

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DERİNKUYU (NEVŞEHİR) YERLEŞİMİNDEKİ SİĞ
YERALTI KAYA OYMA YAPILARIN
DURAYLILIĞININ İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Doğın DOLAP**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mutluhan AKIN**

**Jeoloji Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Haziran 2019
NEVŞEHİR**

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Doğan DOLAP

Doç.Dr. Mutluhan AKIN danışmanlığında **Doğan DOLAP** tarafından hazırlanan “**Derinkuyu (Nevşehir) Yerleşimindeki Sığ Yeraltı Kaya Oyma Yapıların Duraylılığının İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

12/06/2019

JÜRİ

Başkan : Doç.Dr. Ali ÖZVAN

Üye : Doç.Dr. İsmail DİNÇER

Üye : Doç.Dr. Mutluhan AKIN

ONAY

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun **02./07/2019** tarih ve **40-387**... Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

02./07/2019
Prof.Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mutluhan AKIN'a,

Değerli Jüri Başkanım Doç. Dr. Ali ÖZVAN'a,

Her daim yanımda hissettiğim, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen hiçbir fedakârlıktan kaçınmayarak beni bu günlere getiren, arkamda duran çok değerli eşim ve aileme,

Desteklerinden dolayı Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri Doç. Dr. İsmail DİNÇER'e, Dr. Öğretim Üyesi Ahmet ORHAN'a, Dr. Öğretim Üyesi Ayşe ORHAN'a,

Çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Derinkuyu Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü Personeli Harita Teknikeri Çağan KARATAŞ'a, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne ve Ankara Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüd Proje Müh. Müş. İnş. San. Tic. Ltd. Şti Laboratuvarı'na sonsuz teşekkür ederim.

DERİNKUYU (NEVŞEHİR) YERLEŞİMİNDEKİ SIĞ YERALTI KAYA OYMA YAPILARIN DURAYLILIĞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Doğan DOLAP

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2019

ÖZET

Derinkuyu İlçesi Nevşehir'e 30 km mesafede turistik bir yerleşimdir. Derinkuyu'nun Kapadokya Bölgesinde bilinmesine neden olan en önemli yapı yeraltı şehridir. Hitit döneminde oyulduğu düşünülen bu şehirde birbiriyle bağlantılı kaya oyma mekanlar yerin içerisine doğru farklı katlarda oyulmuşlardır. Derinkuyu yerleşiminin kolay kazılabilir ve zayıf dayanıma sahip ignimbirit birimi üzerinde yer alması sebebiyle, söz konusu turistik yeraltı şehrinin yanı sıra, mevcut konutların altında farklı boyutlarda ve düzensiz geometriye sahip çok sayıda irili ufaklı kaya oyma mekan yer almaktadır. Ancak, bu kaya oyma yapılarının yeraltındaki yayılımı ve boyutları ile ilgili resmi ve düzenli bir kayıt sistemi olmadığı için zaman zaman bu yeraltı boşluklarında duraysızlıklar meydana gelmektedir. Bu duraysızlıkların yüzeydeki etkileri de istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında Derinkuyu ilçe merkezi içerisinde yer alan rölöve projeleri hazırlanmış iki farklı parsel içerisinde yer alan kaya oyma mekanların duraylılığı sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, RMR ve GSI abakları kullanılarak Kaya Kütle Kalitesi değerinin iyi olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra İncelenen siğ yeraltı boşluklarına etki eden gerilmeler belirlenmiş ve malzemenin dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, ignimbiritlerde herhangi bir ayrışma gözlenmediği ve bu açıklıkların farklı yönelimlere sahip süreksizlik setleri ile kesilmediği durumda göçme olayı ile karşılaşmayacağı saptanmıştır. Öte yandan açık tavanlarda yerçekimi etkisiyle oluşacak çekme gerilmelerinin malzeme çekme dayanımını aşmaması için yeraltı boşluklarının tavanında yüzeye kadar minimum 1 (bir) metrelik örtü kalınlığı bulunması gerekmektedir.

İnceleme alanındaki sığ yeraltı boşluklarının duraylılığına etki eden unsurların değerlendirilmesi amacıyla incelenen yeraltı boşluklarına ait modellere tavanda ayrışma zonu ve iki adet süreksizlik seti varsayımları eklenerek analizler tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu analizler neticesinde Derinkuyu ve çevresindeki sığ kaya oyma mekanların duraylılığına olumsuz yönde etki eden en önemli unsurların ayrışma ve süreksizlikler olduğu ortaya konmuştur. Yerleşim genelinde bu tür problemlerin yaşanmaması için drenaj tedbirlerinin alınması (örn. yağmursuyu şebekesi vb.) ve düzenli bir envanter sisteminin oluşturulması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler:Kaya oyma mekan, ignimbirit, Derinkuyu, sonlu elemanlar analizi, ayrışma, çökme
Tez Danışmanı:Doç.Dr. Mutluhan AKIN
Sayfa Adedi:65

EVALUATION OF THE STABILITY OF SHALLOW UNDERGROUND ROCK HEWN STRUCTURES IN DERİNKUYU (NEVŞEHİR) SETTLEMENT

(M. Sc. Thesis)

Doğan DOLAP

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

June 2019

ABSTRACT

Derinkuyu district is a touristic settlement 30 km away from Nevşehir. The most important structure of Derinkuyu is the underground city which highlights the settlement in the Cappadocia region. In this underground city, which is thought to have been carved during the Hittite period, rock carved rooms connected to each other were carved on different floors towards the ground. Besides the underground city, due to the fact that the Derinkuyu settlement is located on an easily excavated and weak ignimbrite unit, there are a number of large and small rock hewn spaces with irregular geometries and different sizes under the existing houses. But, since there is no formal and regular registration system related to the underground expansion of these rock-carved structures and their dimensions, there is occasional instability in these underground structures. The effects of these instabilities on the surface cause undesired results.

