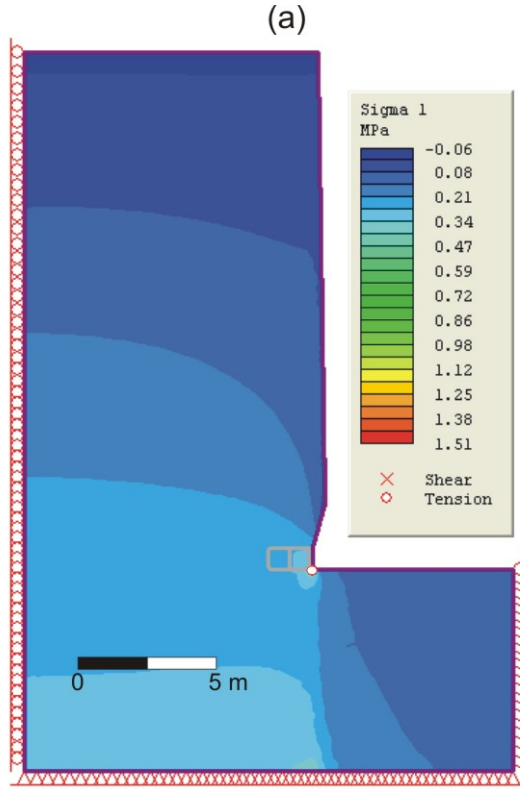
(a)



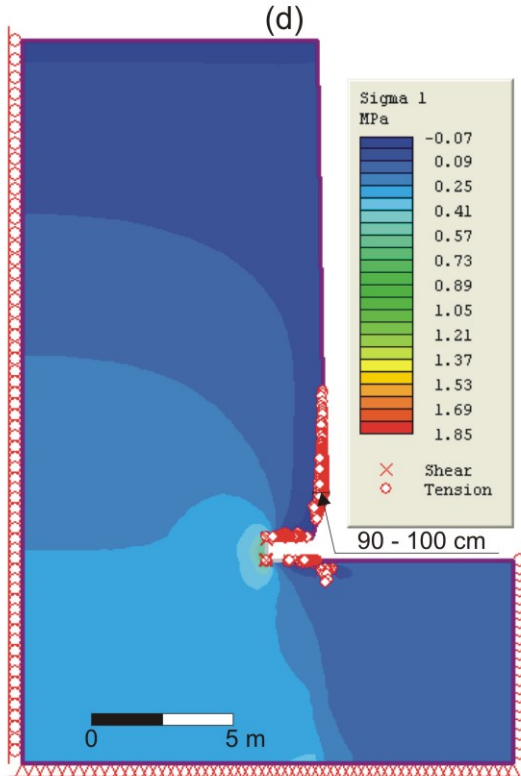
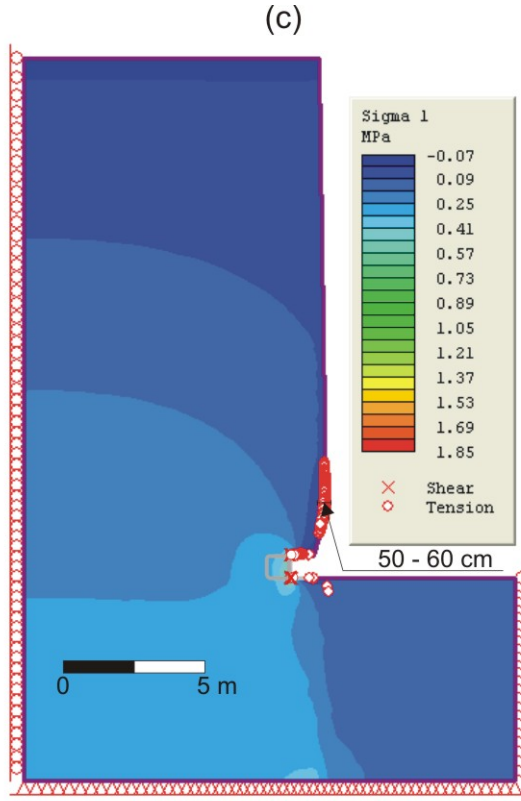
(b)



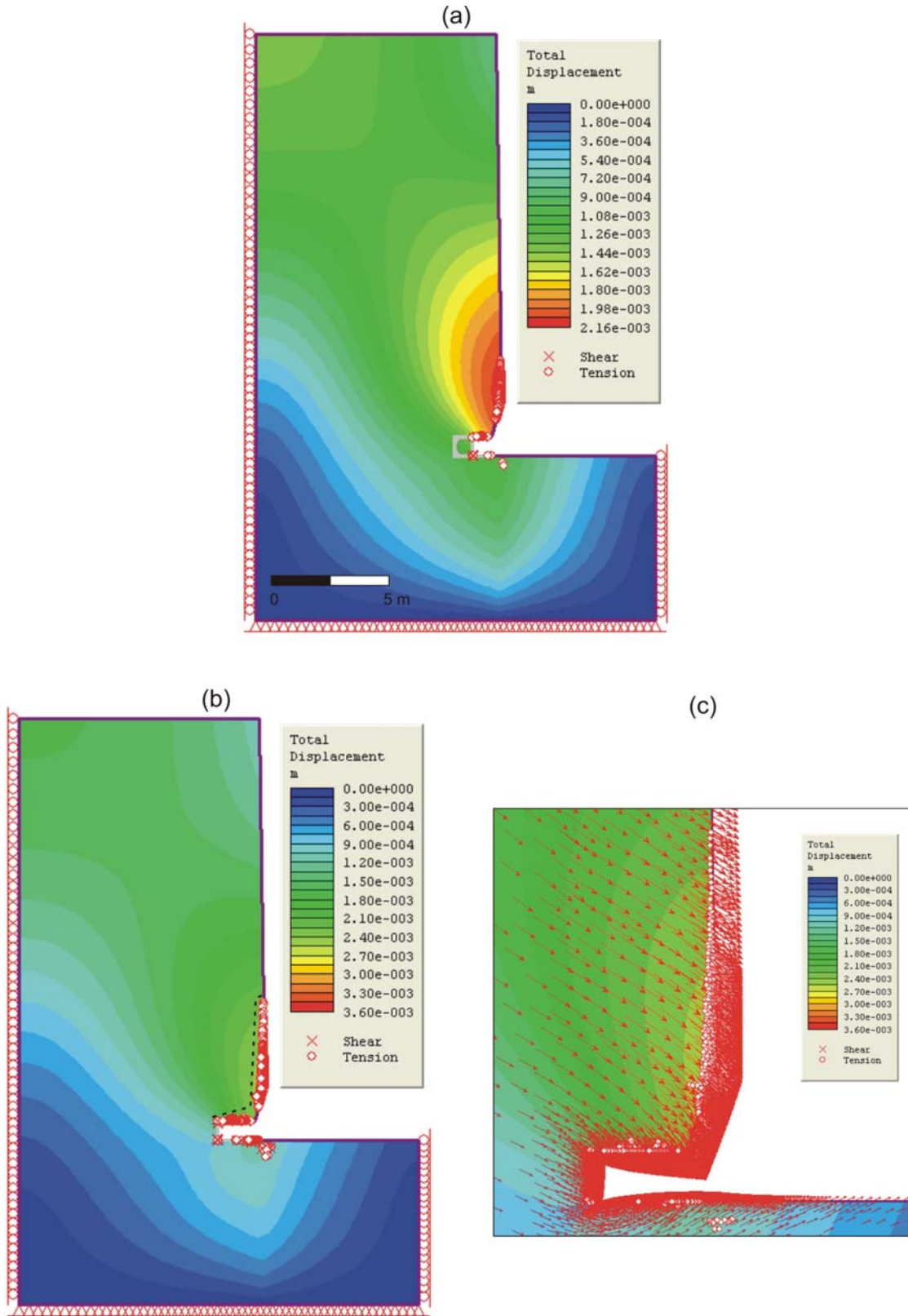
Şekil 7.5. Zelve 1. Vadi'de yamaçların ve yamaç topuklarının duraylılığının incelenmesi amacıyla (a) mevcut durum ile 100, 500 ve 1000 yıllık senaryoları gösteren temsili kesitler ve (b) sayısal çözümlenmesi yapılan yamaçta uygulanan senaryoya göre modelleme aşamaları (I. aşama, modelin orijinal halidir).



Şekil 7.6. Sayısal çözümler sonucunda yamaç üzerinde; (a) mevcut durum ile (b) 100 yıllık senaryo sonunda beklenen en büyük asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.



Şekil 7.6. (devam ediyor) Sayısal çözümlmeler sonucunda yamaç üzerinde; (c) 500 yıl ve (d) 1000 yıllık senaryolar sonunda beklenen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.



Şekil 7.7. Sayısal çözümler sonucunda, yamaç üzerinde (a) 500 yıl ve (b) 1000 yıllık senaryolar sonunda beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m) ve yenilme bölgeleri ile (c) 1000 yıl sonunda oluşan yer değiştirmeyi gösteren yer değiştirme vektörleri.

gerilmeleri nedeniyle oluşan dilimlerin (Şekil 7.7b'de kesik çizgiyle gösterilen) yamaç yüzeyinden kopacağı da görülmektedir. Şekil 7.7c'de ayrıca erozyona uğrayarak genişleyen boşluğun tabanında da bir miktar yerdeğiştirme gözükmektedir. Bu boşluğun iç yüzeyi yamaç yüzeyine çok yakın olduğundan, burada gelişen sıkışma gerilmeleri sıfıra yakın olup, bir miktarı da çakma gerilmelerine dönüşmektedir. Bu gerilmeler de, tütün çekme dayanımını aştığından, tabanda gerçekte beklenmeyen bir deformasyona işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, arazi çalışmalarında yapılan gözlemlerle de belirlenen ve kayanın açıklık duvarlarına paralel olarak gelişen büyük dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan çekme yenilmeleriyle de uyum göstermektedir.

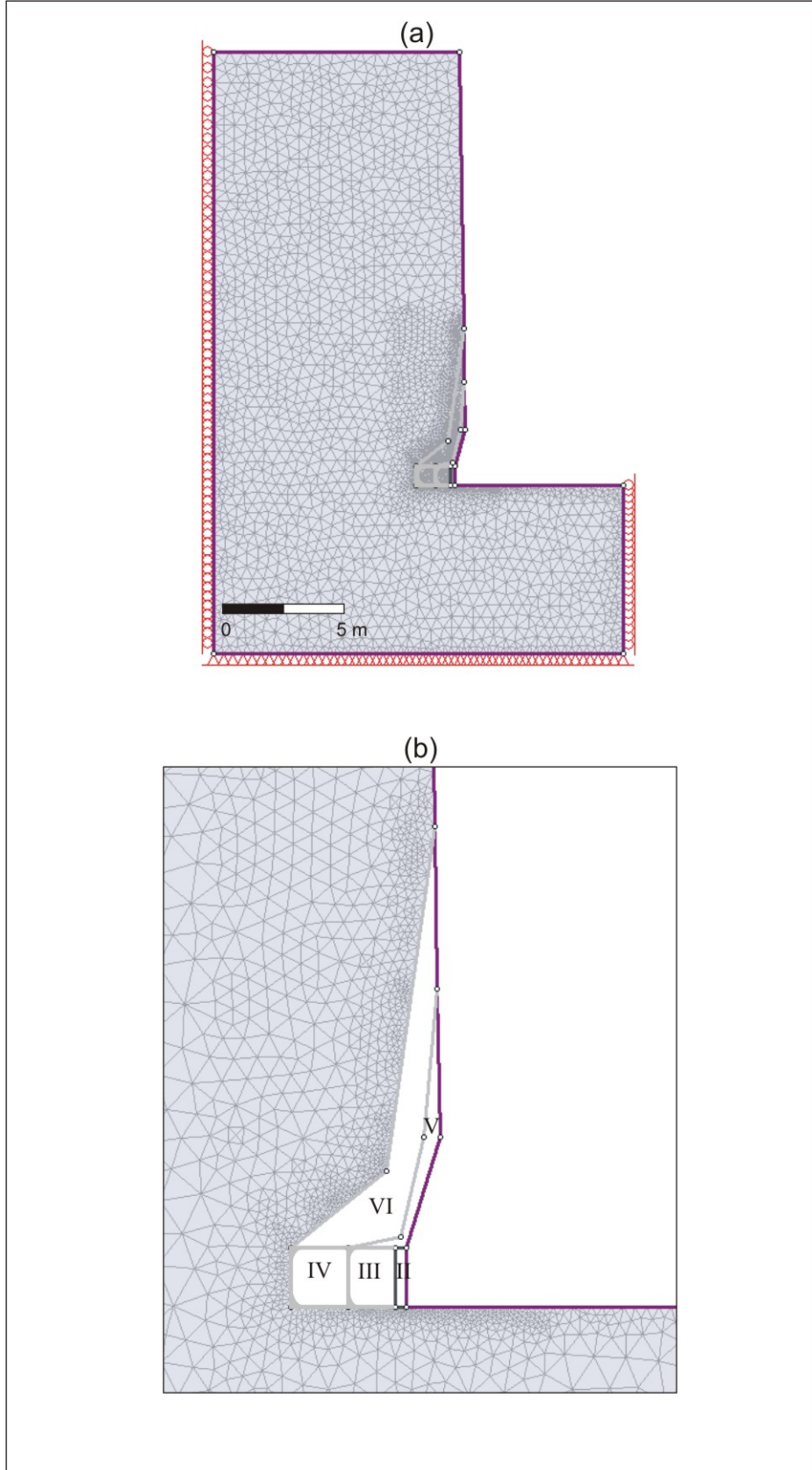
Çözümlemelerin ikinci aşamasında, yukarıda belirtilen çözümleme sonuçlarının ışığında, 3. aşamadan sonra (500 yıllık senaryo) çekme gerilmelerinin neden olduğu kalın dilimlenme şeklindeki yenilme bölgesinin yamaçtan koparak ayrılacağı dikkate alınarak, 4. aşama olarak bu bölge yamaçtan kaldırılmıştır. Daha sonra, 5. aşama olarak 1000 yıllık senaryo uygulanmış ve bu aşamada oluşan yenilme bölgesi de 6. aşama olarak yamaçtan kaldırılmış ve tekrar çözümleme yapılmıştır (Şekil 7.8).

Elde edilen sonuçlara göre, 3. ve 5. aşamalarda çekme gerilmelerinin neden olduğu dilimlenme şeklindeki yenilme bölgelerinin yamaçtan kaldırıldığı aşamalar olan 4. ve 6. aşamalarda en büyük asal gerilme değerlerinde bir azalma söz konusudur (Şekil 7.9a ve 7.9b). Bununla birlikte, söz konusu dilimlenmeler modelden kaldırıldıktan sonra yamaç yüzeyinde ya da daha geride çekme gerilmelerinden kaynaklanan herhangi bir yenilme bölgesinin oluşmadığı, diğer bir deyişle yenilmenin kaya kütlesi içerisinde daha geriye sıçramayacağı belirlenmiştir (Şekil 7.9c ve 7.9d).

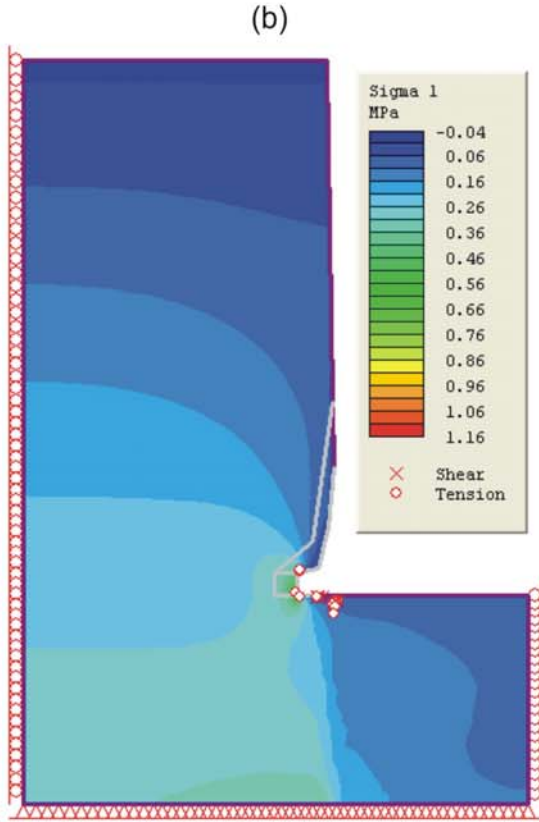
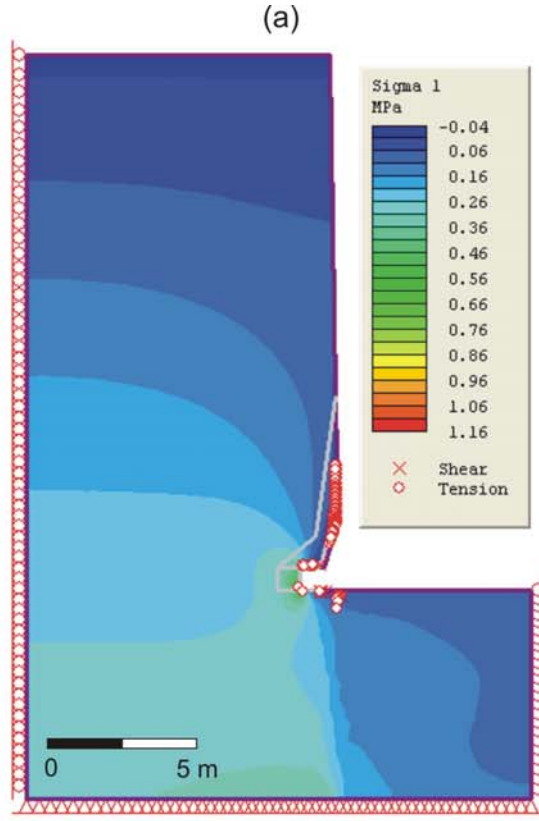
Elde edilen sonuçlar; aşınmanın homojen olduğu varsayımı göz önünde bulundurulduğunda, Zelve Açık Hava Müzesi'nde çözümlemesi yapılan yamaca benzer yamaçlarda ve/veya yamaç topuklarında aşınmadan kaynaklanabilecek yenilme türünün, günümüzde de gözlemlendiği şekliyle, tekrarlı bir şekilde yamaç yüzeyinde kalın dilimlerin oluşması ve bunların yamaç yüzeyinden kopmaları şeklinde gelişeceğine işaret etmektedir.

7.2.2. Kaya Kütlesinin Çekme Dayanımı Aşamalı Olarak Azaltılarak Yapılan Çözümlemeler

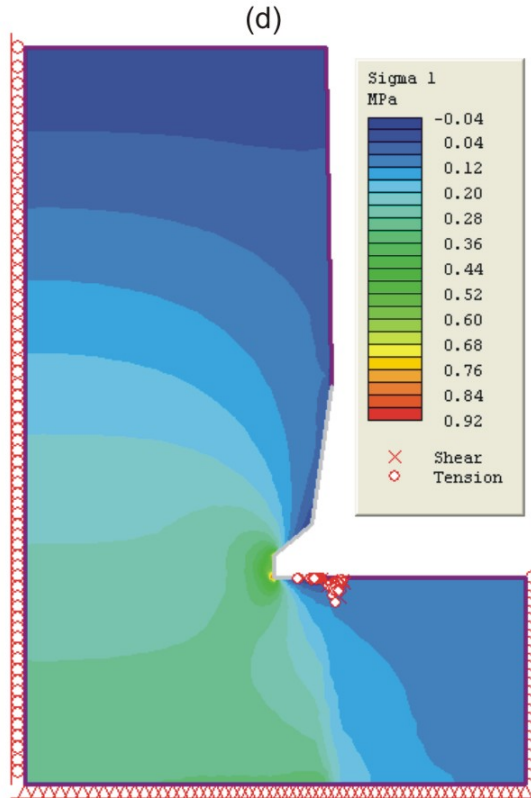
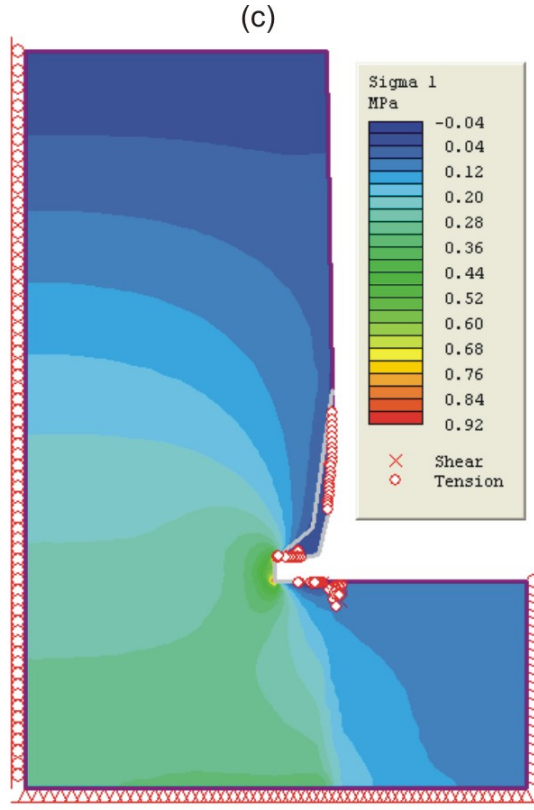
Yamaç topuklarının aşınması nedeniyle ve yerçekimi etkisiyle bloğun kopması sonucu meydana gelen duraysızlıklar için (Şekil 7.10a ve 7.10b), kaya kütlesinin çekme



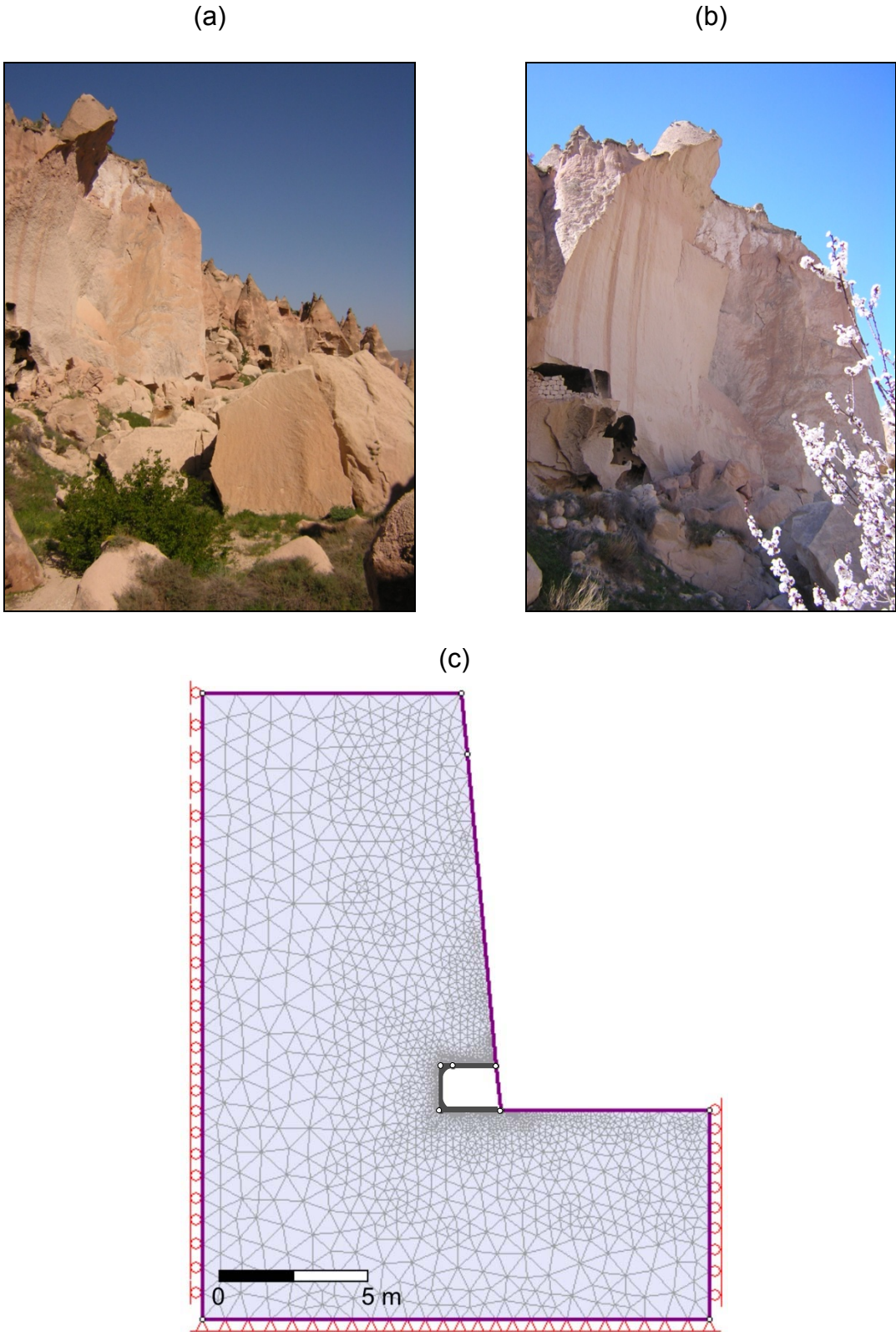
Şekil 7.8. Sayısal çözümlerlerde kullanılan (a) sonlu elemanlar ağı ve (b) çözümler aşamaları (I. aşama, modelin orjinal halidir).



Şekil 7.9. Sayısal çözümler sonucunda yamaç üzerinde; (a) 500 yıl sonunda çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilme bölgesi ve (b) bu yenilme bölgesi kaldırıldıktan sonra oluşan asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.



Şekil 7.9 (devam ediyor). Sayısal çözümler sonucunda yamaç üzerinde; (c) 1000 yıl sonunda çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilme bölgesi ve (d) bu yenilme bölgesi kaldırıldıktan sonra oluşan asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.

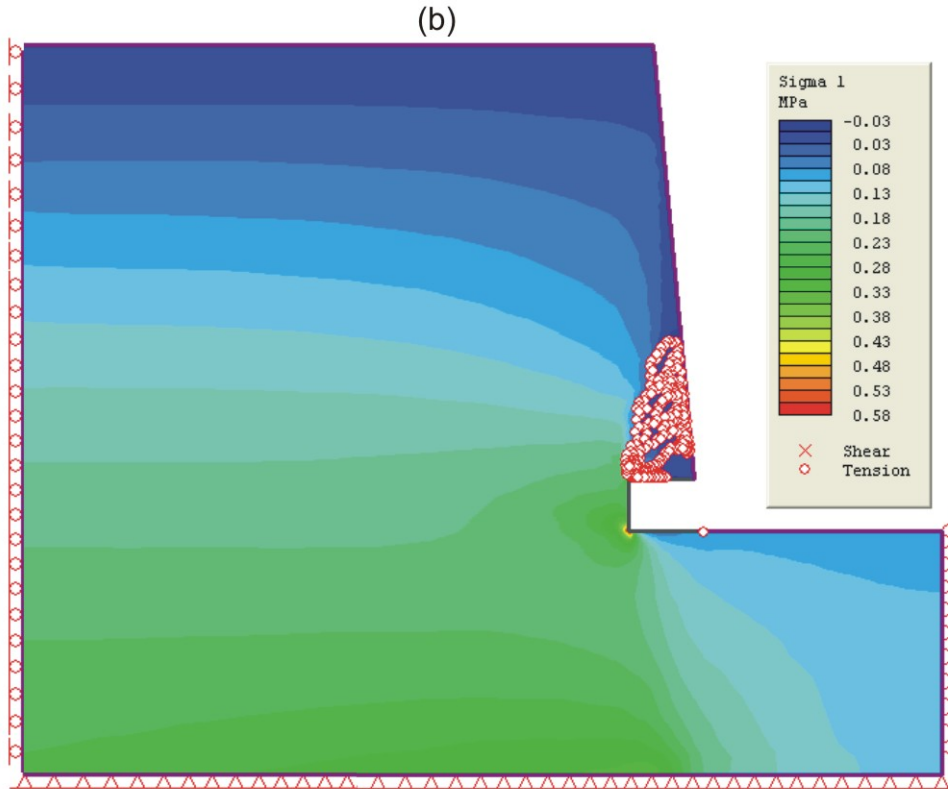
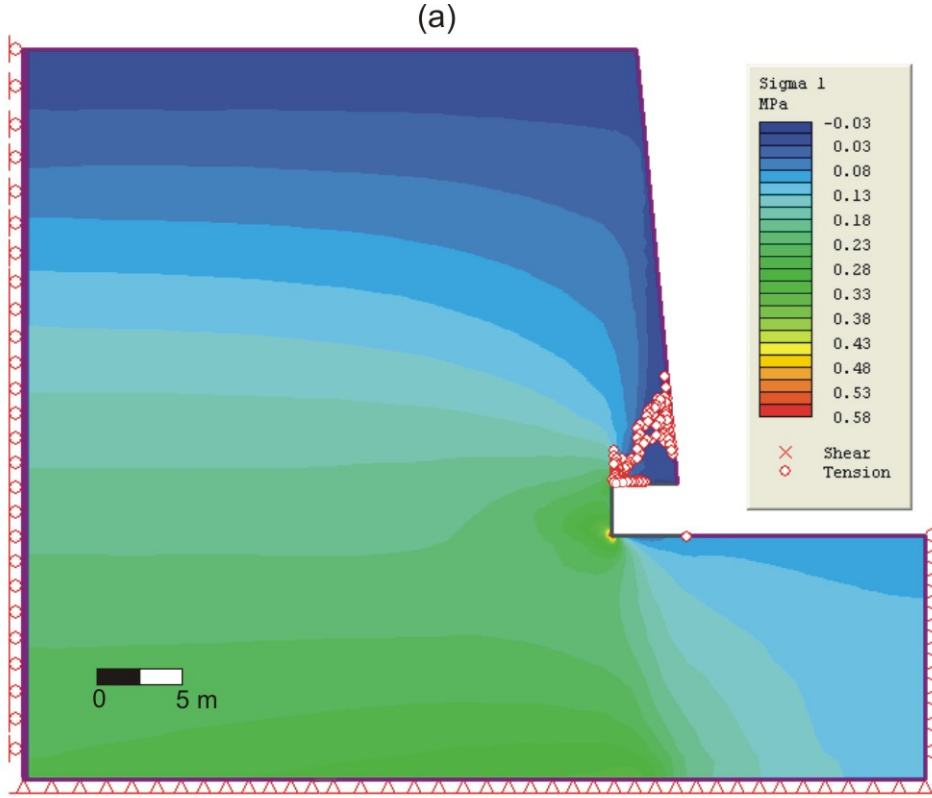


Şekil 7.10. Kaya kütleinin çekme dayanımı azaltılarak yapılan çözümler için seçilen açıklığın; (a) uzaktan ve (b) yakından görüntüleri ile (c) sayısal çözümlerinde kullanılan sonlu elemanlar ağı.

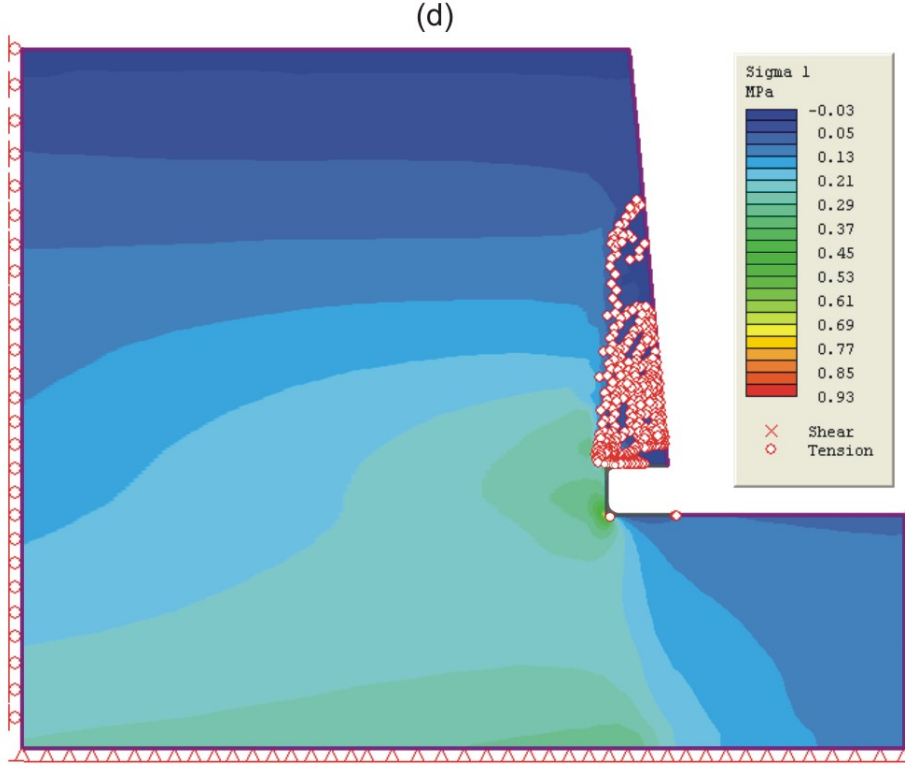
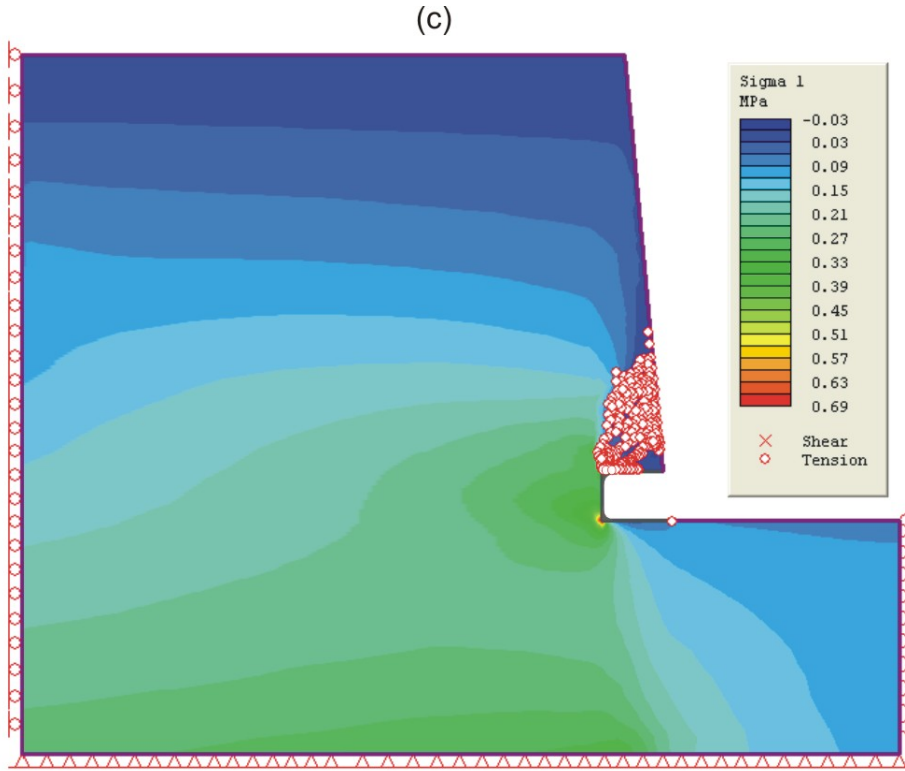
dayanımı aşamalı olarak azaltılarak yapılan sayısal çözümler, yenilmenin gerçekleştiği an için geçerli olan çekme dayanımlarının belirlenmesi ve Zelve Açık Hava Müzesi'nde yukarıda belirtildiği şekilde gerçekleşen yenilme türlerinin mekanizmasının anlaşılabilmesi amacıyla iki farklı aşamada yapılmıştır.

Modelin oluşturulması aşamasında, 3864 blok ve 2002 düğüm noktası kullanılmış ve açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla sonlu elemanlar ağı diğer bölgelere göre daha sık bir biçimde oluşturulmuştur. Sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında, yatay yönde yer değiştirmenin önlenmesi için açıklık modelinin yan duvarları sabitlenmiş ve modelin tabanında hem düşey hem de yatay doğrultuda yer değiştirmeye izin verilmemiştir (Şekil 7.10c). Çözümlerinde yine Çizelge 7.1'de verilen değerler kullanılmıştır.

Modelleme sırasında öncelikle yamacın topuğundaki açıklık oluşturulmuş, daha sonra yerçekimi yüklemesi yapılmıştır. Daha sonraki aşamada ise, kaya kütlesinin çekme dayanımı değerleri sırasıyla 0.04 MPa, 0.03 MPa, 0.0275 MPa ve 0.025 MPa'ya düşürülmüştür (Şekil 7.11). Elde edilen sonuçlara göre, Zelve Vadisi'nde gözlenen ve modellenen yamaçtan blok kopması şeklinde gelişen yenilmeye en benzer durumun, çekme dayanımının 0.025 MPa olduğu koşulda gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 7.11d). Tuncay (2009) tarafından Zelve 1. Vadi'de göçen Geyikli Kilise için yapılan geriye dönük analiz sonucunda kritik çekme gerilmesi 20 kPa olarak hesaplanmış olup, bu çalışmada elde edilen çekme dayanımı değerine (25 kPa) oldukça yakındır. Tuncay (2009)'ın çalışmasında basitleştirme amacıyla moment etkisi dikkate alınmamışken, bu tez çalışmasında bloğun kopması sırasında etkiyen moment de hesaba katılmıştır. Bu sonuçlar birbirini destekler niteliktedir. Çözümler sırasında yapılan kabuller ve oluşturulan modelin güncel yamaç geometrisine olan yakınlığı göz önünde bulundurulduğunda, 0.025 MPa değerinin Çizelge 7.1'de verilen ve kaya kütlesinin çekme dayanımı olarak çözümlerinde kullanılan 0.04 MPa değerine de oldukça yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 7.11. Kaya kütleinin çekme dayanımı değeri (a) 0.04 MPa ve (b) 0.03 MPa, olarak seçilerek yapılmış sayısal çözümler ve çözümlerden elde edilen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.