Within the scope of this thesis, the stability of the surveyed rock hewn rooms in a couple of different parcels in Derinkuyu district was evaluated with the analyses carried out by finite element method. In addition, the rock mass quality was determined to be good by using the RMR and GSI methods. Then, the stresses affecting the examined shallow underground cavities were determined and compared with the strength values of the material. As a result of the analyses performed, it was determined that collapse will not be observed in ignimbrites unless these cavities are significantly weathered and are not cut by discontinuity sets with different orientations. On the other hand, in order to prevent the exceedance of the tensile stresses caused by the gravity over the material tensile strength, there should be a minimum thickness of 1 (one) meter to the surface in the ceiling of underground cavities.

In order to evaluate the factors affecting the stability of the shallow underground spaces in the investigation area, a weathering zone and two sets of discontinuities were assumed in the models belonging to the underground spaces that were investigated and the analyses were carried out again. As a result of these analyses, the most important factors affecting the stability of the shallow rock hewn structures in Derinkuyu district are the weathering and discontinuities. Drainage measures should be taken in order to avoid such problems throughout the settlement (stormwater network etc.) and a regular inventory system needs to be established.

Key Words: Rock hewn structures, Ignimbrite, Derinkuyu, finite element analysis, weathering, collapse
Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mutluhan AKIN
Page Number:65

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	4
1.2. Coğrafi Konum ve İnceleme Alanı	8
1.3. İklim ve Bitki Örtüsü	9
1.4. Yüzey Şekilleri ve Akarsu Ağı	9
1.5. Bölgesel Jeoloji	9
1.6. İnceleme Alanı Jeolojisi.....	11
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	13
BÖLÜM 3	

MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Materyal	15
3.2. Yöntem.....	18
3.2.1. Literatür Taraması.....	18
3.2.2. Arazi Çalışmaları	19
3.2.3. Labartuvar Çalışmaları.....	20
3.2.3.1. Kuru ve Doygun, Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlıklarının Tespiti.....	20
3.2.3.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımının Tespiti.....	21
3.2.3.3. Elastisite Modülü, Poisson Oranı ve Brazilan Çekme Dayanımı Tespiti	21
3.2.4. Büro Çalışmaları	21
BÖLÜM 4	
BULGULAR.....	23
4.1. İgnimbiritlerin Kaya Malzemesi Özellikleri	23
4.2. İncelenen Yeraltı Açıklıklarındaki İgnimbiritlerin Kaya Kütle Özellikleri ..	25
4.3. İncelenen Yeraltı Açıklıklarındaki İgnimbiritlerin Kaya Kütle Özelliklerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) Yardımıyla Değerlendirilmesi.....	29
4.4. Derinkuyu İgnimbiritlerinin Kütleli Dayanım ve Deformasyon Özellikleri	31
4.5. İncelenen Yeraltı Açıklıklarında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizler ...	34
4.5.1. Lokasyon 1/Kesit 1'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	36
4.5.2. Lokasyon 1/Kesit 2'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	40

4.5.3.	Lokasyon 2/Kesit 1'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	43
4.5.4	Lokasyon 2/Kesit 2'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	46
4.6.	İncelenen Yeraltı Açıklıklarında Analitik Yöntemlerle Gerilme Analizi	49
4.7.	Ayrışmanın ve Süreksizliklerin Yeraltı Açıklıklarının Duraylılığı Üzerindeki Etkisi	52

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Tarihi kaya oyma mekândan bir görünüm	3
Şekil 1.2	Güncel olarak açılmış kaya oyma mekanlardan görünüm.....	4
Şekil 1.3	İnceleme alanı yerbulduru haritası	5
Şekil 1.4	Tez çalışması kapsamında incelenen Derinkuyu İlçesi, N. Kemal Mahallesi 10 ada 4 parselin görünümü (Lokasyon-1)	7
Şekil 1.5	Tez çalışması kapsamında incelenen Derinkuyu İlçesi, Baş Mahalle 105 ada 1 parselin görünümü (Lokasyon-2)	8
Şekil 1.6	Derinkuyu ve çevresine ait kabartı haritası [8]	10
Şekil 1.7	Derinkuyu ve yakın çevresinin bölgesel jeoloji haritası [8].....	12
Şekil 3.1	Lokasyon-1’de yer alan yeraltı kaya oyma mekânlara ait vaziyet planı	16
Şekil 3.2	Lokasyon-2’de yer alan yeraltı kaya oyma mekânlara ait vaziyet planı	17
Şekil 3.3	İncelenen lokasyonlarda yer alan ignimbiritten alınan karot örneğinden bir görünüm	18
Şekil 3.4	Lokasyon-1’de bulunan kaya oyma mekânın iç kısmından bir görünüm	19
Şekil 3.5	Lokasyon-2’de bulunan kaya oyma mekânın iç kısmından bir görünüm	20
Şekil 3.6	Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonrası yenilen karot numunesi.....	21
Şekil 4.1	İnceleme sahasındaki ignimbirit için modül oranının Deere ve Miller [15] sınıflamasına göre belirlenmesi.....	24
Şekil 4.2	İncelenen yeraltı açıklıklarındaki ignimbiritlerin kazı açıklığına bağlı olarak desteksiz kalma süresi	29
Şekil 4.3	İncelenen yeraltı açıklıklarında GSI puanının kantitatif abak yardımıyla belirlenmesi	31