Şekil 7.11 (devam ediyor). Kaya kütlesinin çekme dayanımı değeri (c) 0.0275 MPa ve (d) 0.025 MPa olarak seçilerek yapılmış sayısal çözümler ve çözümlerden elde edilen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.

7.2.3. Akarsu Etkisine Maruz Kalmayan Yamaçta Aşınmanın Duraylılık Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Çözümler

Zelve 1. Vadi'de akan derenin aşındırdığı yamacın karşı yamacında çivi ölçümlerinin yapıldığı yerde ölçülen ortalama aşınma miktarının (0.25 – 1.57 mm/yıl) duraylılık üzerindeki etkisinin belirlenmesine yönelik amaçlarla 4 farklı aşamada sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

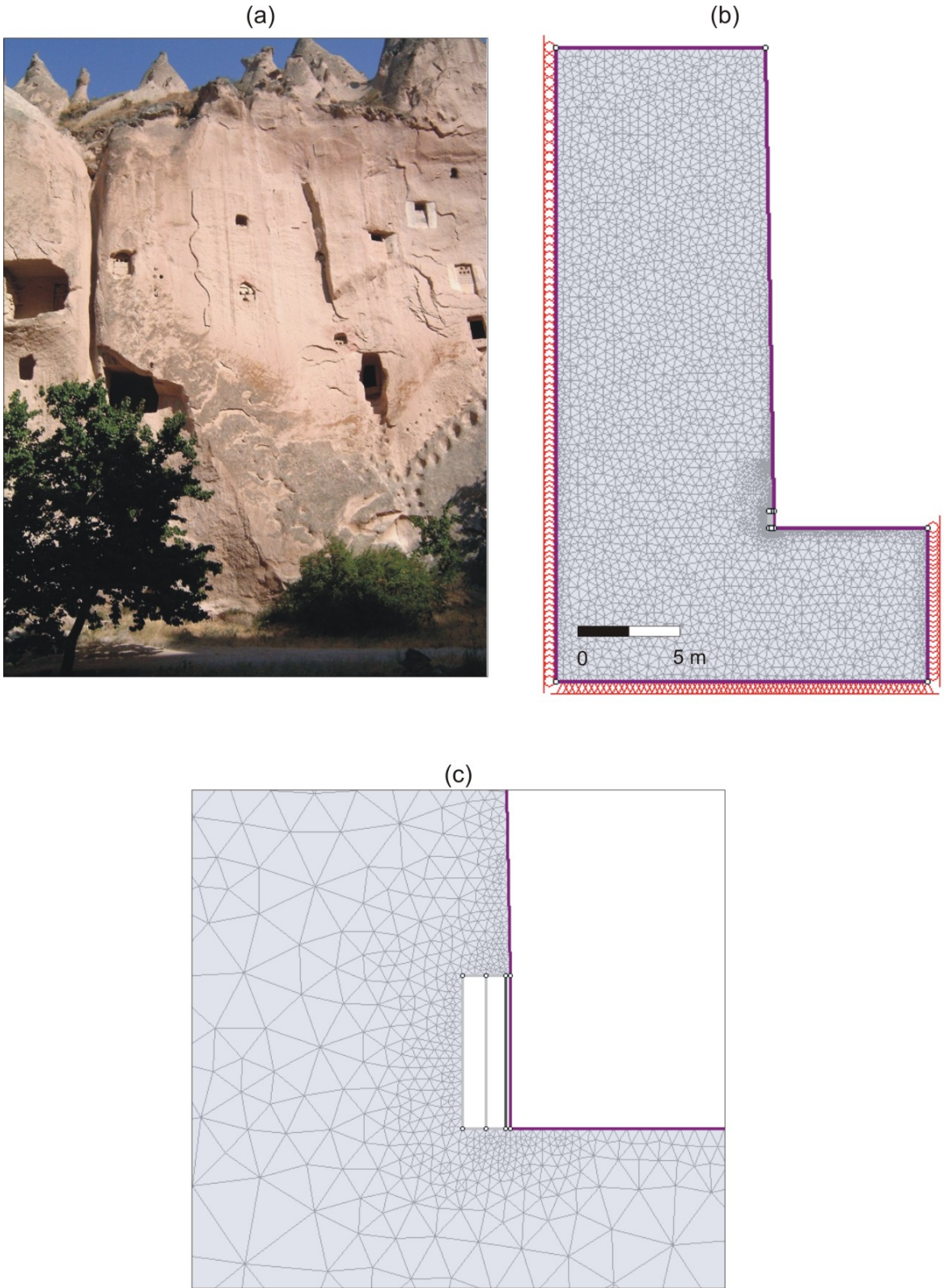
Modelin oluşturulması aşamasında; 6638 blok ve 3515 düğüm noktası kullanılmış ve açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla sonlu elemanlar ağı diğer bölgelere göre daha sık bir biçimde oluşturulmuştur (Şekil 7.12). Sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında, yatay yönde yer değiştirmenin önlenmesi için açıklık modelinin yan duvarları sabitlemiş ve modelin tabanında hem düşey hem de yatay doğrultuda yer değiştirmeye izin verilmemiştir. Çözümlerinde Çizelge 7.1'de verilen tüfe ait jeomekanik özellikler kullanılmıştır.

Çözümler, su etkisine maruz kalan yamaçtaki çözümlere benzer şekilde 4 aşamada yapılmış ve güncel durum ile 100, 500 ve 1000 yıllık aşınma senaryoları değerlendirilmiştir.

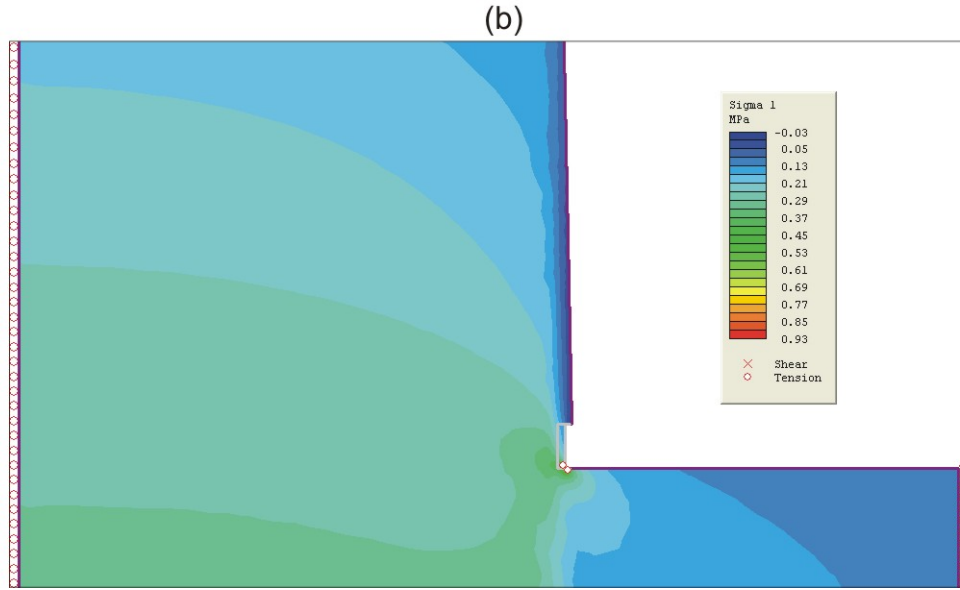
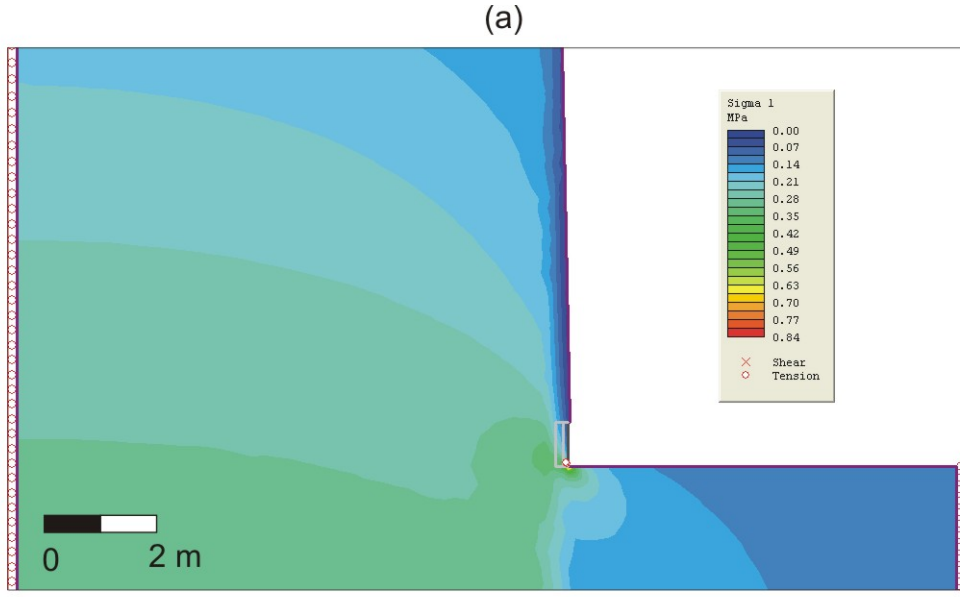
Elde edilen sonuçlara göre, 100, 500 ve 1000 yıllık senaryolar sonunda makaslama ve çekme gerilmeleri ile toplam yer değiştirme miktarları açısından önemli bir farklılık belirlenmemiştir (Şekil 7.13). Bu durum, özellikle topuktan akan suyun etkisiyle meydana gelen aşınmanın yamaçların ve yamaç topuklarının duraylılığında oldukça önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, yamaçların ve yamaç topuklarının duraylılığı açısından, 1. Vadi'nin tabanında akan derenin oluşturduğu aşındırma etkisi oldukça önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

7.3. Duraysızlık Olasılığı Bulunan Mevcut Kayadamların Sayısal Çözümü

Tez çalışmasının bu bölümünde, Zelve Açık Hava Müzesinde, "Manastır" gibi nispeten daha düzenli bir geometriye sahip üç farklı açıklık esas alınarak, bu açıklıkların mevcut durumları için en büyük asal gerilmelerin ve deformasyonların

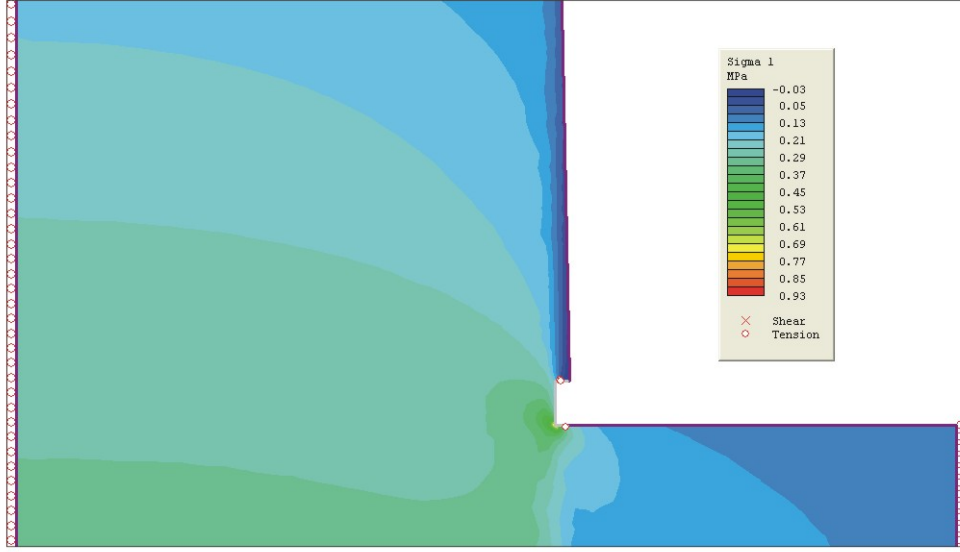


Şekil 7.122. Sayısal çözümlenmesi yapılan ve topuğunda akarsu etkisine maruz kalmayan yamaçtan bir görünüm ile (b) ve (c) sayısal çözümlenmelerde kullanılan sonlu elemanlar ağı.

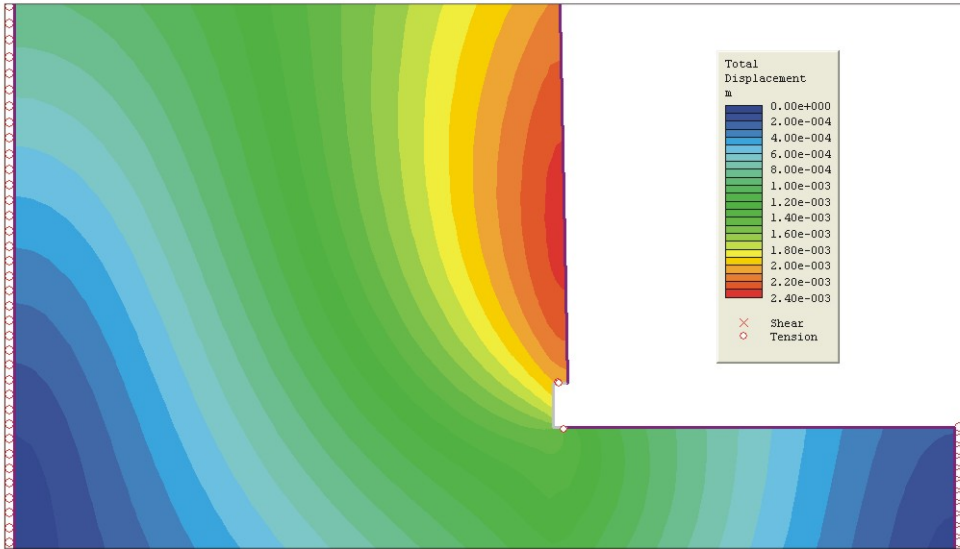


Şekil 7.133. Sayısal çözümler sonucunda yamaç üzerinde; (a) 100 yıl ve (b) 500 yıl yıllık senaryolara göre beklenen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları.

(c)



(d)



Şekil 7.13 (devam ediyor) Sayısal çözümler sonucunda yamaç üzerinde; (c) 1000 yıllık senaryoya göre beklenen asal gerilme ve yenilme bölgesi dağılımları ve (d) 1000 yıllık senaryo sonunda beklenen toplam yer değiştirme miktarları.

yoğunlaştığı bölgeler ile yenilmelerin hangi tür gerilmelerden kaynaklandığı ve yer değiştirme miktarlarının belirlenmesi amacıyla sayısal çözümler yapılmıştır. Söz konusu çözümler; sonlu farklar yöntemini esas alarak, üç boyutlu elasto-plastik çözümler olanağı sunan ve özellikle çok büyük mühendislik yapılarında büyük yer değiştirmeleri ve birim deformasyonları içeren sistemlerin çözümlenmesinde tercih edilen ve Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde bulunan FLAC^{3D} (ITASCA, 2005) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılarına değinilen üç boyutlu tüm analizlerde sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında; yatay yönde yer değiştirmenin önlenmesi, dolayısıyla modelin/sistemin bu yönde uygulanan gerilmelere (örneğin, yer çekimi, ek yük vb.) tepki verebilmesi amacıyla açıklık modelinin yan duvarları sabitlenmiş ve modelin tabanında hem düşey hem de yatay doğrultuda yer değiştirmeye izin verilmemiştir.

Çözümlerde Zelve tufunun jeomekanik özelliklerinin yanı sıra, kaya kütlelerinin de jeomekanik özelliklerinin kullanılması da gerekmiştir. Bunun nedeni, kullanılan FLAC^{3D} programında süreksizliklerin modellenmesinin güç olması, dolayısıyla modeli süreksizlik yokmuş gibi düşünmekle birlikte, bunların etkisini kaya kütleleri parametrelerini dikkate alarak hesaba katmaktır. Bu aşamada Çizelge 7.1'de verilen kaya malzemesi özelliklerine ek olarak, Çizelge 7.2'de verilen kaya kütleleri parametreleri kullanılmıştır. Çözümler sırasında bu değerler kullanılmış ve kaya malzemesinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uygun olarak davrandığı kabul edilmiştir.

Çizelge 7.2. Sayısal çözümlerde kaya kütleleri için kullanılan özellikler.

c (MPa)	ϕ (°)	G (MPa)	K (MPa)
0.370	16.6	232.9	476.9

c: Kohezyon; ϕ : İçsel sürtünme açısı; G: Rijidite modülü ($G=E/2(1+\nu)$); K: Sıkışma (bulk) modülü ($K=E/3(1-2\nu)$).

Çözümleme aşamalarında ise, öncelikle yerçekimi yüklemesi çözümlemesi yapılarak modelde oluşan yer değiştirme miktarları sıfırlanmış ve daha sonra yeraltı açıklığı oluşturulmuştur. Bundan sonraki aşamada ise, son çözümleme yapılmıştır.

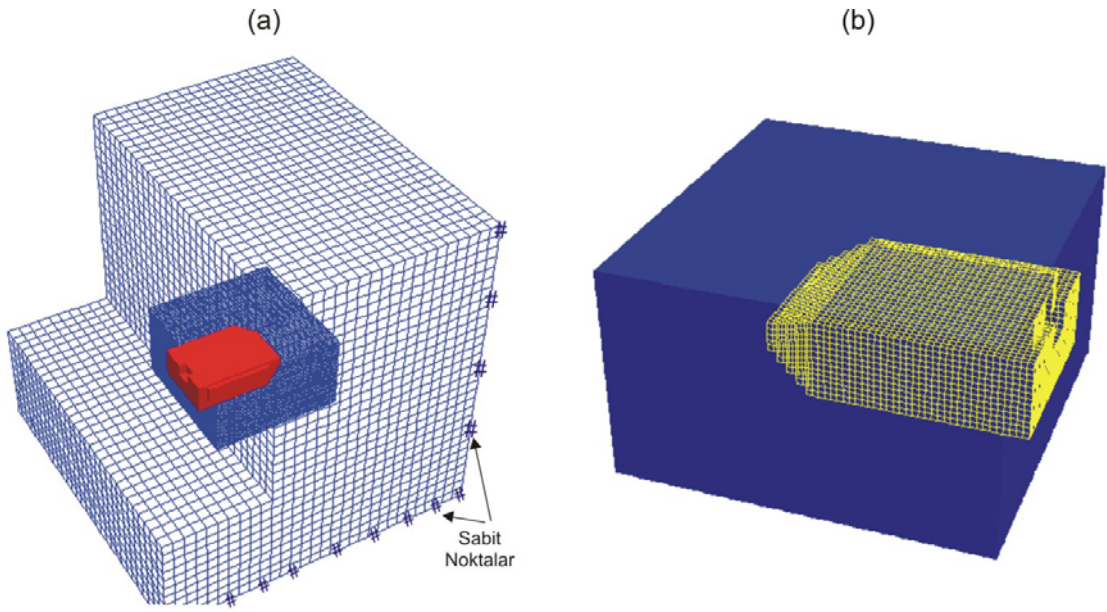
7.3.1. Kavlaklanmanın yoğun olarak gözlemlendiği tipik bir açıklık için yapılan sayısal çözümleme

Yukarıda sözü edilen amaçlar doğrultusunda, vadide seçilen ve kavlaklanmanın yoğun olarak gözlemlendiği bir açıklık (bkz. Şekil 5.11) için sayısal çözümleme yapılmıştır. Modelin oluşturulması aşamasında; 145992 blok ve 156195 düğüm noktası kullanılmış ve açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla sonlu farklar ağı diğer bölgelere göre daha sık bir biçimde oluşturulmuştur (Şekil 7.14).

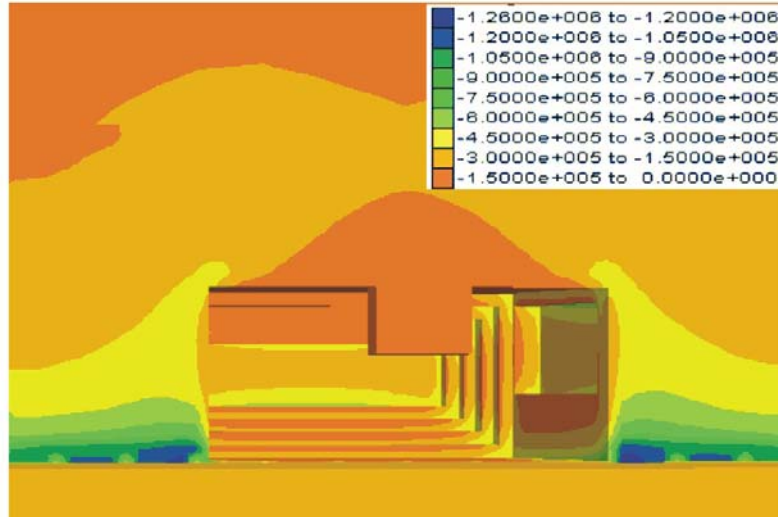
Elde edilen sonuçlar, açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımlarının açıklık tavanında gelişeceğini göstermektedir (Şekil 7.15). Bununla birlikte, yaklaşık 2.2 mm'lik en büyük yer değiştirme miktarının açıklık tabanında ve tavanında gelişeceği belirlenmiştir (Şekil 7.16). Açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme bölgesinin ise, açıklık yüzeyine paralel olacak şekilde sınırlı bir bölgede geliştiği gözlenmiştir (Şekil 7.17). Bu sonuçlar, arazi çalışmaları sırasında yapılan gözlemlerle belirlenen ve kayanın dilimler halinde dökülmesiyle oluşan kavlaklanmalar (bkz. Şekil 5.11c) ile de uyum göstermektedir.

7.3.2. “Manastır” için yapılan sayısal çözümleme

Üç boyutlu sayısal çözümlerinin bu aşamasında, Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki açıklıklar arasında gerek büyüklük gerekse tarihsel ve kültürel açıdan oldukça önemli bir yere sahip olan “Manastır” (Şekil 7.18) için yapılan sayısal çözümlerinin modelin oluşturma aşamasında, 123200 blok ve 130089 düğüm noktası kullanılmış ve açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla sonlu farklar ağı diğer bölgelere göre daha sık bir sonlu farklar ağı oluşturulmuştur (Şekil 7.19).

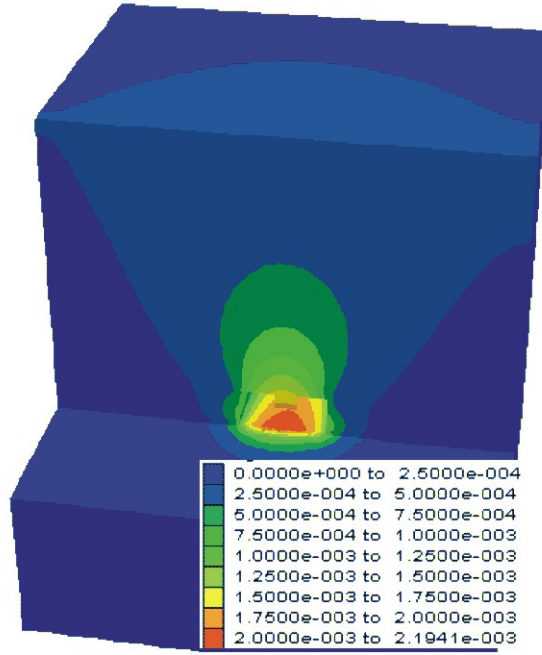


Şekil 7.144. Kavlaklanmanın yoğun olarak gözleendiği tipik bir açıklık için yapılan sayısal çözümlerinde kullanılan (a) sonlu farklar ağı ve (b) açıklık geometrisi.

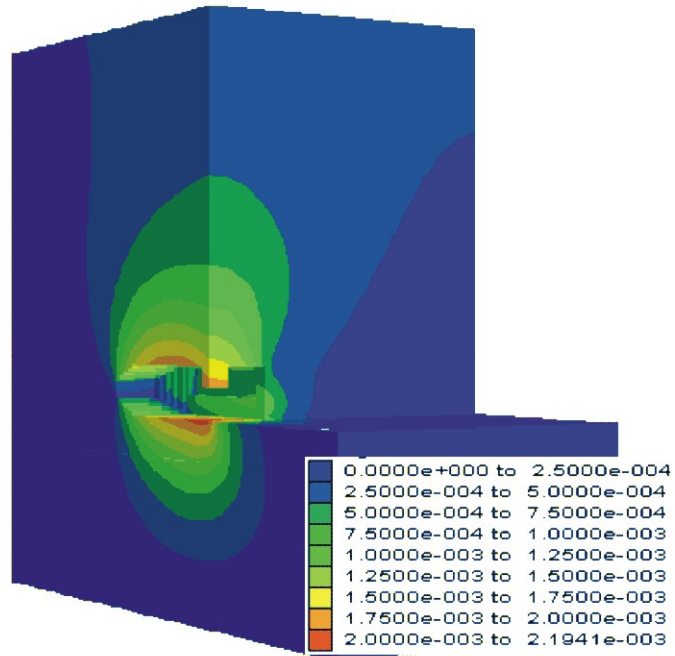


Şekil 7.155. Açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme (Pa) dağılımı ("-" işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir).

(a)

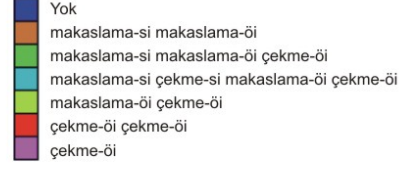
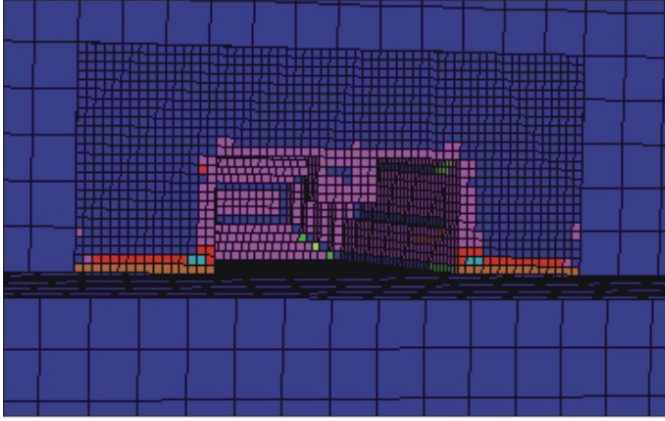


(b)

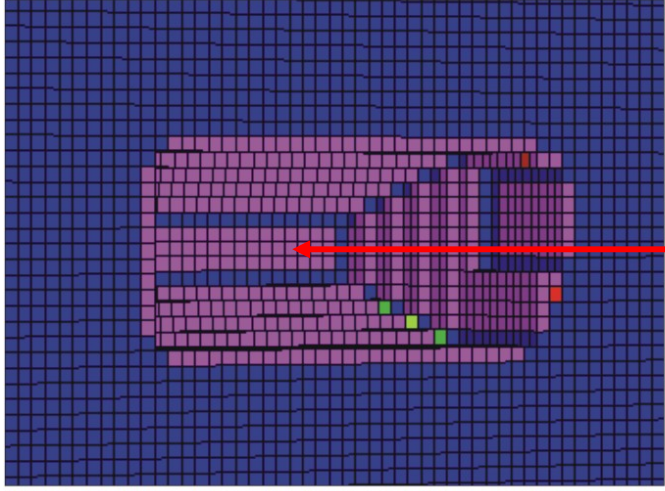


Şekil 7.166. Sayısal çözümler sonucunda, (a) açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme dağılımı ve (b) açıklığın uzun eksenini boyunca ve açıklık yüzeyinde oluşan yer değiştirme dağılımı (Birim: m).

(a)

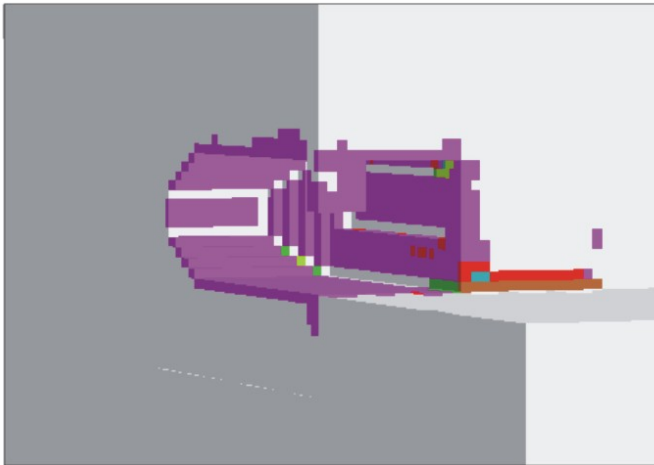


(b)

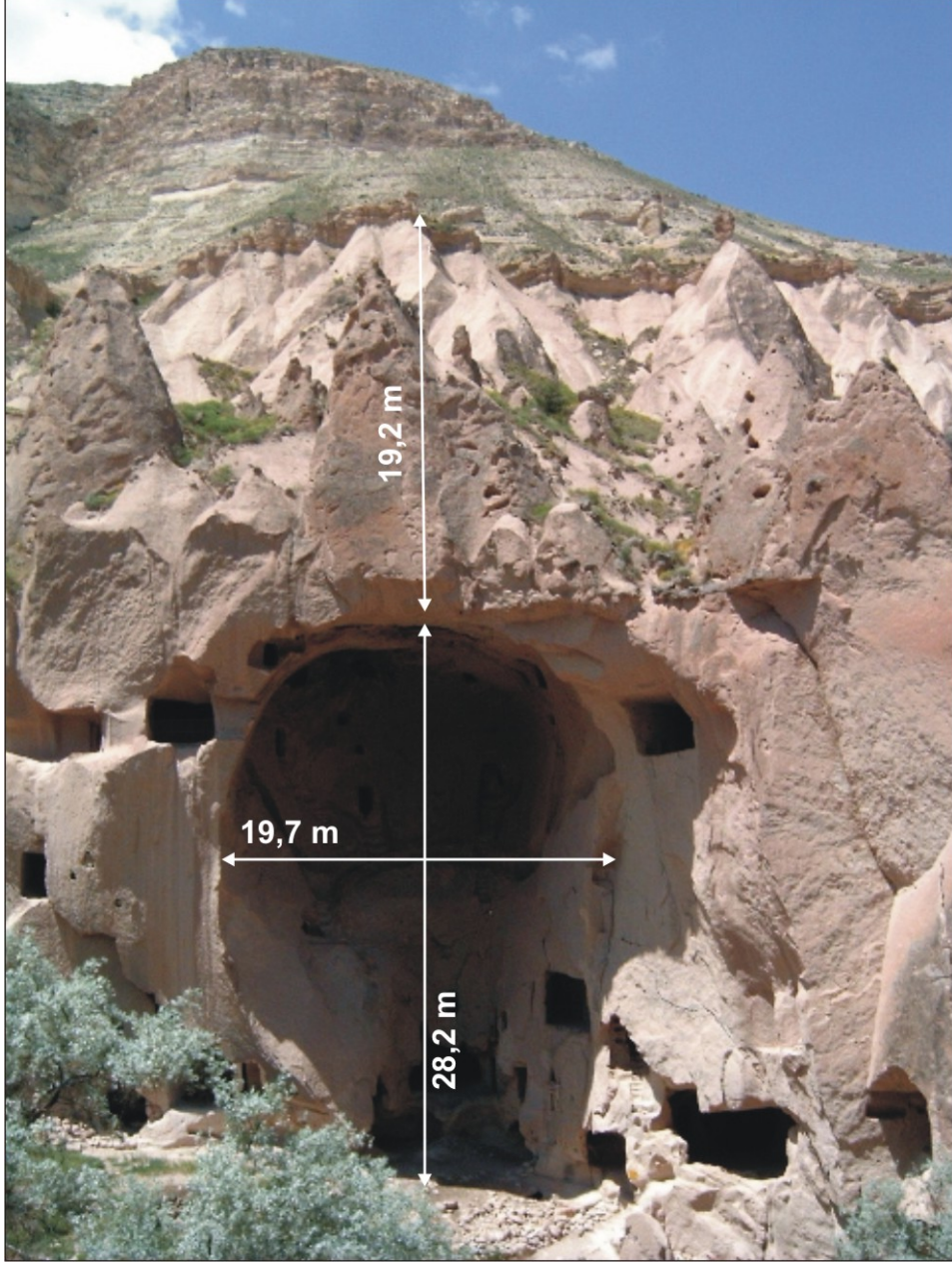


Şekil 5.11'deki kesim

(c)

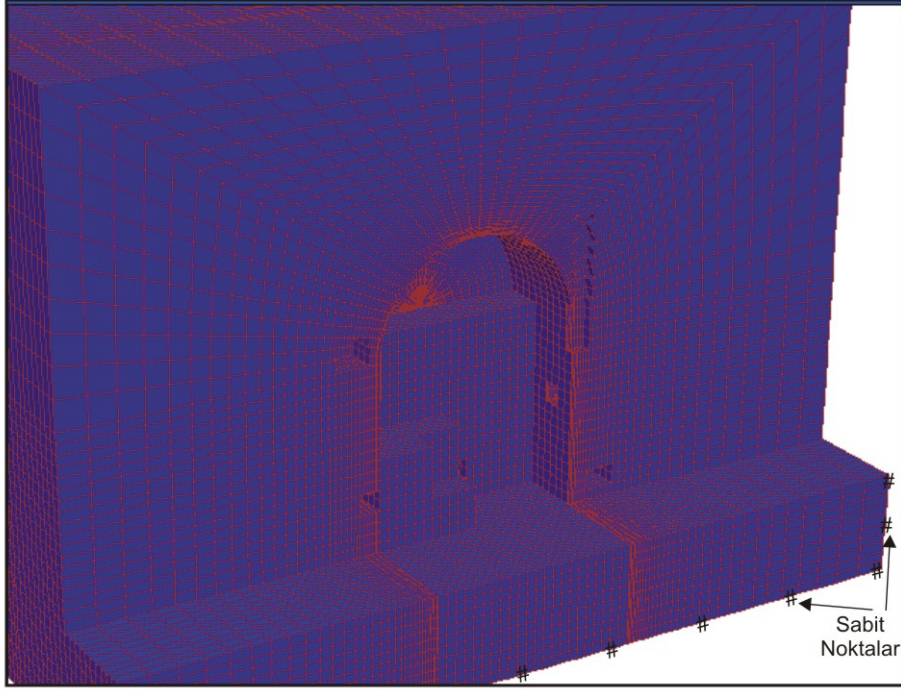


Şekil 7.177. Sayısal çözümler sonucunda (a) açıklığın yan ve iç duvarları (açıklığa karşıdan bakış), (b) açıklığın vadiye paralel yönde görünümü ile bunun gerisinde (açıklığa karşıdan bakış) ve (c) açıklığın uzun eksenini boyunca alınan kesitte beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: "son iterasyon"da oluşan yenilme; öi: "önceki iterasyon"larda oluşan yenilme).

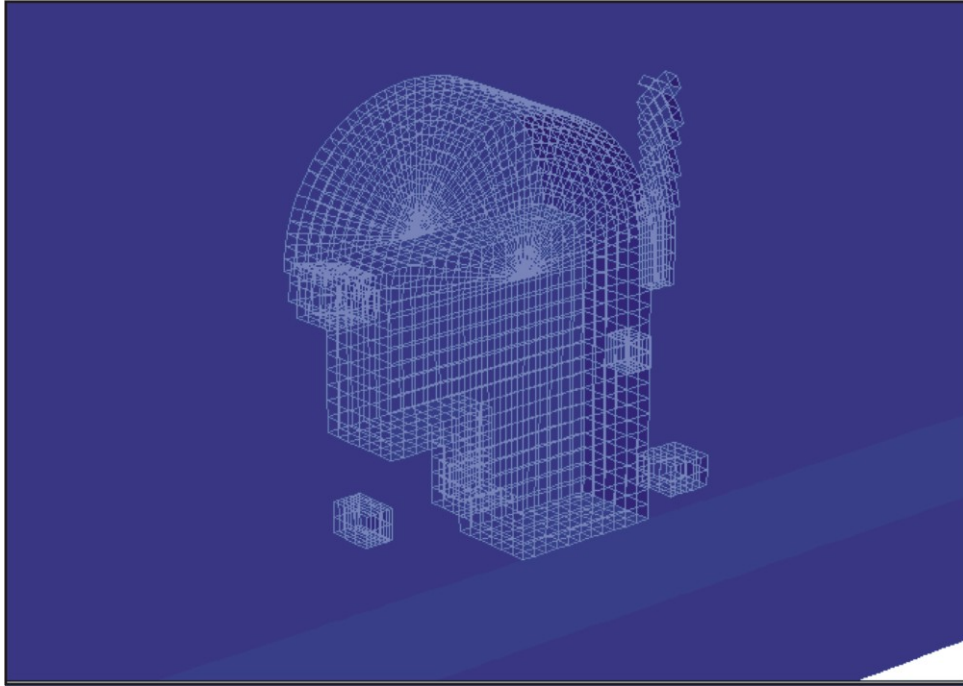


Şekil 7.188. Zelve Açık Hava Müzesi'nde tarihsel ve kültürel açıdan büyük önem taşıyan ve sayısal çözümlemesi yapılan "Manastır"ın genel görünümü ve boyutları.