Şekil 4.4	Boşluk veya örnek boyutunun artmasına bağlı olarak kaya malzemesinden kaya kütlesi davranışına geçiş [21]	32
Şekil 4.5	Derinkuyu ignimbiritleri için hazırlanan kaya kütlesi yenilme zarfı	34
Şekil 4.6	Lokasyon-1/Kesit-1’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	37
Şekil 4.7	Lokasyon-1/Kesit-1’de yüzeyden itibaren açıklık tavanına etkiyen normal gerilme grafiği	38
Şekil 4.8	Lokasyon-1/Kesit-1’de dayanım faktörü dağılımı	38
Şekil 4.9	Lokasyon-1/Kesit-1’de düşey yerdeğiştirme dağılımı	39
Şekil 4.10	Lokasyon-1/Kesit-1’de hacimsel deformasyon dağılımı	40
Şekil 4.11	Lokasyon-1/Kesit-2’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	41
Şekil 4.12	Lokasyon-1/Kesit-2’de dayanım faktörü dağılımı	41
Şekil 4.13	Lokasyon-1/Kesit-2’de düşey yerdeğiştirme dağılımı	42
Şekil 4.14	Lokasyon-1/Kesit-1’de hacimsel deformasyon dağılımı	42
Şekil 4.15	Lokasyon-2/Kesit-1’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	43
Şekil 4.16	Lokasyon-2/Kesit-1’de dayanım faktörü dağılımı	44
Şekil 4.17	Lokasyon-2/Kesit-1’de düşey yerdeğiştirme dağılımı	45
Şekil 4.18	Lokasyon-2/Kesit-1’de hacimsel deformasyon dağılımı	45
Şekil 4.19	Lokasyon-2/Kesit-2’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	46
Şekil 4.20	Lokasyon-2/Kesit-2’de dayanım faktörü dağılımı	47
Şekil 4.21	Lokasyon-2/Kesit-2’de düşey yerdeğiştirme dağılımı	48
Şekil 4.22	Tez çalışması kapsamında incelenen Derinkuyu İlçesi, N. Kemal Mahallesi 10 ada 4 parselin görünümü (Lokasyon-1)	48

Şekil 4.23 Yeraltı açıklık tavanında oluşan çekme gerilmelerinin kaya malzemesi çekme dayanımı ile karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.24 Lokasyon-1/Kesit-1’de açıklık tavanında ayrışma zonu varsayımı.....	53
Şekil 4.25 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	54
Şekil 4.26 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre dayanım faktörü dağılımı.....	55
Şekil 4.27 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre dayanım faktörünün deforme olmuş ağ görünümü.....	55
Şekil 4.28 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre düşey yerdeğiştirme dağılımı.....	56
Şekil 4.29 Lokasyon-1/Kesit-1’de açıklık tavanında kama bloğu oluşturan iki adet süreksizlik bulunması varsayımı	57
Şekil 4.30 Lokasyon-1/Kesit-1’de süreksizlik varsayımına göre maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı	58
Şekil 4.31 Lokasyon-1/Kesit-1’de süreksizlik varsayımına göre dayanım faktörü dağılımı	58
Şekil 4.32 Lokasyon-1/Kesit-1’de süreksizlik varsayımına göre düşey yer değıştirme dağılımı	59

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1	İnceleme alanlarındaki ignimbiritlerin fiziko-mekanik özellikleri	23
Tablo 4.2	RMR sınıflama sistemi parametreleri ve puan tablosu [17]	26
Tablo 4.3	Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması için önerilen kılavuz [17]....	27
Tablo 4.4	İnceleme sahasındaki ignimbirit birimine ait RMR puanlama tablosu ve temel RMR puanı	28
Tablo 4.5	Sonlu elemanlar analizlerinde ignimbiritlere ait malzeme özellikleri	36
Tablo 4.6	Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'deki farklı kesit hatlarına ait yeraltı açıklıklarında oluşan çekme ve makaslama gerilmesi değerleri	50
Tablo 4.7	Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'deki farklı kesit hatlarına ait yeraltı açıklıklarında yenilme olmadan oluşturulabilecek minimum örtü kalınlığı (t) değerleri.....	52
Tablo 4.8	Sonlu elemanlar analizlerinde yeraltı açıklık tabanında olduğu varsayılan ayrışma zonuna ait malzeme özellikleri	53

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

km	Kilometre
km²	Kilometrekare
mm	Milimetre
KVK	Kapadokya Volkanik Kompleksi
OAVP	Orta Anadolu Volkanik Provensi
KD-GB	Kuzeydoğu Güneybatı
Tüi	İncesu Üyesi
Qe	Eski Alüvyon
Qeal	Eski alüvyon birimleri
cm	Santimetre
m	Metre
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
ISRM	International Society of Rock Mechanics
RS2	RS2 programı
kN/s	Kilonewton/saniye
kPa	Kilopascal
MPa	Megapascal
kN/m³	Kilonewton/metreküp
RMR	Kaya Kütle Kalitesi
RQD	Kaya Kalite Göstergesi

GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
SR	Yapısal Özellik Puanı
SCR	Süreksizlik Özellik Koşulu
D	Örselenme Faktörü
σ_1'	Yenilme anındaki maksimum asal efektif gerilme
σ_3'	Yenilme anındaki minimum asal efektif gerilme
σ_c	Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
m_b, s ve a	Kayanın özelliklerine bağlı Hoek-Brown sabitleri
σ_t	Çekme gerilmesi
G	Yerçekimi ivmesi
γ	Tavan seviyesi üstündeki kayanın birim hacim ağırlığı
T	Yüzeyden açıklık tavanına olan derinlik, tavan (örtü yükü) kalınlığı
L	Açıklık genişliği

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kayadan oyma mekânlar özellikle zayıf dayanıma sahip bir kaya kütlelerinin çeşitli amaçlara hizmet edecek bir boşluk oluşturmak için oyularak şekillendirilmesiyle meydana getirilmektedir. İnsan gücü ile açılmış yeraltı boşlukları kaya oyma yapı sınıfına girerken, jeolojik süreç içerisinde doğal yollarla oluşmuş mağaralar veya düşey oyuklar da bu sınıfa girmemektedir [1].