(a)



(b)



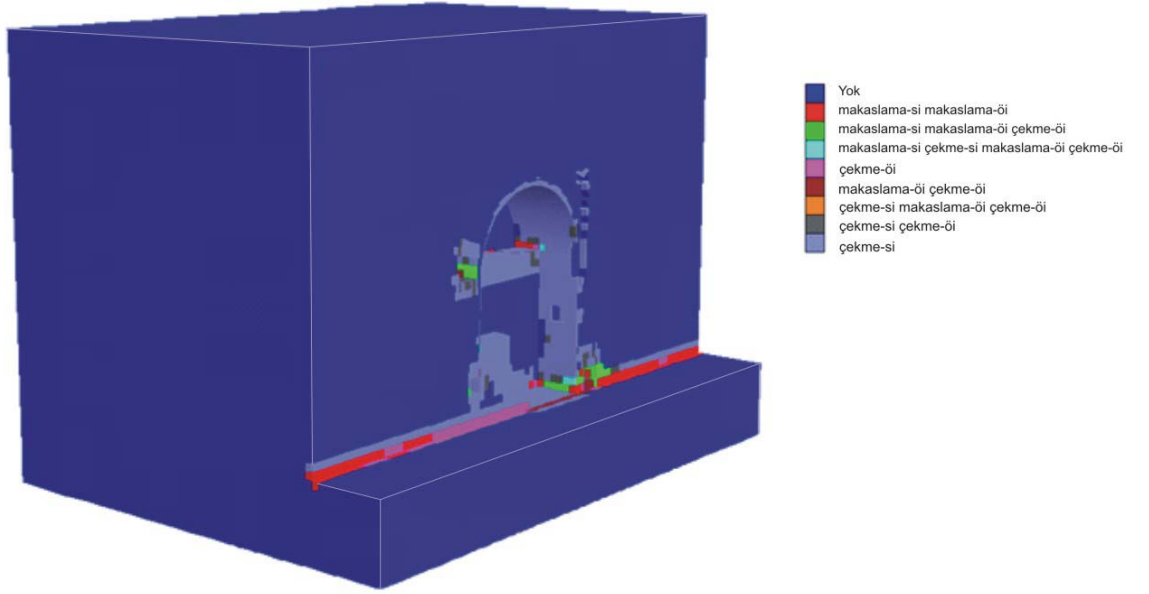
Şekil 7.19. Sayısal çözümlerde kullanılan (a) sonlu farklar ağı ve (b) açıklık geometrisi.

Elde edilen sonuçlara göre, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme bölgesinin sığ derinlikte (açıklığın yüzeye yakın kesiminde) ve sınırlı bir bölgede geliştiği belirlenmiştir (Şekil 7.20). Bununla birlikte, esas açıklık çevresindeki diğer küçük açıklıkların çevresinde de kısmen makaslama yenilmelerinin meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımlarının açıklığın tavanında meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 7.21). Çözümleme sonuçları incelendiğinde, en büyük yer değiştirme miktarının yaklaşık 7.5 mm olup, açıklığın tavanında meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 7.22). Elde edilen sonuçlar, arazide yapılan gözlemlerle belirlenen ve kayanın açıklık duvarlarına paralel olarak gelişen büyük dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan çekme yenilmeleriyle uyum göstermektedir.

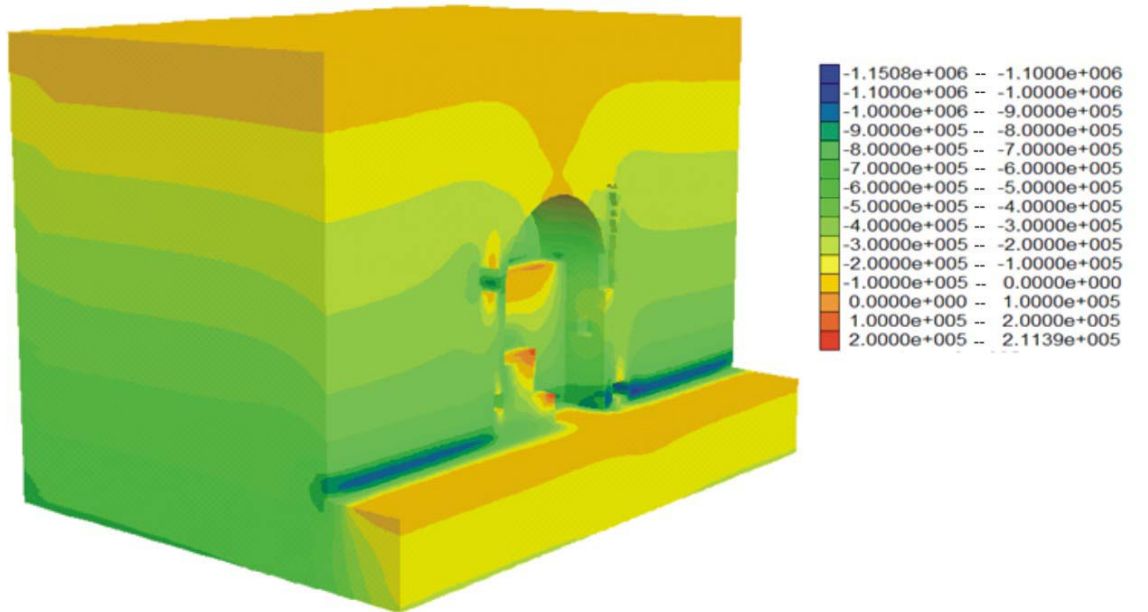
7.3.3. “L10” kodlu açıklık için yapılan sayısal çözümleme

Üç boyutlu sayısal çözümlerinin bu aşamasında, Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi'deki en büyük açıklıklardan biri olan “L10” kodlu açıklık için (Şekil 7.23) üç boyutlu çözümleme yapılmıştır. Modelde 159200 blok ve 167134 düğüm noktası kullanılmış ve açıklık çevresinde daha hassas sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla diğer bölgelere göre daha sık bir sonlu farklar ağı oluşturulmuştur (Şekil 7.24).

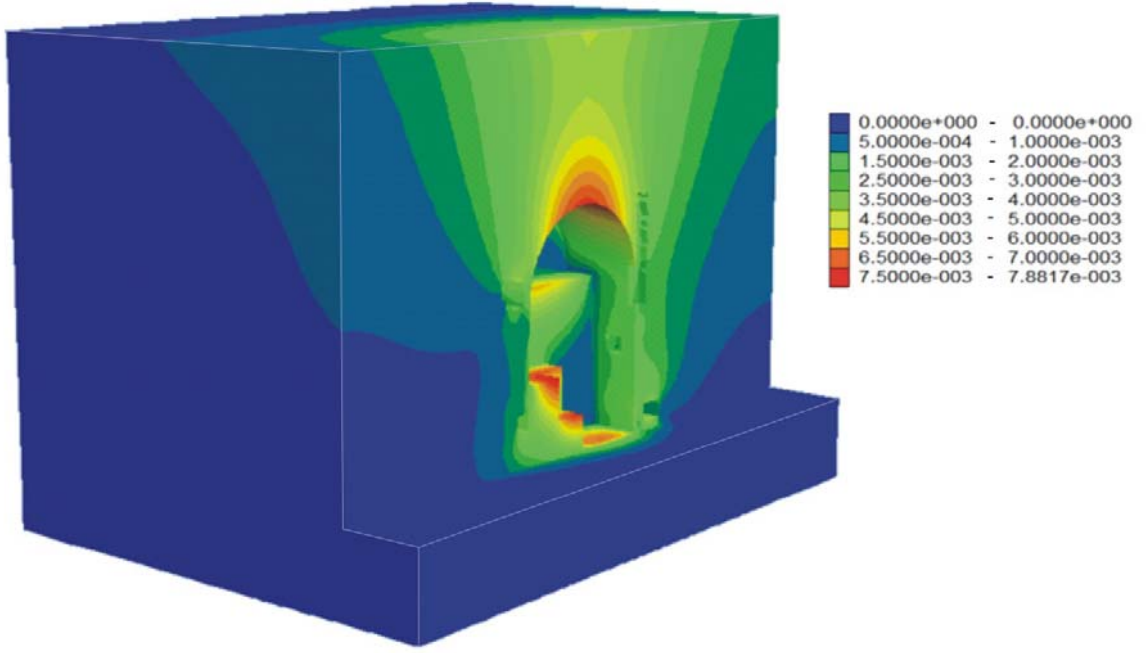
Elde edilen sonuçlara göre, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme bölgesinin açıklığın tavanında ve yüzeye yakın kesiminde geliştiği belirlenmiştir (Şekil 7.25). Bununla birlikte, esas açıklık çevresindeki küçük boyutlu açıklıkların çevresinde de kısmen çekme gerilmelerinden kaynaklanan yenilmelerinin meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımlarının da açıklık tavanında geliştiği belirlenmiştir (Şekil 7.26). Çözümleme sonuçları incelendiğinde, yaklaşık 3 mm olan en büyük yer değiştirme miktarının açıklığın tavanında meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 7.27). Elde edilen sonuçlar, arazi çalışmalarında yapılan gözlemlerle de belirlenen ve söz konusu açıklığın tavanında büyük dilimlenmeler halinde dökülmeyle sonuçlanan çekme yenilmelerine de uyum göstermektedir.



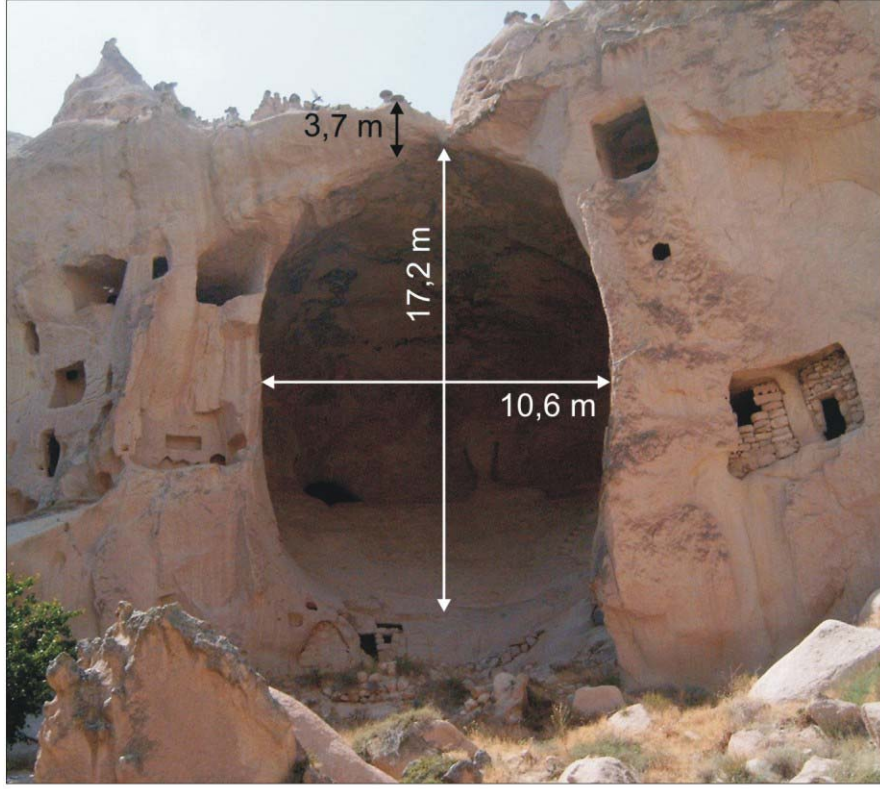
Şekil 7.190. Sayısal çözümler sonucunda açıklık çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: “son iterasyon”da oluşan yenilme; oi: “önceki iterasyon”larda oluşan yenilme).



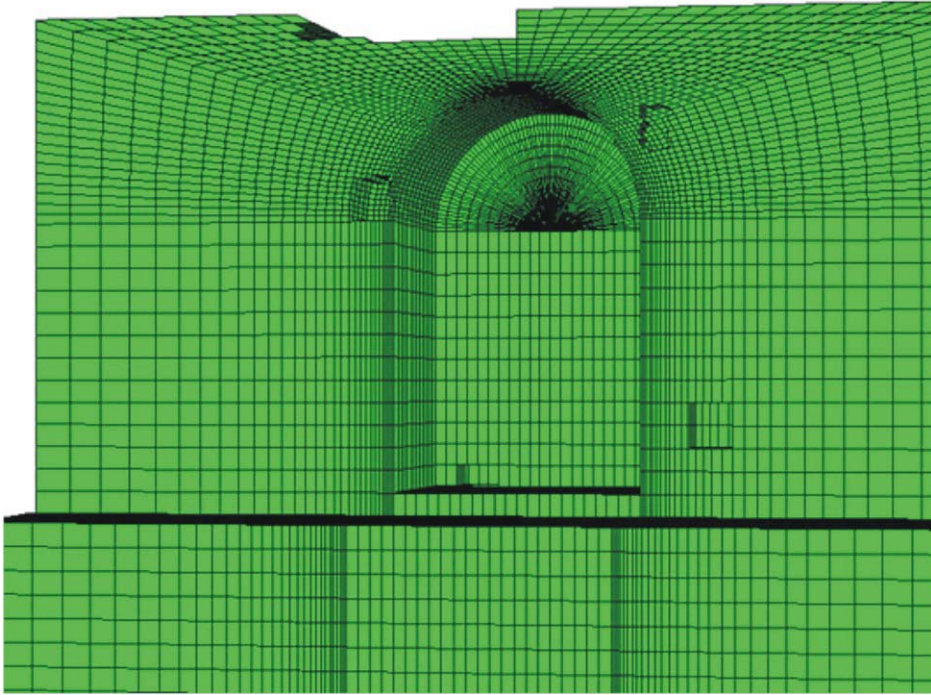
Şekil 7.201. Açıklık çevresinde beklenen en büyük asal gerilme dağılımı (“-“ işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir; Birim: Pa).



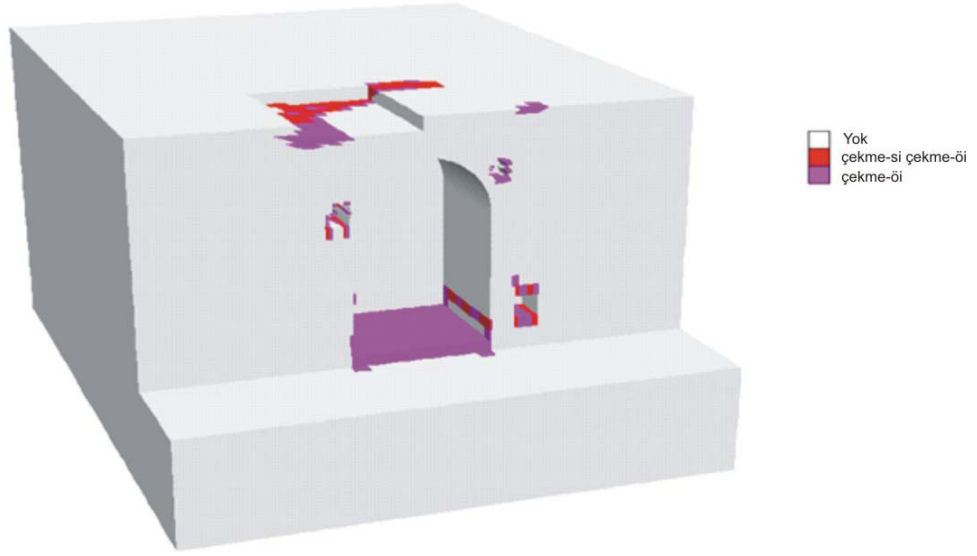
Şekil 7.212. Sayısal çözümlere göre, açıklık çevresinde beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m).



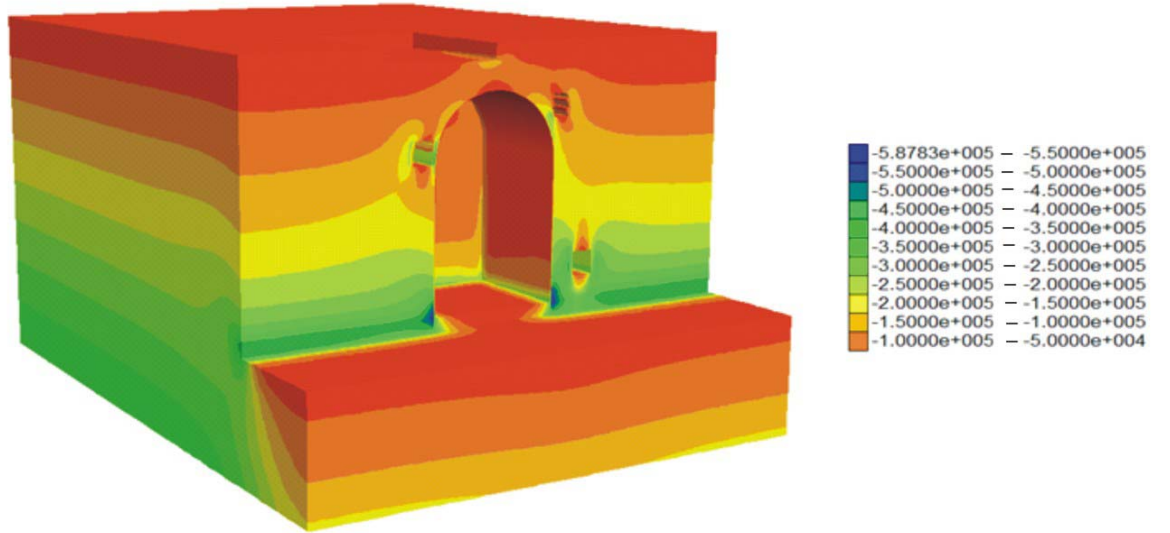
Şekil 7.223. Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki en büyük açıklıklardan biri olan "L10" kodlu açıklığın boyutları ve genel görünümü.



Şekil 7.234. "L10" kodlu açıklığın sayısal çözümlemesinde kullanılan sonlu farklar ağı (a) ve açıklığın geometrisi (b).

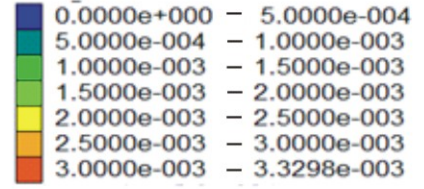
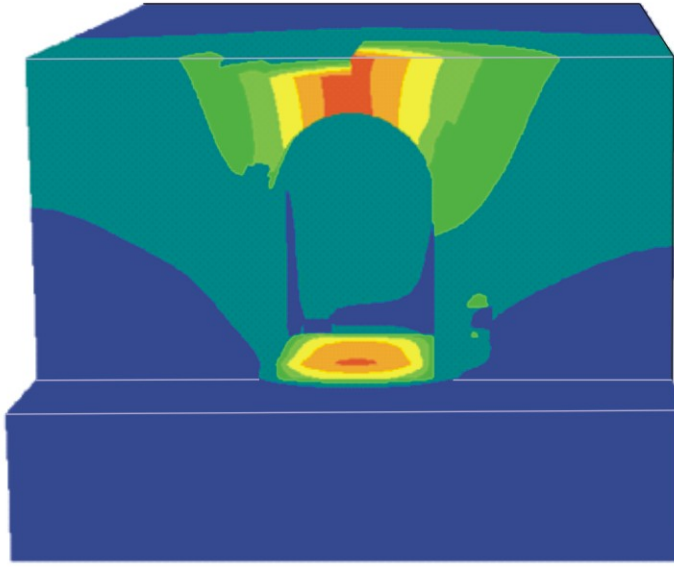


Şekil 7.245. Sayısal çözümler sonucunda "L10" kodlu açıklığın çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: "son iterasyon"da oluşan yenilme; öi: "önceki iterasyon"larda oluşan yenilme).