Bir bölgenin sahip olduğu fiziksel, kültürel ve sosyal konumu farklı şekillerde kaya oyma yapıların ortaya çıkmasına neden olmuştur [2]. Kaya oyma yapılar ülkemizde başlıca Kapadokya, Hasankeyf, Dalyan, Demre, Kaş ve Fethiye bölgelerinde gözlenmektedir. Kapadokya Bölgesi kaya oyma yapıları binlerce yıl önce kazılmış olup, pek çoğu halen kullanılmaktadır [3]. Öte yandan, farklı kaya türlerinin oyulmasıyla Mısır'da, Kıbrıs'ta, İtalya'da, İran'da, Ürdün'de, Hindistan'da, İspanya'da, Çin'de ve Etiyopya'da farklı amaçlar için kaya oyma mekânlar oluşturulmuştur [1]. Kaya oyma yapılar genel olarak gelişigüzel bir iç geometriye sahiptir. Ancak, özellikle ibadet amaçlı açılan yeraltı boşluklarında geleneksel mimaride kullanılan kemer, kolon, kubbe, tonoz gibi formların oyularak oluşturulduğu da görülebilmektedir. Kaya oyma mekânların oluşturulmasında, kaya kütlelerinin kolay kazılabilme ve şekillendirilebilme özelliği en önemli etkidir.

Kaya oyma yapıların ortaya çıkmasında güvenlik ve savunma, ekonomi, zaman, kültür, iklim ve sosyal yapı olmak üzere altı ana etken ön plana çıkmaktadır. [4]. Kapadokya bölgesindeki kaya oyma yapıların ortaya çıkmasındaki çevresel ve antropojenik faktörleri altı ana grupta değerlendirmişlerdir:

- a) Bölgedeki iklimsel koşulların ani değişimleri
- b) Kayaçların termal yalıtım özellikleri
- c) Kayaların kendi kendini tutma özelliğine bağlı olarak kaya kütlesi içinde kazı imkânı
- d) Kayaçların kolay işlenebilir olması
- e) Düşman saldırılarına karşı korunma ile saklanma ve kamufle edilme kaynaklanan

savunma üstünlüğü

f) Deprem ve volkanizmadan kaynaklanan doğal afetlere karşı korunma

Kaya oyma yapılar kullanımlarına göre yaşam ve savunma, ibadet mekânı ve mezar yapısı olmak üzere dört ana sınıfa ayrılabilir. Kapadokya'daki Bizans kültürünü yansıtan kaya oyma boşluklar sadece mezar ve kiliselerden değil, aynı zamanda manastır ve yaşam alanlarından da oluşmaktadır [5] (Şekil 1.1). Kapadokya bölgesinde 1500 yıldan daha yaşlı birçok kaya oyma yapı bulunmakta olup, bunların dış görünüşleri doğal morfolojiye uygun bir yapı sergilerken, iç mekânlarında ise oldukça karmaşık ve detaylı bir yapının olduğu gözlenmektedir [6]. Farklı boyut ve şekillerde kazılmış olan bu yeraltı açıklıkları günümüzde de konaklama, yaşam ve depolama amaçlı kullanılmaktadır (Şekil 1.2). Kalın, massif tüfler içerisinde açılmış olan bu yapılar birkaç yüzyıldır ilksel bütünlüklerini korumalarına rağmen, bazı lokasyonlarda kısmi göçmeler ve yenilme izleri gözlenmektedir [6]. Bu yapıların büyük bir kısmının kültürel bir varlık olması nedeniyle korunmaları ve gelecek nesillere aktarılmaları büyük önem taşımaktadır. Bundan dolayı, kaya oyma yapılarda meydana gelen duraysızlıkların neden olduğu afet durumunun iyileştirilmesine yönelik çalışmalar son dönemlerde artış göstermiştir.



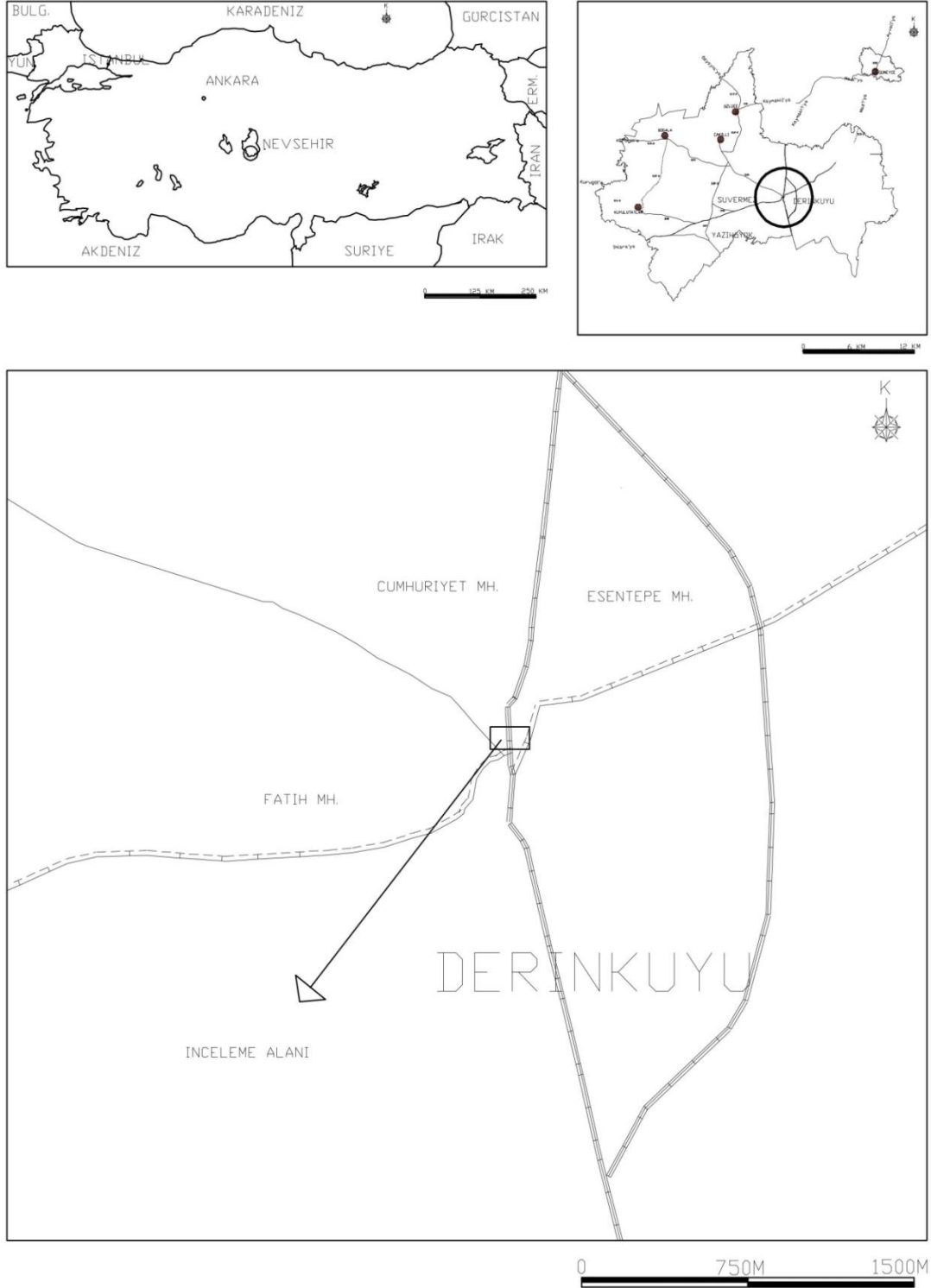
Şekil 1.1. Tarihi kaya oyma mekândan bir görünüm



Şekil 1.2. Güncel olarak açılmış kaya oyma mekanlardan görünümeler

1.1. Amaç ve Kapsam

Derinkuyu ilçesi Kapadokya Bölgesi içerisinde Nevşehir ilinin güneyinde bulunan bir ilçedir (Şekil 1.3). Derinkuyu'ya ilk yerleşen ve yaşamlarını sürdüren yerliler Asur Kolonilerine kadar uzanmaktadır. Bölgedeki en önemli turistik yapı olan Derinkuyu Yeraltı şehri, saklanma ve barınma amacıyla oyulmuş ve günlük insan ihtiyaçlarını karşılayacak kapasitede çeşitli kaya oyma mekânlara sahiptir [1].



Şekil 1.3 İnceleme alanı yerbulduru haritası

Derinkuyu ilçesinde söz konusu yeraltı mekânlar sadece herkes tarafından bilinen yeraltı şehri bölgesinde değildir. İlçe merkezi genelinde 40 hektarlık alanda, özellikle de

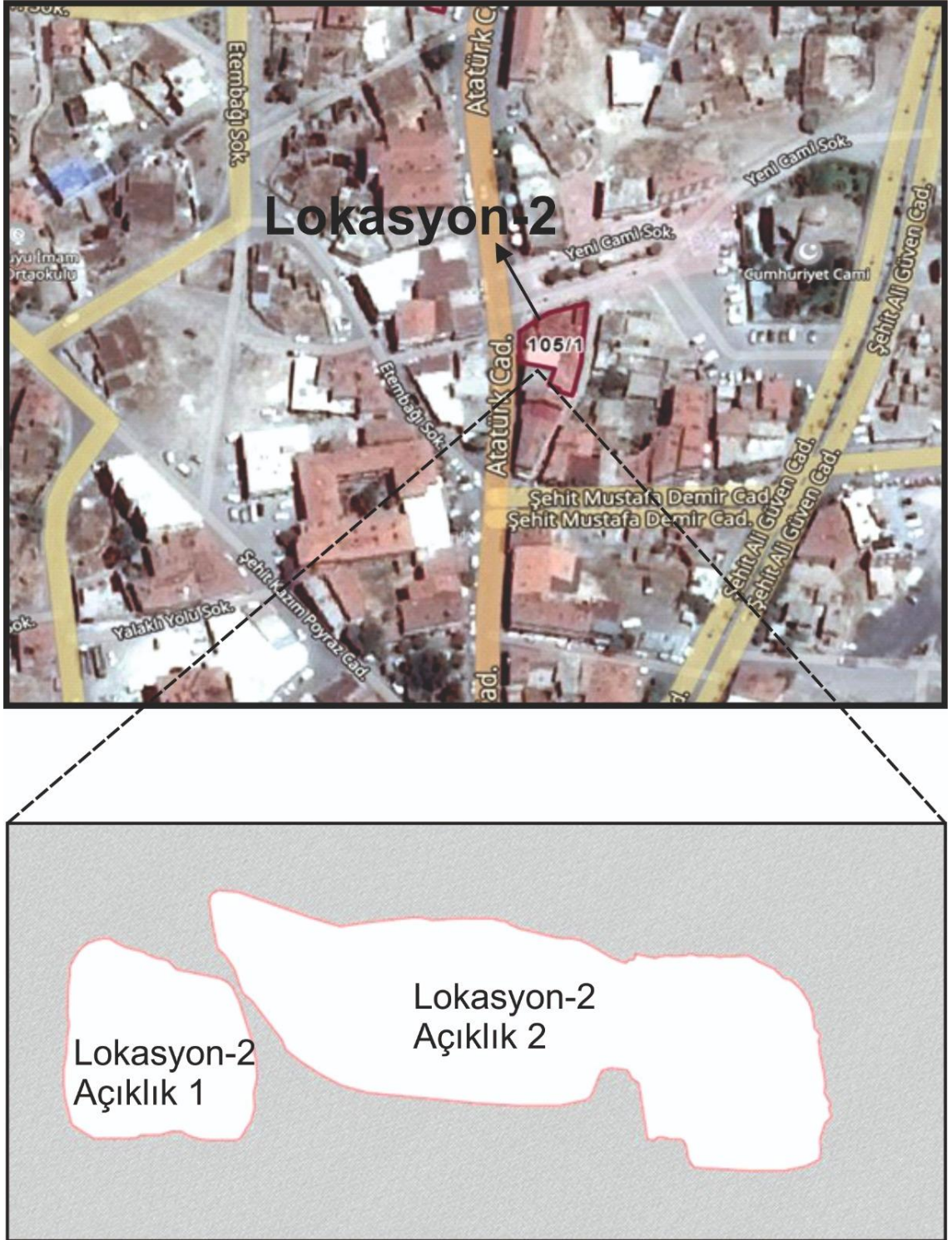
yerleşimin yoğun olduğu alanlarda sığ yeraltı kaya oyma yapılara rastlamak mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında Derinkuyu ilçe merkezinde çok sayıda düzensiz yapıdaki kaya oyma yapının olduğu gerçeğinden yola çıkarak, bu bölgelerde bulunan bazı sığ yeraltı kaya oyma yapıların duraylılığı çeşitli görgül (ampirik) ve numerik yöntemlerle incelenmiştir. İnceleme alanı olarak Derinkuyu Koruma Amaçlı İmar Planında 2 adet parselin altında bulunan ve ne zaman yapıldığı bilinmeyen sığ yeraltı boşlukları seçilmiştir. Bu tez çalışmasında, Koruma Amaçlı İmar Planındaki yapılaşma şartları göz önüne alınarak temel zeminde oluşacak gerilmelerin sığ yeraltı kaya oyma yapılarda duraysızlık oluşturup oluşturmayacağı araştırılması amaçlanmış olup, bu yapılan araştırma ile sığ yeraltı kaya oyma yapıların güvenliği tartışılmıştır.