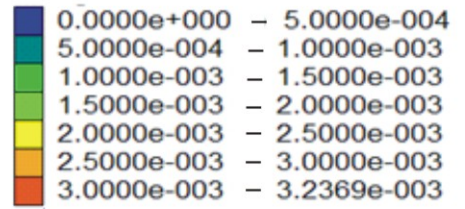
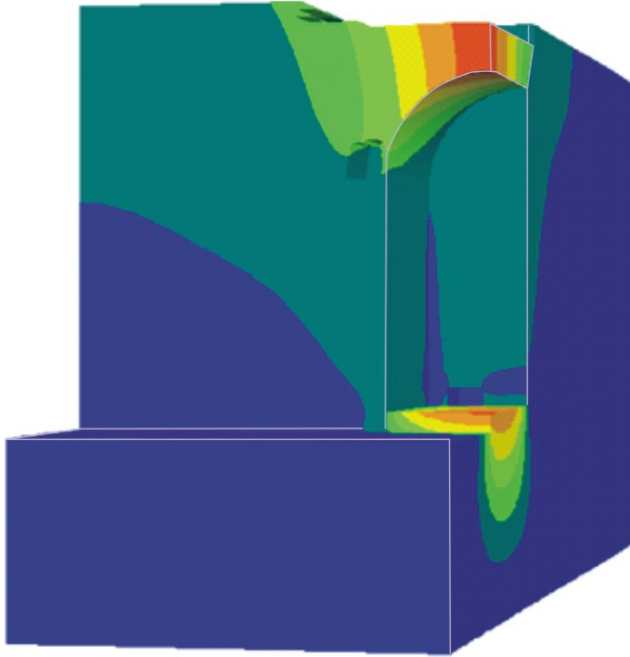


Şekil 7.256. "L10" kodlu açıklığın çevresinde beklenen en büyük asal gerilme dağılımı ("-" işareti sıkışma gerilmesini temsil etmektedir; Birim: Pa).

(a)



(b)



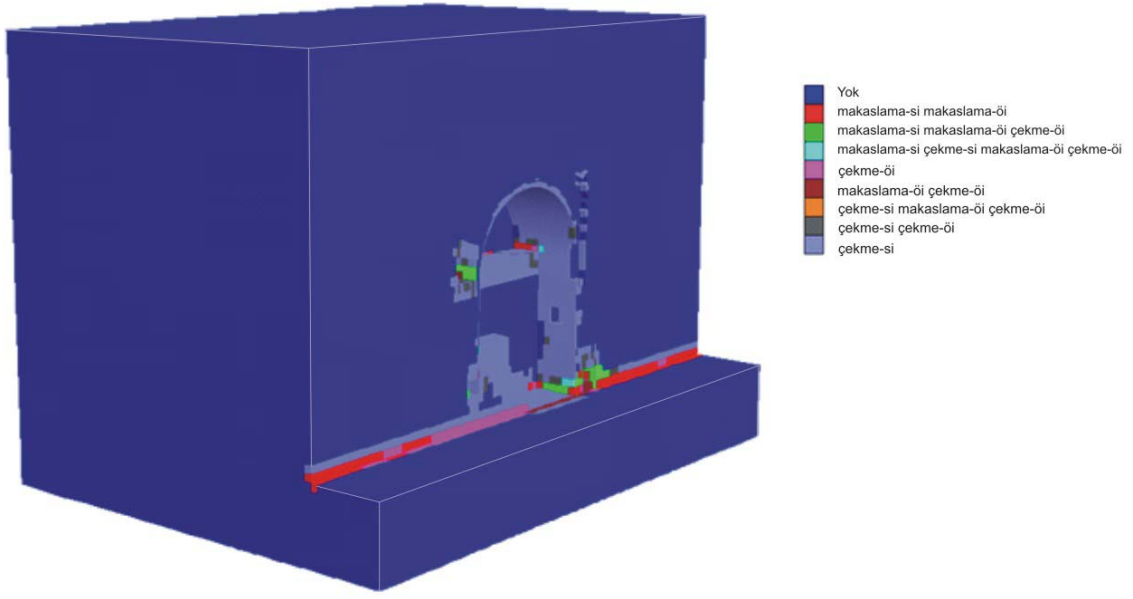
Şekil 7.267. Sayısal çözümler sonucunda, açıklık çevresinde beklenen yer değiştirme dağılımı (Birim: m).

7.4. “Manastır”ın Tavanında Gözlenen İlerleyici Karakterdeki Duraysızlıkların Üç Boyutlu Sayısal Çözümlenmelerle İncelenmesi

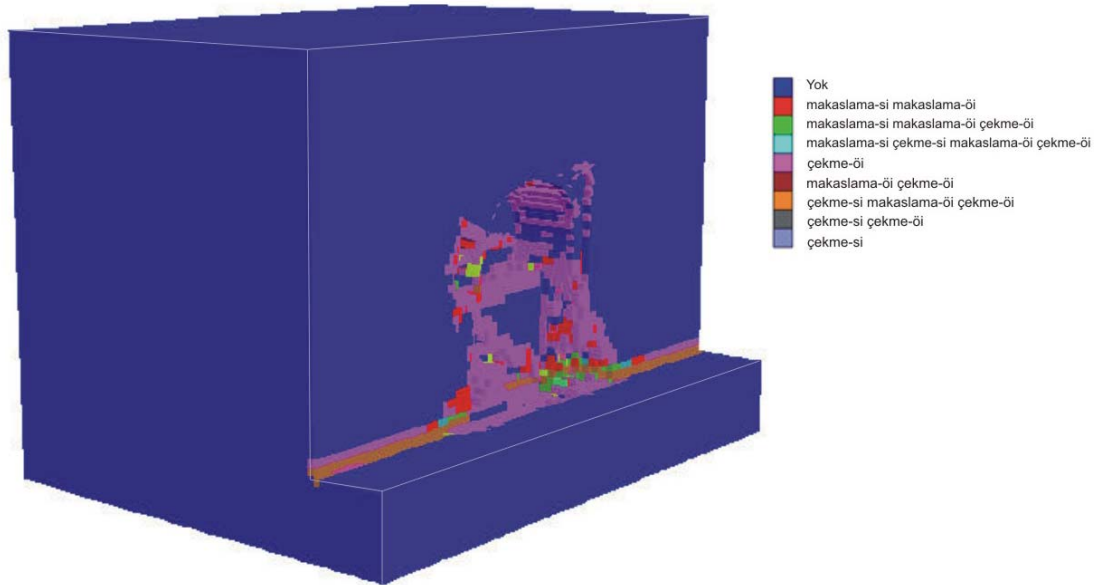
Bölüm 7.3.2’de de ayrıntılarına değinilen ve Zelve Açık Hava Müzesi’ndeki açıklıklar arasında gerek büyüklük gerekse tarihsel ve kültürel açıdan oldukça önemli bir yere sahip olan “Manastır” (bkz. Şekil 7.18) için yapılan üç boyutlu sayısal çözümlenmeler sonucunda açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımlarının açıklığın tavanında kayanın büyük dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan çekme yenilmeleriyle meydana geldiği belirlenmişti (bkz. Şekil 7.22). Bu aşamada ise, “Manastır”da söz konusu yenilmeler üç boyutlu sayısal çözümlenmelerle ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Söz konusu çözümlenmeler; sonlu farklar yöntemini esas alan ve üç boyutlu elasto-plastik çözümlenme olanağı sunan FLAC^{3D} (ITASCA, 2005) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sınır koşullarının belirlenmesi aşamasında; yatay yönde yer değiştirmenin önlenmesi amacıyla açıklık modelinin yan duvarları sabitlenmiş ve modelin tabanında hem düşey hem de yatay doğrultuda yer değiştirmeye izin verilmemiştir. Bununla birlikte, Çizelge 7.2’de verilen kaya kütlesi parametreleri kullanılmış ve kaya malzemesinin Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uygun olarak davrandığı kabul edilmiştir.

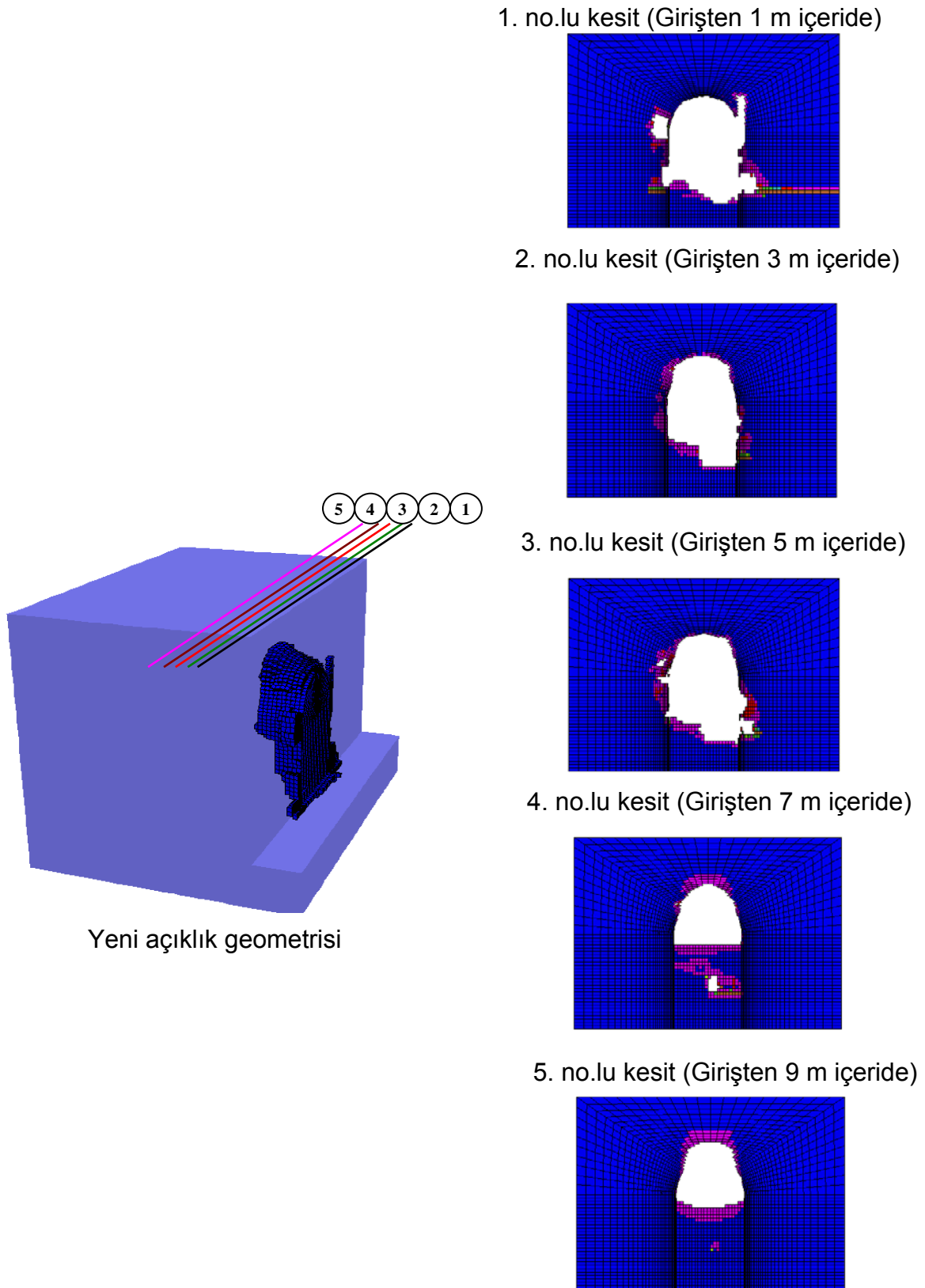
Analizlerin ilk aşamasına ayrıntıları Bölüm 7.3.2’de verilen sayısal çözümlenmede kullanılan modelle başlanılmış (bkz. Şekil 7.18 ve 7.19) olup, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin (Şekil 7.28) neden olduğu yenilme bölgelerinin kaldırılmasıyla oluşan yeni geometri için çözümlenme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, oluşan çekme gerilmelerinin kısmi olarak yan duvarlarda ve özellikle tavanda geliştiğine işaret etmiştir (Şekil 7.29). Bununla birlikte, açıklık girişinden itibaren açıklığın içine doğru 1, 3, 5, 7 ve 9 m’lik mesafeler için alınan kesitler incelendiğinde, tavanda oluşan çekme gerilmelerinin özellikle açıklık girişinden itibaren belirli bir mesafeden sonra arttığı görülmektedir (Şekil 7.30). Ayrıca çözümlenmeler sonucunda oluşan yerdeğiştirme dağılımları incelendiğinde (Şekil 7.31), en yüksek yerdeğiştirme miktarlarının açıklığın tavanında meydana geleceği belirlenmiştir.



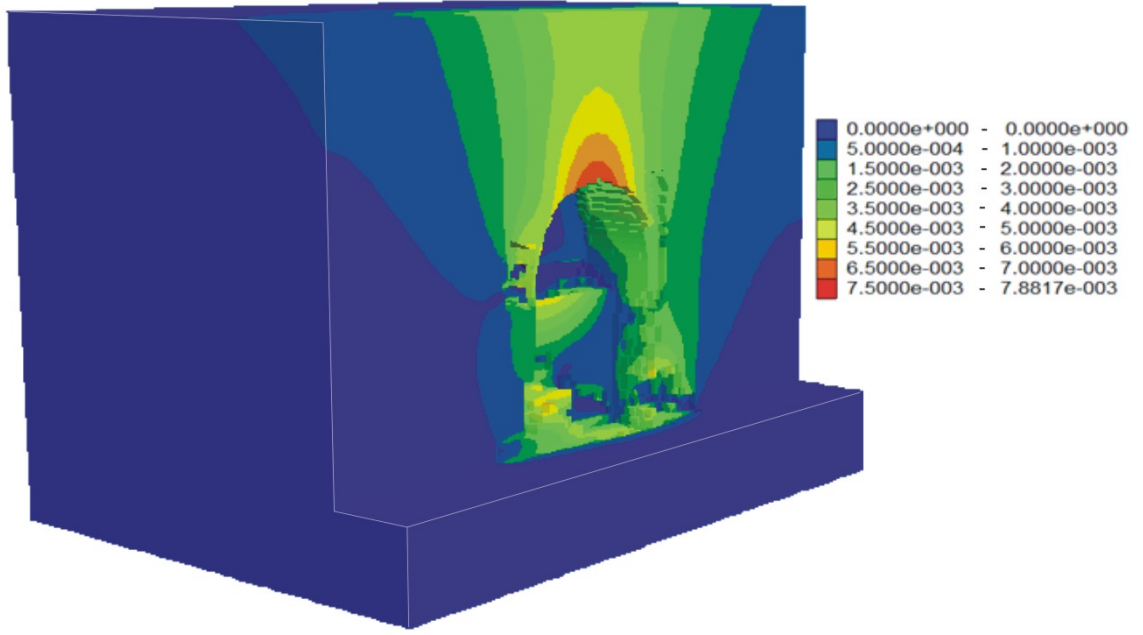
Şekil 7.28. "Manastır"ın tavanında gözlenen yenilmelerin incelenmesi amacıyla yapılan üç boyutlu sayısal çözümlerler ilk aşaması sonucunda açıklık çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: "son iterasyon"da oluşan yenilme; oi: "önceki iterasyon"larda oluşan yenilme).



Şekil 7.29. "Manastır"ın tavanında gözlenen yenilmelerin incelenmesi amacıyla yapılan üç boyutlu sayısal çözümlerlerin ikinci aşaması sonucunda açıklık çevresinde beklenen yenilme bölgesi dağılımları (si: "son iterasyon"da oluşan yenilme; oi: "önceki iterasyon"larda oluşan yenilme).



Şekil 7.30. “Manastır” için yapılan üç boyutlu analizin ilk aşamasında oluşan yenilme bölgelerinin modelden çıkarılması ile oluşan açıklık geometrisi kullanılarak yapılan çözümlene sonucunda oluşan yenilme bölgesi dağılımlarının açıklık girişinden itibaren kesit görünüşleri.



Şekil 7.31. "Manastır"ın tavanında gözlenen yenilmelerin incelenmesi amacıyla yapılan üç boyutlu sayısal çözümlerinin ikinci aşaması sonucunda açıklık çevresinde beklenen yerdeğiştirme dağılımı (Birim: m).

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kapadokya'da bulunan yeraltı / yarı-yeraltı yerleşimlerinin oluşturduğu tarihi sit alanlarının önemli bir bölümünün yer aldığı Zelve Açık Hava Müzesi'nin 1.Vadisi'nde kayadan oyma yapıların içinde açılmış oldukları tūfūn indeks ve dayanım özelliklerinin tayini ve kayadan oyma mekanların duraylılığının analitik ve sayısal yöntemlerle incelenmesi, karşılaşılan duraysızlık sorunlarının nedenlerinin ve ilgili faktörlerin belirlenmesi, dolayısıyla koruma ve restorasyon çalışmalarına yol gösterecek mühendislik verilerinin elde edilmesi amacıyla yapılan bu tez çalışması kapsamında ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- 1) Yapılan gözlemlere göre 1. Vadi'de; kaya düşmesi ve kayadan oyma yapıların duraysızlığı olmak üzere başlıca iki tür duraysızlık söz konusudur. Bu duraysızlıklar; tūfūn bozunması (ayrışması) ve kayanın içerdiği yapısal süreksizliklerin varlığı ile ıslanma-kuruma ve donma – çözülme süreçlerinin kaya kütlelerinin dayanımında belirgin bir azalmaya neden olmasıyla ilişkilidir. Ayrıca yapılan ölçümler ve gözlemler, geçmişte vadi tabanında akan ve günümüzde mevsimsel yağışlara bağlı olarak akış haline geçen derenin de vadi yamaçlarının topuğunu oyarak duraysızlıkların gelişmesinde etkili olduğuna işaret etmektedir.
- 2) 1.Vadi'de yapılan incelemelere göre kaya yapılarında gözlenen duraysızlık türleri için (i) süreksizlik yüzeyi boyunca gelişen makaslama yenilmesi, (ii) topuğun sağladığı desteğin yitimi ve/veya topuğun alttan oyulması sonucu kayanın yerçekimi etkisiyle düşmesi ve (iii) gerilme boşalımına bağlı olarak gelişen kavlaklanmalar şeklinde olmak üzere üç model belirlenmiştir. Bu duraysızlık modellerinin yanı sıra, Zelve Vadisi'ndeki kayadan oyma yapılarda muhtemelen gerilme boşalımına ve kapı, pencere ya da yaşam alanı olarak açılmış boşluklar nedeniyle değişen gerilme ortamına bağlı olarak gelişmiş ilerleyici karakterdeki ikincil çatlakların mevcut süreksizliklerle veya kayadan oyma açıklıkların kapı ve pencere gibi elemanları ile kesişerek duraysızlığa maruz kalabilecek bloklar oluşturması da, inceleme alanında blok duraysızlığı açısından önemli diğer bir sorun olarak dikkat çekmektedir.