Derinkuyu ilçe merkezi genelinde eski meskenler, yol, kaldırım vb. gibi alanların altında çok sayıda düzensiz yeraltı kaya oyma açıklığına rastlamak mümkündür. Bu tez çalışmasında, Namık Kemal Mahallesi L33A15B4C Pafta 10 Ada 4 Parsel (yaklaşık yüzölçümü 177,76 m²) (Şekil 1.4) ve Baş Mahalle 30.27.A.A. Pafta 105 Ada 1 Parsel (yaklaşık yüzölçümü 437,43 m²) (Şekil 1.5) numaralı taşınmazların altında bulunan kaya oyma mekânların incelemesi yapılmıştır.



Şekil 1.4 Tez çalışması kapsamında incelenen Derinkuyu İlçesi, N. Kemal Mahallesi 10 ada 4 parselin görünümü (Lokasyon-1)



Şekil 1.5 Tez çalışması kapsamında incelenen Derinkuyu İlçesi, Baş Mahalle 105 ada 1 parselin görünümü (Lokasyon-2)

1.2.Coğrafi Konum ve İnceleme Alanı

Derinkuyu İlçesi Nevşehir ilinin 28 km güneyinde Niğde İlinin 50 km kuzeyinde Aksaray İlinin 80 km doğusunda ve Kayseri ilinin 110 km batısında kalmaktadır.

Derinkuyu ilçe sınırına komşu olan Acıgöl kuzeybatısı, kuzeydoğusunda Ürgüp, Kuzeyinde Nevşehir, Güneyinde Niğde bulunmaktadır .

1930 yılında Belediye olan ilçe merkezi Baş, Esentepe, Bayramlı, Fatih, Demirci, Yeni, Cumhuriyet ve Namık Kemal Mahalleleri olmak üzere 8 mahalleden oluşmaktadır. İlçenin yüzölçümü 445 km², rakımı 1.300 metredir. İlçeye ulaşım karayolu ile sağlanmakta olup ilçe merkezi Nevşehir-Niğde şehirlerarası yol üzerinde bulunmakta ve yaz kış ulaşımına açıktır. 2017 yılı nüfus sayımı verilerine göre 2018 nüfusu yaklaşık 10800 civarındadır [7].

1.3. İklim ve Bitki Örtüsü

Derinkuyu ilçesi İç Anadolu Bölgesinde yer almakta ve karasal iklim özellikleri görülmektedir. Yaz mevsimi sıcak ve kurak, kış mevsimi soğuk ve karlı geçmektedir. Derinkuyu ilçesi Konya Kapalı havzasına girmekte olup, yaklaşık yıllık yağış ortalaması 353.2 mm'dir. Derinkuyu ilçesinde karasal iklim görüldüğünden dolayı bozkır bitkileri görülmektedir [7].