- 3) Zelve Açık Hava Müzesi'nde eğimleri 84^0 ile 88^0 arasında değişen ve eklem türünde iki adet doğal süreksizlik takımı ile daha az gözlenen bir adet düzensiz ikincil çatlak takımı belirlenmiştir. Doğal süreksizlik takımlarından birinin vadinin doğrultusuna paralel, diğzerinin ise buna hemen hemen dik yönde ve D-B doğrultusunda dizilim gösterdiği belirlenmiştir. Bu süreksizliklerin nispeten geniş aralıklarla tekrarlanıyor olması ve iki ana takımın varlığı, bu bölgedeki duraysızlıkların kütlese bir hareket şeklinde değil, süreksizlik denetimli olarak meydana geldiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, çalışma alanında yapılan gözlemler ve ölçümler sonucunda Zelve tufünün "Temel RMR" değerinin 64 ile 80 arasında değiştiği belirlenmiş olup, bu değişim aralığı "iyi kaya" sınıfına işaret etmektedir. Ancak, kaya malzemesi olarak dikkate alındığında, Zelve tufünün düşük dayanımlı bir kaya türü olduğu da gerçektir.
- 4) Zelve Vadisi'nde tüfler üzerindeki aşınma etkisinin (hızının) belirlenebilmesi amacıyla iki ayrı lokasyonda kaya yüzeylerine yerleştirilen çivilerden yaklaşık 5 yıllık bir süre içinde alınan ölçümlere göre, 1.07 mm ile 6.21 mm arasında değişen bir aşınmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Bu veriye göre, aşınmanın homojen olduğu varsayımıyla, yıllık ortalama aşınma miktarının 0.21 mm ile 1.24 mm arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Bu veriye göre, aşınmanın özellikle vadi tabanına yakın yerlerde göreceli olarak önemli miktarlara ulaştığı ve aşınma miktarlarında kış ve ilkbahar aylarında artış meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca, bu sonuçlar ve vadinin yaklaşık 1000 yıl gibi bir süredir yerleşime açık olduğu dikkate alınırca, sadece doğal nedenlerle kayada oluşabilecek aşınma miktarının Zelve Vadisi açısından oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- 5) Alınan ölçümlere göre; bahar aylarında aşınma ve kavlaklanma miktarlarında gözlenen artış Zelve tufünün özellikle ıslanma – kuruma süreçlerine karşı oldukça duyarlı olduğuna işaret etmektedir.
- 6) Zelve Açık Hava Müzesi'nde yüzeylenen tüften alınan örnekler üzerinde, yapılan X-ışınları kırınım çözümlenmeleri sonucunda kil minerallerinin baskın olduğu belirlenmiş olup, bu durum bozunmanın varlığına işaret etmektedir.

Vadi boyunca ve vadi tabanından tavanına doğru mineral içeriklerinde belirgin bir artış ya da azalma belirlenmemiştir.

- 7) Zelve tufünün dayanım ve deformabilite özellikleri doygun koşullarda kuru koşullara göre %80'e varan oranlarda azalmaktadır. Bu sonuçlar, kayanın özellikle yağışlı mevsimlerde su içeriğinin artacağı düşünüldüğünde, dayanımdaki azalmaya koşul olarak olası duraysızlık sorunlarının bu dönemlerde ivme kazanabileceğine işaret etmektedir.
- 8) Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında, Zelve Vadisi'nde yüzeyleyen tufün dağılmasında ve dayanımının azalmasında ıslanma-kuruma süreçlerinin donma-çözülme süreçlerine göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu gelişmede tuflerin tamamen doygun hale geçememeleri de diğer bir faktördür.
- 9) Zelve Açık Hava Müzesi 1. Vadi girişindeki yamaçta meydana gelmiş olan kama tipi duraysızlık esas alınarak yapılan geriye dönük analiz sonucunda, kama türü yenilmenin gerçekleştiği yamaçta yapılan saha çalışmalarından elde edilen süreksizlik yüzeylelerine ait dayanım parametreleri ile geriye dönük analizlerden elde edilen sonuçların uyumlu oldukları anlaşılmıştır.
- 10) Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki mevcut yamaçların ve/veya yamaç topuklarının duraylılığıyla ilgili sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları arazi çalışmalarında yapılan gözlemlerle de belirlenen ve kayanın açıklık duvarlarına paralel olarak gelişen büyük dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan çekme yenilmeleriyle de uyumludur. Ayrıca, sayısal çözümlemesi yapılan yamaca benzer yamaçlarda ve/veya yamaç topuklarında gelecekte aşınmadan kaynaklanabilecek yenilme türünün, günümüzde de gözlemlendiği şekliyle, tekrarlı bir şekilde yamaç yüzeyinde kalın dilimlerin oluşması ve bunların yamaç yüzeyinden kopmaları şeklinde gelişeceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, kaya kütlelerinin çekme dayanımının aşamalı olarak azaltılmasıyla yapılan analizler sonucunda elde edilen çekme dayanımı değeri, Tuncay (2009) tarafından aynı vadide yer alan bir açıklığa ait duraysızlığın geriye dönük analiz sonuçlarıyla uyumludur. Ayrıca su etkisine maruz kalmayan yamaç için yapılan analizlerin sonuçlarına göre, yamaçların ve yamaç

topuklarının duraylılığı açısından, 1. Vadi'nin tabanında akan derenin oluşturduğu aşındırma etkisi de oldukça önemli bir faktör olarak görünmektedir.

- 11) Zelve Açık Hava Müzesi'nde göreceli olarak daha düzenli bir geometriye sahip üç farklı açıklık için yapılan 3-boyutlu sayısal çözümlerinin sonuçları, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme bölgesinin açıklık yüzeyine paralel olacak şekilde gelişeceğine işaret etmektedir. Bu sonuçlar, arazi çalışmaları sırasında yapılan gözlemlerle belirlenen kavlaklanmalar ve kayanın açıklığın duvarlarına ve tavanına paralel olarak gelişen büyük dilimlenmeler halinde dökülmesiyle sonuçlanan çekme yenilmeleriyle de uyum göstermektedir.
- 12) "Manastır"ın tavanında gözlenen yenilmelerin incelenmesi amacıyla yapılan üç boyutlu sayısal çözümlerinin sonuçları, açıklık çevresinde oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu yenilme bölgesinin açıklık tavanında gelişeceğine işaret etmektedir.

Zelve Açık Hava Müzesi'nin en sorunlu olan 1. Vadisi'nde yapılan bu tez çalışmasının sonuçlarının, müzenin korunması ve iyileştirme önlemleri açısından teknik bir altlık oluşturacağı düşünülmektedir. Kuşkusuz bu çalışmanın amacı söz konusu önlemlere ve korumayla ilgili hususlara yönelik olmayıp, tez yazarının uzmanlık alanına da girmemektedir. Bununla birlikte, bu sahada koruma ve iyileştirme gibi konularda çalışacak olan diğer meslek dallarının mensuplarına yol göstermek amacıyla, bu çalışmanın sonuçları da dikkate alınarak, aşağıda bazı genel öneriler yapılmıştır.

- 1) Zelve Müzesi'nde en önemli sorunlardan biri yamaçlardaki topuk oyulması olup, tezde belirtilen sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, söz konusu sorunun en aza indirilmesi müzenin sürekliliği ve korunması açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla kritik kesimlerde topukların desteklenmesi gerekli olup, gelecekteki oyulmalara karşı kayanın atmosferle temasını kesecek şekilde ve Zelve tüfü de katılmış koruyucu şeffaf püskürtme maddelerinin uygulanabilirliğinin ve estetik – kültürel dokunun zarar görmemesi açısından

avantaj ve dezavantajlarının araştırılması önerilir. Bu amaçla ayrıca, doğal malzemeden hazırlanacak blokların aşınma sonucu gelişmiş oyuklarda topuk olarak kullanılabilirliğinin de üzerinde durulmalıdır.

- 2) Vadide herhangi bir yeraltı suyuyla rastlanılmamış olmakla birlikte, kayanın yağış sularından etkilenmesini önlemek mümkün değildir. Diğer bir ifadeyle, yüzey sularının kayanın içine nüfuz etmesi olağandır. Bu durumda, sadece yüzeyde değil, yarı-yeraltı açıklıklarının içinde yer aldıkları tüfte ıslanma-kuruma ve donma-çözülme süreçleri devam ederek kavlaklanmalarda, dolayısıyla zamanla açıklıkların boyutlarında artış olabilecektir. Bunun en aza indirilebilmesi için bir önceki maddede belirtilen püskürtme malzemelerinin (kimyasalların) kullanılabilirliğinin ve koruma performansının araştırılmasında yarar vardır.
- 3) Süreksizlikler tarafından ayrılmış blokların yerinde tutularak tehlike yaratmaması amacıyla bunların kaya kütesine kaya saplamalarıyla tutturulması düşünülse de, tüflerin yumuşak ve aşınabilir olması nedeniyle kaya saplamalarının işlevini etkin olarak yapamayacağı dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, bu tür tehlikeli blokların temizlenmesi veya koruma amaçlı olarak aşağıdaki maddede belirtilen önlemlerin üzerinde durulması önerilir.
- 4) Yukarıda belirtilen hususların yanı sıra, ziyaretçilerin korunması amacıyla, tehlikeli olarak değerlendirilen açıklıkların ziyarete kapanması, ziyaretçilere baret verilmesi ve en azından tehlikeli alanların çevresinin çitle çevrilmesi gibi önlemler değerlendirilebilir. Nitekim 1. Vadi'nin girişindeki kayadan oyma Geyikli Kilise'de daha önceki yıllarda meydana gelen kısmi bir göçme nedeniyle çevresi çitle kapatılarak ziyarete izin verilmemiş olması, 2009 yılında bu kilisenin tamamen çökmesi sırasında herhangi bir can kaybı veya yaralanma olayını önlemiştir.

KAYNAKLAR

- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1972. Inorganic index to the powder diffraction file: Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Pennsylvania, 1432 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1994. Annual Book of ASTM Standards – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, Construction. V.04.08, ASTM Publication, 978 p.
- Aydan, Ö., and Ulusay, R., 2003. Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 69, 245-272.
- Aydan, Ö. ve Geniş, M., 2004. 3. Amenhotep kaya mezarının (Mısır) çevre kayasının özellikleri ve açıklıkların duraylılığı. KAYAMEK'2004 - 7. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 191-202.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Yüzer, E., Kawamoto, T., Akagi, T., Ito, T., Tokashiki, N., Seiki, T., Tano, H., and Watanabe, H., 1999a. A research on the living environment of Derinkuyu Underground City, Central Turkey (MONBUSHO Research Project No: 09044154) (Japonca).
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Yüzer, E., and Erdoğan, M., 1999b. Man-made rock structures in Cappadocia, Turkey, and their implications in rock mechanics and rock engineering. *ISRM News Journal*, 6 (1), 63-73.
- Aydan, Ö., Tano, H., Watanabe, H., Ulusay, R. ve Tuncay, E., 2007a. Kapadokya Bölgesi'nde antik ve güncel kaya yapılarının kaya mekaniği açısından değerlendirilmesi. Kapadokya Yöresinin Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 17-20 Ekim Niğde, 1-12.
- Aydan, Ö., Tano, H., Ulusay, R., Kumsar, H. ve Yenipınar, H., 2007b. Derinkuyu yeraltı şehrinin uzun süreli yapısal davranışı ve çevre koşullarının incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma. Kapadokya Yöresinin Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 17-20 Ekim Niğde, 24-34.
- Aydan, Ö., Tano, H., Ulusay, R., and Jeong G.C., 2008a. Deterioration of historical structures in Cappadocia (Turkey) and in Thebes (Egypt) in soft rocks and possible remedial measures. Proceedings of the International Symposium of Conservation Science for Cultural Heritage 2008, National Research Institute of Cultural Heritage, Korea, pp. 55-65.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tano, H., Yüzer, E., 2008b. Studies on Derinkuyu antique underground city and its implications in geo-engineering. Proceedings of the First Collaborative Symposium of Turk-Japan Civil Engineers, İstanbul, B. Taşkın and Z. Hasgür (eds.), pp. 75-91.

- Ayrancı, B. 1991. The magnificent volcano of Central Anatolia: Mt. Erciyes near Kayseri. Bull. Tech. Univ. of İstanbul, Special Issue on Tectonics, 44, 375-417.
- Azzoni, A., Barbera, La, G., and Zaninetti, A., 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 32 (7), 709-724.
- Barton, N., 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology, 7, 287-332.
- Bell, F.G., 1978. The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. Engineering Geologist, 12, 1–29.
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications. Wiley-Interscience, New York, 264 p.
- Binal, A., 1996. Aksaray-Ihlara vadisindeki volkanosedimanter kayalarda görülen duraysızlık mekanizmalarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Müh. Böl., Hacettepe Üniversitesi (yayımlanmamış).
- Boving, T.B., and Grathwohl, P., 2001. Tracer diffusion coefficients in sedimentary rocks: correlation to porosity and hydraulic conductivity. Journal of Contaminant Hydrology, 53, 85–100.
- Bowen, R., 1982. The structural conservation of Göreme, Turkey: Hydrogeological aspects. Unesco-ICCROM, 73 p.
- Bowen, R., 1987. Geology and the conservation of antique monuments in Turkey: Environmental Geology Water Sci., 9 (2), 71-84.
- Bowen, R., 1988. The future of the past at Göreme in Turkey. Proc. Int. Symp. on the Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, 2, 731-737.
- Caner, E.N., Türkmenoğlu, A.G., Göktürk, H., Demirci, Ş., and Böke, H., 1988. Examination of surface deterioration of Göreme tuffs for the purpose of conservation. 6th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone, 287-302.
- Chaput, E., 1947. Türkiyede jeolojik ve jeomorfolojik tetkik seyahatleri. İstanbul Üniv. Yayınları, 324, Edebiyat Fakültesi Coğ. Enst. Neşriyatı, 11, 113 p.
- Chau, K., T., Wong, R., H., C., and Lee, C., F., 1998. Rockfall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35 (4/5), 662-663.

- Chen, H., Chen, R-H., and Huang, T-H., 1994. An application of an analytical model to a slope subject to rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(4), 447-458.
- Chen, T., C., Yeung, M., R., and Mori, N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. *Cold Regions Science and Technology* 38, 127-136.
- De Witte, E., 1987. The conservation of the Göreme rock. *Mission Report*, 21 p.
- De Witte, E., 1993. Treatment of the Göreme rock with consolidants and water repellents. *Int. Seminar on the Safeguard of the Rock-Hewn Churches of the Göreme Valley (Abstract)*.
- De Witte, E., Terfve, A., Koestler, R.J., and Charola, A.E., 1988. Conservation of the Göreme rock: preliminary investigations. *Proc. 6th. Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone*, 346-355.
- Deere, D.U., and Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. *Department of Civil Engineering. University of Illinois, Urbana, IL*, pp. 90–101.
- Dorren, L., K., A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27 (1), 69-87.
- Doyuran, V., 1976. Ortahisar'ın çevresel jeolojik sorunları. *T.J.K. Bülteni*, 19, 83-88.
- Dube, A.K., and Singh, B., 1972. Effect of humidity on tensile strength of sandstone. *Journal of Mines, Metals and Fuel*, 20 (1), 8–10.
- Emre, Ö. ve Güner, Y. 1988. Ürgüp yöresi peribacalarının morfojenezi. *Jeomorfoloji Dergisi*, 16, 23-30.
- Ercan, T., 1986. Orta Anadolu'daki Senozoik volkanizması. *M.T.A. Dergisi*, 107, 119-140.
- Erdoğan, M., 1986. Nevşehir-Ürgüp yöresi tüflerinin malzeme jeolojisi açısından araştırılması. *Doktora Tezi, İ.T.Ü. Maden Fak.*, 100 s (yayımlanmamış).
- Erdoğan, M., 1989. Nevşehir tüflerinin hafif yapı gereci olarak değerlendirilebilme olanaklarının araştırılması. *Mühendislik Jeolojisi Bülteni*, 11, 75-82.
- Erdoğan, M., 1991. Causes de deterioration des Eglises Rupestres A Göreme (Cappadoce). *Colloque International, La Détérioration Des Matériaux De Construction, La Rochelle-France*, 167-177.

- Erguvanlı, A.K., and Yüzer, A.E., 1977. Past and present use of underground openings excavated in volcanic tuffs at Cappadocia area. *Rock Storage*, Oslo, 15-17.
- Erguvanlı, K., Yorulmaz, M., Çılı, F., Ahunbay, Z. ve Erdoğan M., 1989. Göreme yapısal koruma ve sağlamlaştırma projesi, El Nazar Kilisesi. İ.T.Ü. Raporu, 46 s.
- Ergüler, Z.A., 2009. Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs. *Engineering Geology*, 105, 186-199.
- Ergüler Z.A., and Ulusay, R., 2007. Estimation of uniaxial compression strength of clay-bearing rocks using needle penetration resistance. *Proceedings of the 11th Congress of International Society for Rock Mechanics*. L. Sousa, C. Olalla and N.F. Grossman (eds.), 9-13 July 2007, Lisbon, Portugal, Taylor&Francis, London, Vol. 1, pp 265-268.
- Ergüler, Z.A., and Ulusay, R., 2009a. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 355–370.
- Ergüler, Z.A., and Ulusay, R., 2009b. Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology* (105), 11-19.
- Esaki, T., and Jiang, K., 1999. Comprehensive study of the weathered condition of welded tuff from a historic stone bridge in Kagoshima, Japan. *Engineering Geology* (55), 121-130.
- Froger, J.L., Lenat, J.L., Chorowicz, J., Pennec, J.L., Bourdier, J.L., Köse, Ö., Zimitoglu, O., Gündoğdu, N.M., and Gourgaud, A., 1998. Hidden calderas evidenced by multisource geophysical data; example of Cappadocian Calderas, Central Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185.
- Garcia-Valles, M., Topal, T., and Vendrel-Saz, M., 2003. Lichenic growth as a factor in the physical deterioration or protection of Cappadocian monuments. *Environmental Geology*, 43 (7), 776-781.
- Giani, G., P., 1992. *Rock Slope Stability Analysis*, A. A. Balkema, 361 p.
- Google, 2011. <http://maps.google.com>, 16 Mayıs 2011.
- Gökçeoğlu, C., 1997. Killi, yoğun süreksizlik içeren ve zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında karşılaşılan güçlüklerin giderilmesine yönelik yaklaşımlar. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 214s (yayımlanmamış).

- Gökçeoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*, 57, 215-237.
- Granier, J., 1976. Les églises rupestres de Cappadoce: Pathologie de la pierre sur un site particulier. *Proc. Int. Symp. on the Conservation of Stone*, Bologna, 45-53.
- Guo, G., Li, L., Yang, Z., Tao, B., Qu, Y., and Zheng, J., 2005. Weathering mechanism of the Cretaceous argillaceous siltstone caverns, Longyou, China. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* (64), 397-407.
- Gündoğdu, M.N., 1982. Neojen Yaşlı Bigadiç Sedimanter Baseninin Jeolojik, Mineralojik ve Jeokimyasal İncelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, 386s. (yayımlanmamış).
- Hachinohe, S., Hiraki, N., and Suzuki, T., 1999. Rates of weathering and temporal changes in strength of bedrock of marine terraces in Boso Peninsula, Japan. *Engineering Geology*, 55, 29-43.
- Hatzor, Y., H., Talesnick, M., and Tsesarsky, M., 2002. Continuous and discontinuous stability analysis of the bell-shaped caverns at Bet Guvrin, Israel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 867-886.
- Hoshino, K., 1993. Geological evaluation from the soil to the rock: Mechanism of lithification and change of mechanical properties. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils–Soft Rocks*, Athens, Rotterdam, Balkema, pp. 131–138.
- Howarth, D.F., and Rowlands, J.C., 1986. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9 (4), 69–79.
- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F., and Villori, L., 1975. The Neogene calcalkaline volcanism of Central Anatolia, geochronological data on Kayseri-Niğde area. *Geological Magazine*, 112 (4), 349-360.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), *Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group*, Kozan Ofset, Ankara, 628 p.
- ITASCA, 2005, *FLAC^{3D}: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Itasca Consulting Group, Minnesota.

- Ito, T., Akagi, T., Seiki, T., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. Long term behaviour of tuffs of Cappadocia. Proc. Japan–Korea Rock Engg. Symp., Fukuoka, Japan, 359–370.
- Kültür Bakanlığı, 2011. <http://www.kultur.gov.tr/TR/belge/1-41264/nevsehir-orenyerleri.html?vurgu=zelve>, 28 Mart 2011.
- Lahn, E., 1941. Aksaray-Konya arasındaki volkanik arazi. M.T.A. Bülteni, 22 (1), 45-47.
- Lahn, E., 1945. Anadolu’da Neojen ve dördüncü zaman volkanizması. Türk Coğrafya Dergisi, 7/8, 37-50.
- Lahn, E., 1949. Orta Anadolu’nun jeolojisi hakkında. T.J.K. Bülteni, 2 (1), 90-107.
- Lashkaripour, G.R., and Nakhaei, M., 2001. A statistical investigation on mudrocks characteristics. In: P. Särkkä and P. Eloranta (eds.), Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK’2001: Rock Mechanics, A Challenge for Society, pp. 131–136.
- Le Pennec J.L., Bourdier, J.L., Froger, J.L., Temel, A., Camus, G., and Gourgau, A., 1994. Neogene ignimbrites of the Nevşehir plateau (Central Turkey): stratigraphy, distribution and source constraints, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 63, 59-87.
- Le Pennec J.L., Temel, A., Froger, J.L., Send, S., Gourgau, A., and Bourdier, J.L., 2005. Stratigraphy and age of the Cappadocia ignimbrites, Turkey: reconciling field constraints with paleontologic, radiochronologic, geochemical and paleomagnetic data. Journal of Volcanology and Geothermal Research (141), 45– 64.
- Lizzi, F., 1982. The structural conservation of Göreme (Turkey), static and civil engineering aspects: UNESCO-ICCROM Report, 52 p.
- Ma, L., and Daemen, J., J., J., 2004. Strain rate – dependence of mechanical properties of welded Topopah Spring tuff. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41 (3), 395-409
- Ma, L., and Daemen, J., J., J., 2006. An experinemtal study on creep of welded tuff. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 282-291.
- Malliet, J., 1988. Building stones: Aspects of conservation. Proc. Int. Symp. on the Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Balkema-Rotterdam, Vol. 2, 877-882.
- Malliet, J., and Rossi, P.P., 1986, Göreme structural consolidation. Mission Report, 32 p.

- Maruto Corporation, 2006. Penetrometer for Soft Rock: Model SH-70 Instruction Manual. Tokyo, Japan.
- Marzorati, S., Luzi, L. and Amicis, M., D., 2002. Rock falls induced by earthquakes : A Statistical Approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 565-577.
- ODTÜ, 1987. Investigation of the mechanisms of stone deterioration for the purpose of conservation of Göreme tuffs. Progress Report, 61 p.
- Ollier, C., 1984. *Weathering Geomorphology Texts*. 2nd ed. Oliver & Boyd, Edinburg.
- Pardo, J.M.F. and Guerro, I.C., 2006. Subterranean wine cellars of Central Spain (Ribera de Duero): An underground built heritage to preserve. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21, 475-484.
- Pasquare, G., 1968. Geology of the Cenozoic volcanic area of Central Anatolia, *Momorie, Serie.8, Vol.9, Fasc.3, Roma*, 57-201.
- Pasquare, G., Poli, S., Vezzoli, C., and Zanchi, A., 1988. Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 146, 217-230.
- Peltier, L.C., 1950. The geographic cycle in periglacial regions. *Annals of the Association of American Geographers*, 40, 214–236.
- Pisoni, C., 1961. Ortaköy (Aksaray), Nevşehir, Avanos ve İncesu bölgeleri jeolojisi, ve petrol imkanları. MTA Raporu, No.2839 (yayımlanmamış).
- Price, N.J., 1960. The compressive strength of coal measure rocks. *Colliery Engineering*, 37 (437), 283–292.
- Rocscience, 2006. PHASE2: Finite Element Analysis for Excavations and Slopes.
- Rocscience., 2009. SWEDGE 5.0: 3D Surface Wedge Analysis for Slopes.
- Roselli, P., 1994. Restoration of rock-hewn churches of the Göreme Valley (Cappadocia, Turkey) and environmental protection. Proc. 3rd Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Venice, 485-492.
- Sanders, M.K., and Fookes, P.G., 1970. A review of the relationship of rock weathering and climate and its significance to foundation engineering. *Engineering Geology*, 4, 289–325.
- Schumacher, R., and Schumacher, U.M., 1997. The pre-ignimbrite (phreato) plinian and phreatomagmatic phases of the Akdag-Zelve ignimbrite

- eruption in Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (78), 139-153.
- Schumacher, R., Keller, J., and Bayhan, H., 1990, Depositional characteristics of ignimbrites in Cappadocia, central Anatolia, Turkey. *Proceedings of the Int. Earth. Sci. Cong. on Aegean Region, Izmir, Vol. 2*, 435-449.
- Seiki, T., Tokashiki, N., Ito, T., Ulusay, R., and Aydan, Ö., 1999. The stability assessment of underground structures in Cappadocia. In: *Proc. Japan-Korea Rock Engg. Symp.*, Fukuoka, Japan, 113-124.
- Sönmez, H., and Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-96.
- Sür, Ö. 1966. Nevşehir ve Ürgüp çevresinde jeomorfoloji araştırmaları. *Coğrafya Araştırmaları Dergisi*, 1, 179-199.
- Sür, Ö. 1972. Türkiye'nin, özellikle İç Anadolu'nun genç volkanik alanlarının jeomorfolojisi. *Ankara Üniv. Dil ve Tarih Coğ. Fak. Yayın No.223*, 119 s.
- Temel, A., 1992. Kapadokya eksploziv volkanizmasının petrolojik ve jeokimyasal özellikleri. *Doktora Tezi, Jeoloji Müh. Böl., Hacettepe Üniv.*, 208 s (yayımlanmamış).
- Temel, A., and Gündoğdu, M.N., 1996. Zeolite occurrences and erionite-mesothelioma relationship in Cappadocia region, Central Anatolia, Turkey. *Mineralium Deposita*, 31, 539-547.
- Temel, A., Gündoğdu, M.N., Ground, A., and Le Pennec, J.L., 1998. Ignimbrites of Cappadocia (Central Anatolia-Turkey): petrology and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 447-471.
- Topal, T., 1995. Formation and deterioration of fairy chimneys of the Kavak tuff in Ürgüp-Göreme area (Nevşehir-Turkey). *PhD. Thesis, Dept. of Geological Engng., Middle East Tech. University* (unpublished).
- Topal, T., and Doyuran, V., 1994. Effect of deterioration on the chemical and physical properties of Göreme tuffs. *Proc. 7th. Int. Cong. of IAEG, Lisboa*, 5, 3527-3536.
- Topal, T., and Doyuran, V., 1995. Effect of discontinuities on the development of fairy chimneys in the Cappadocia region (Central Anatolia-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences (TÜBITAK)*, 4 (1), 49-54.
- Topal, T., and Doyuran, V., 1996. Ultrasonic testing of artificially weathered Cappadocian tuff. *LCP-95 Congress on Preservation and Restoration of Cultural Heritage, Montreux*, 205-211.

- Topal, T., and Doyuran, V., 1997. Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, 47, 175-187.
- Topal, T., and Doyuran, V., 1998. Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental Geology*, 34 (1), 5-20.
- Toprak, V., 1994. Central Kızılırmak fault zone: Northern margin of Central Anatolian. *Volcanics. Journal of Earth Sciences*, 3, 29-38.
- Toprak, V., and Göncüoğlu, C., 1993. Tectonic control on the development of Neogene-Quaternary Central Anatolian Volcanic Province, Turkey. *Geol. J.*, 28, 357-369.
- Toprak V., Keller, J., and Schumacher, R., 1994. Volcano-tectonic features of the Cappadocian Volcanic Province. *International Volcanological Congress IAVCEI-Ankara, Excursion Guide*, 58 p.
- Tromp, S.W., 1942. Niğde-İncesu, Kızılırmak ve Tuzgölü arasında bulunan mintikaların jeolojik etüdü. *MTA Raporu, No.1450 (yayımlanmamış)*.
- Tuncay, E., 2009. Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in Cappadocia Region (Turkey). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 1253-1266.
- Tunusluoğlu, C. ve Zorlu, K., 2007. Ortahisar Kalesi'nin (Kapadokya) Kaya Düşme Tehlikesi Açısından Değerlendirilmesi. *Kapadokya Yöresinin Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, 17-20 Ekim Niğde, 43-52.
- Türkmenoğlu, A.G., Göktürk, E.H., and Caner, E.N., 1991. The deterioration of tuffs from the Cappadocia region of Turkey. *Archaeometry*, 33 (2), 231-238.
- Ulusay, R. ve Aydan, Ö., 2007. Kapadokya Bölgesi'nde bazı yeraltı açıklıklarındaki tüflerin kaya mühendisliği açısından değerlendirilmesi. *Kapadokya Yöresinin Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, 17-20 Ekim Niğde, 13-23.
- Ulusay, R., and Aydan, Ö., 2010. Geo-engineering characteristics of the soft tuffs and some assessments on the man-made rock structures in Cappadocia, Turkey. *Proceedings of the 12th IAEG Congress*, A. Williams et al. (eds.), Auckland, New Zealand, pp. 3733-3740.
- Ulusay, R., Yoleri, M.F., Çağlan, D., and Arıkan, F., 1995. Design evaluations for spoil piles at a strip coal mine considering safety of the haul road. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 9, 133-140.

- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., and Binal, A., 1997. Physical and mechanical properties of the tuff samples from Cappadocia Region. Technical Report, 32 p (yayımlanmamış).
- Ulusay, R., Akagi, T., Ito, T., Seiki, T., Yüzer, E., and Aydan, Ö., 1999. Long term mechanical characteristics of Cappadocia tuff. International Congress on Rock Mechanics, Paris, France, 687-690.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z.A., and Kaşmer, Ö., 2006. Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology* 50, 473 – 494.
- Ünlü, J., 1993. The significance of color differentiation in tuffs from Göreme area. MSc Thesis, Middle East Technical University, Dept. of Geological Engineering, 63 p (unpublished).
- Vernik, L., Bruno, M., and Bovberg, C., 1993. Empirical relations between compressive strength and porosity of siliciclastic rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30, 677–680.
- Wasowski, J., and Gaudio, V., D., 2000. Evaluating seismically induced mass movement hazard in Caramanico Terme (Italy). *Engineering Geology*, 58, 291-311.
- Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. The initial stress state in Cappadocia. *Proc. Japan-Korea Rock Engineering Symposium Fukuoka, Japan*, 249-260.
- Weinert, H.H., 1964. Basic igneous rocks in road foundations. CSIR Research Report 218. *Bulletin of the National Institute of Road Research, Preterio*, p. 5.
- Yan, H., Zhiyi, L., Zhifa, Y., and Jianfeng, W., 2001. Engineering geology of Lingquansi Cave Temple, People's Republic of China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 60, 43-57.
- Yassaghi, A., Salari, H., and Kanani, H., 2004. Geomechanical evaluations of Karaj tuffs for rock tunneling in Tehran-Shomal Freeway, Iran. *Engineering Geology*, 77, 83-98.
- Yilmazer, İ., 1986. Preliminary hydrogeological investigation of the Göreme Historical National Park. Tripartite Review meeting on Structural Conservation of Göreme, General Directorate of Antiquities and Museums, 12 p.

Yilmazer, İ., 1993. Time factor accelerating deterioration at the Göreme Historical Site. Int. Seminar on the Safeguard of the Rock-Hewn Churches of the Göreme Valley (Abstract).

Yokota, S., and Iwamatsu, A., 1999. Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. *Engineering Geology*, 55, 57-68.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı,: Özgü KAŞMER
Doğum Yeri: Ankara
Tarihi: 1977

İş Deneyimi:

Araştırma Görevlisi (2001 -2006): Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Y. Mühendis (2006 – ...): Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Dış İlişkiler ve AB Dairesi Başkanlığı

Eğitim Durumu

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (1996-2001)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı (2001-2004)

Doktora : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı (2006- 2011)

Yüksek Lisans

Tez Konusu : Kangal (Sivas) Linyit Açık İşletmesindeki Toprak Dökümlerinin Duraylılığını Denetleyen Faktörlerin Araştırılması ve Döküm Şevlerinin Tasarımı.

A) YAYINLAR

Sönmez, H., **Kaşmer, Ö.** ve Tuncay, E., 2003. Ankara aglomerasında nihai taşıma gücünün farklı yöntemlerle belirlenmesi. Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 10. Yıl Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 15-18 Ekim 2003, Mersin

Ercanoğlu, M. and **Kaşmer, Ö.**, 2004. Kinematic analysis and GIS based evaluation of possible rock slope instabilities in Altindag district of Ankara city. 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Greece, 14-20 April 2004

- Kaşmer, Ö.**, Ulusay, R., and Gökçeoğlu, C., 2005. Engineering geological characteristics of a failed coal mine waste dump and evaluation of failure mechanism. Proceedings of the IAEG Sponsored International Symposium on Latest Natural Disasters – New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection, 5-8 September, Sofia, Bulgaria (on CD).
- Kaşmer, Ö.**, Ulusay, R., and Gökçeoğlu, C., 2006. Spoil pile instabilities with reference to a strip coal mine in Turkey: mechanisms and assessment of deformations. *Environmental Geology* 49, 570-585.
- Kaşmer, Ö.** and Ulusay, R., 2006. Stability of spoil piles at two strip coal mines in Turkey: Geotechnical characterization and design considerations. *Environmental & Engineering Geoscience* Vol. 12, No. 4, 337-352.
- Ercanoğlu, M., **Kaşmer, Ö.** ve Temiz, N., 2006. Heyelan veri tabanlarının bilgisayar destekli oluşturulması: Ulus (Bartın) Örneği. 59. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, pp: 337
- Ercanoğlu, M., **Kaşmer, Ö.**, Temiz, N. ve Weber, K.T., 2006. Kumluca (Bartın) bölgesinde heyelana duyarlı alanların uydu görüntüleri ve yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak sınıflandırılması. Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, Denizli, 55-61.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z.A., and **Kaşmer, Ö.**, 2006. Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology* 50, 473 – 494.
- Ercanoğlu, M., **Kaşmer, Ö.** ve Temiz, N., 2007. Batı Karadeniz Bölgesi'nde heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, 6-7 Eylül 2007, İstanbul, 178-187.
- Ercanoğlu, M., Temiz, N. ve **Kaşmer, Ö.**, 2007. Heyelan duyarlılığının değerlendirilmesinde bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının kullanımına yönelik bir çalışma. 60. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, pp. 307.

Kaşmer, Ö., Ulusay, R. ve Aydan, Ö., 2007. Zelve Açık Hava Müzesi'ndeki (Kapadokya) antik yeraltı açıklıklarının duraylılığını etkileyen faktörlerle ilgili ön değerlendirmeler. Erdoğan Yüzer Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 6-7 Eylül, İstanbul, M. Erdoğan ve H.T.Yalçın (eds.), 24-35

Kaşmer, Ö., Ulusay, R., ve Aydan, Ö., 2008. Preliminary assessments of the factors affecting the stability of antique underground openings at the Zelve Open Air Museum (Cappadocia, Turkey). EUROENGE02008: 2nd European Conference of International Association for Engineering Geology, 15-19 September 2008 (full paper on CD).

Ercanoğlu, M., **Kaşmer, Ö.** ve Temiz, N., 2008. Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol: 67, No:4, 565-578.

Ito, T., Aydan, Ö., Ulusay, R., ve **Kaşmer, Ö.**, 2008. Creep characteristics of tuff in the vicinity of Zelve antique settlement in Cappadocia region of Turkey. ISRM Int. Symp. 337-345.

Kaşmer, Ö., Ulusay R., Aydan, Ö., and Geniş, M., 2011. Assessments on the Factors Affecting the Stability of Antique Underground Openings at the Zelve Open Air Museum (Cappadocia, Turkey). AEG News 2011 Annual Meeting Program With Abstracts, Vol.54, pp. 113-114.

C) YERALDIĞI ARAŞTIRMA VE UYGULAMA PROJELERİ:

Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Çiner, A., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z.A. ve **Kaşmer, Ö.**, 2004. "Ürgüp-Kayakapı Kültürel ve Doğal Çevre Koruma ve Canlandırma Projesi" Kapsamında Kayakapı Mahallesi'nde Kaya Düşmesi Olasılığının ve Kayadam Mekanlarının Jeolojik-Jeoteknik Açından İncelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Vakfı. 173 s (Uygulama Projesi).

Ercanoğlu, M., Temiz, N. ve **Kaşmer, Ö.**, 2006 Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesinde Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağlarının Kullanımının Araştırılması. 186 s. TÜBİTAK YDABAG, Proje No: 103Y126 (Araştırma Projesi).