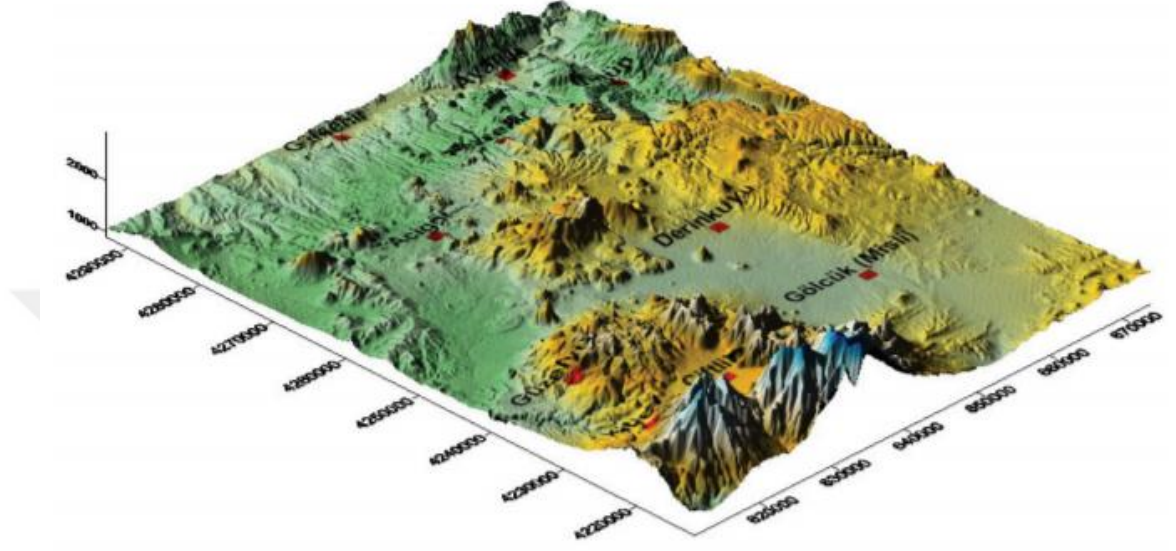
1.4.Yüzey Şekilleri ve Akarsu Ağı

İlçe arazisi genellikle geniş düzlüklere sahip olup, kuru dereler haricinde herhangi bir akarsu bulunmamaktadır. İlçe halkı genellikle tarım ve hayvancılıkla uğraşmaktadır ve geçimlerini büyük oranda tarımla sağlamaktadırlar. İlçede genellikle patates, üzüm, fasulye ve kabak çekirdeği yetiştirilmektedir. Derinkuyu Yeraltı Şehri'nin de etkisiyle turizm son zamanlarda ön plana çıkmış olup, sadece turizmden geçinen halkın oranı çok azdır [7].

1.5. Bölgesel Jeoloji

Derinkuyu (Nevşehir) yerleşimi Kapadokya Volkanik Kompleksi'ni (KVK) içine alan Orta Anadolu Volkanik Provensi (OAVP) içinde yer almaktadır [8]. Bu alan, KD-GB doğrultusunda uzanan ve uzun eksenini 250-300 km genişliği ise, 100-150 km civarında olan Türkiye'nin en önemli Tersiyer-Kuvaterner volkanik provenslerinden biridir. Kapadokya Volkanik Kompleksi'nde (KVK) Neo-Kuvaterner sürecinde birçok polijenetik ve monojenetik volkan püskürmüştür. KVK'nın oluşumu, Arap ve Avrasya levhalarının Orta Miyosen'de birbirlerine yaklaşmalarıyla başlamış, Üst Miyosen-

Kuvaterner sürecinde çarpışma ve çarpışma sonrası rejimlerle gelişimini sürdürmüştür [9]. Derinkuyu bu kompleks içerisinde yükseltilerin arasındaki geniş düzlükler üzerine kurulmuştur (Şekil 1.4).



Şekil 1.6. Derinkuyu ve çevresine ait kabartı haritası [9]

Derinkuyu ve çevresinde jeolojik olarak temel birimlerini, mermer, mikaşist, kalkışist ve kuvarsitlerden oluşan Paleozoyik yaşlı Kırşehir metamorfikleri oluşturur. Bunların üzerine tektonik dokanakla Mesozoyik yaşlı Yeşildağ ofiyoliti ve bunları kesen Orta Anadolu Granitleri gelir. Bu mağmatik kayaçların yüzeysel karşılığı olarak değerlendirilebilecek olan ve andezit, dasit gibi kayaçlardan oluşan Karahıdır Volkanitleri bulunmaktadır. Temelin üzerine ise, uyumsuzlukla Eosen yaşlı bazaltlar ile bol fosilli kireçtaşlarından oluşan Karakepez bazaltı ve Çayraz Formasyonu gelmektedir. Oligosen yaşlı, kırmızı renkli kumtaşı, kiltası ve konglomeralarla temsil edilen Mezgit Formasyonu da, Çayraz Formasyonu üzerine diskordansla gelmektedir. Üst Miyosen yaşlı Ürgüp Formasyonu, sırasıyla, Kavak, Zelve, Sarımaden, Mustafapaşa, Cemilköy, Tahar, Gördeles ignimbritleri, ignimbiritlerle ara seviyeli olarak bulunan akarsu ve göl çökelleri, andezit ve dasitlerden oluşan Derinkuyu domları ile altere olmuş volkanitlerden oluşan Balcı volkanitleri olarak adlandırılan üyeleriyle temsil edilmektedir. Bunların üzerine, andezitlerden oluşan Erdaşdağ Volkanitleri, Keçikaletepe bazaltı, Kızılkaya ignimbiriti, Kışladağ kireçtaşı, Tepeköy ve Çınarlı volkanitleri ile Oyludağ bazaltı gelmekte olup, bütün bu birimler Pliyosen yaşlıdır.

İnceleme alanındaki Kuvaterner, genelde volkanik birimlerle temsil edilir. Bunlar, andezit ve piroklastiklerden oluşan Keçiboyduran volkanitleri; riyolit ve piroklastiklerden oluşan Göllüdağ volkanitleri, riyolit ve piroklastiklerden oluşan Acıgöl volkanitleri; bazaltik kayalar ve bazaltik piroklastiklerden oluşan Suvermez volkanitleridir. Acıgöl ve Suvermez volkanitleri birbirleriyle yatay ve düşey yönde geçişli olarak gözlenmektedir. Ürgüp Formasyonunu oluşturan birimler ile Kuvaterner yaşlı volkanitler, inceleme sahası içerisinde geniş alanlarda yüzeylemektedir. Kızırmak çakıltısı, traverten, yamaç molozu ve alüvyonlar, kendisinden yaşlı olan bütün birimleri uyumsuzlukla örter [10] [11] (Şekil 1.5).

1.6. İnceleme Alanı Jeolojisi

Derinkuyu yerleşiminin üzerinde bulunduğu topoğrafyada Ürgüp Formasyonu İncesu Üyesi (Tüi) ve eski alüvyon (Qe) gözlenmektedir. Alt Pliyosen yaşlı Ürgüp Formasyonu İncesu Üyesi (Tüi) vakanosedimanter bir karakterdedir. Derinkuyu'nun kuzeydoğusunda ve eski alüvyon biriminin altında yer alan İncesu Üyesi inci grisi, pembe renkli, ignimbiritik, dasitik tüftür. Birimde üç düzey ayırtlanmıştır. Alt düzey ince taneli, homojen, gözeneksiz, ufalanır özellikte, pumisce zengindir. Makro biyotit, kuvars ve feldspat içerir. Orta düzey gözenekli ve orta tanelidir. Matriksi alt düzey ile aynıdır. Üst düzey ise masif, ince-orta taneli, boşluksuz, vitrik ve pumis içermektedir.

İnceleme alanının büyük bir bölümü çakıl, kum, silt ve kil boyutundaki alüvyonal düzlüklerden oluşmaktadır. Eski alüvyon killi, siltli, kumlu ve çakıllı seviyeler şeklinde gözlenmektedir. Volkanik kökenli blok boyları 5-20 cm aralığında, yarı yuvarlaklaşmış, küt köşelidir. Bazı bölgelerde eski alüvyonun kalınlığı 10 m'nin üzerine çıkabilmektedir.

BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çeşitli amaçlarla açılmış yeraltı boşlukları ve bu boşlukların duraylılıklarının farklı yöntemlerle değerlendirildiği çeşitli çalışmalara ait bilgiler sunulmuştur.

Aydan ve Ulusay [12] yaptıkları çalışmada, tarihi ve turistik öneme sahip olan Derinkuyu yeraltı şehrinin antik ve arkeolojik öneminin yanında insanlık tarihi boyunca ayakta kalmış kaya oyma bir yapı olduğunu belirtmiştir. Bilimsel çalışma kapsamında Derinkuyu yeraltı şehrinin 5. ve 7. katlarında sıcaklık, nem ve hava gibi koşulların basınç, akustik emisyon, elektrik potansiyel ölçüm sistemleri ile kayaların davranışları incelenmiştir. Çalışmada yeraltındaki iklim ve çevresel koşullar göz önüne alınmış ve kayanın mekanik özellikleri, su muhtevası ve donma-çözülme koşullarının etkileri araştırılmıştır. Öte yandan, aynı çalışmada, yeraltı şehrinin içinde bulunduğu kaya kütlelerinin kısa ve uzun dönem mekanik özellikleri, yerinde gerilme koşullarının tahmini, duraysızlıkların boyutları ve incelenmesi ile tarihi yeraltı şehrindeki boşlukların kısa ve uzun dönem duraylılıkları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, yeraltı şehrindeki farklı katlarda sıcaklık ve nemliliğin önemli oranda değişmediği belirlenmiştir. Bununla birlikte sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde, derinliğin 40 m'den daha sığ olduğu yeraltı açıklıklarının duraylı olduklarını ve yenilmenin gerçekleşmeyeceğini, ancak 40 m'den daha derindeki boşluklarda ise kaya kütlelerinde yenilmelerin görülebileceği sonucuna varılmıştır.

Ayhan ve Arda [13] Kapadokya bölgesinde bulunan yeraltı şehirlerinin jeolojik ve morfolojik özelliklerini yaptıkları çalışmada incelemiş ve dört veri tabanı oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışmada yeraltı şehirlerinin Derinkuyu-Özkonak-Nevşehir yerleşiminde yoğunlaştığını analiz etmişlerdir. Bu bölgelerde piroklastik özellikteki volkanik kayaların bulunduğunu ve Neojen yaşlı bu litolojik katmanların kolay kazılabilir olması açısından tercih edildiği ifade edilmiştir.

2015 yılında İller Bankası Genel Müdürlüğü'nce yaptırılan Derinkuyu İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik etüd raporunda [7] halihazır haritada 2544 hektarlık alanın yerleşime uygunluk durumu değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, birimlerin özelliklerini

belirlemek amacıyla derinlikleri 10,00-20,00 m arasında değişen toplam 416 metre derinlikte 31 adet jeoteknik sondaj ve 1,5-2,5 m arasında değişen 4 adet araştırma çukuru açılmıştır. Rapor sonucunda, söz konusu inceleme alanında yayılım gösteren Ürgüp Formasyonu İncesu Üyesi (Tüi) ignimbiritleri ve eski alüvyon (Qeal) birimleri için herhangi bir taşıma gücü sorunu olmayacağı belirtilmiştir. Ancak, bu rapor kapsamında Derinkuyu yerleşiminde yaygın şekilde gözlenen yeraltı açıklıklarının konumu, boyutları veya duraylılıkları hakkında herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Özata çalışmasında, yerleşim kültürünün oluşmasında o yörenin doğal özellikleri ve halkın günlük ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik unsurların kaya oyma yapıların oluşturulmasında en önemli unsurlardan biri olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, bu doğrultuda bölge halkının özgün mimariler oluşturduğunu ve Kapadokya bölgesinde yapılan yapıların taş, kerpiç vb. malzemeler kullanılarak yapılardan farklı olarak kaya oyma şeklinde olduğu belirtilmektedir. Kaya oyma yapılar yapılırken kayanın kazılabilirliğinin ve şekil verilebilirliğinin kolay olması önem arz etmektedir [1].

Ulusay ve Aydan Kapadokya bölgesinde yaptığı çalışmalarında UCS sistemine göre kaya malzemesinin zayıf ve çok zayıf olarak tespiti yapmış ve atmosferik etkilerle bu malzemelerin doygun hale geçmesiyle dayanımının çok azalacağını ve bu bölgede bulunan vadi uçurumlarını duraysızlık problemi yaşatacağını belirtmiştir. Ayrıca peri bacalarının da bu uzun zaman sonra bu durumun oluşmasının muhtemel olduğunu belirtmiştir.

Ayrıca bu çalışmada kaya yontma yapılar için koruyucu ve iyileştirici önlemlerin alınabileceğini belirtmiştir. Kullanılacak olan yöntemde cıvataların yüksek neme maruz kalacağını ve korozyona maruz kalacağından konvansiyonel tip cıvataların uygulanmasının şüpheli olduğunu, karbon fiber cıvataların kullanılmasının uygun olduğunu ve daha ileri çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Mevcutta uygulamaların püskürtme tekniği kullanılarak yapıldığını ve bunun da estetik açıdan uygun olmadığını gözlemlemiş ve bu tekniğin geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir [14].

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

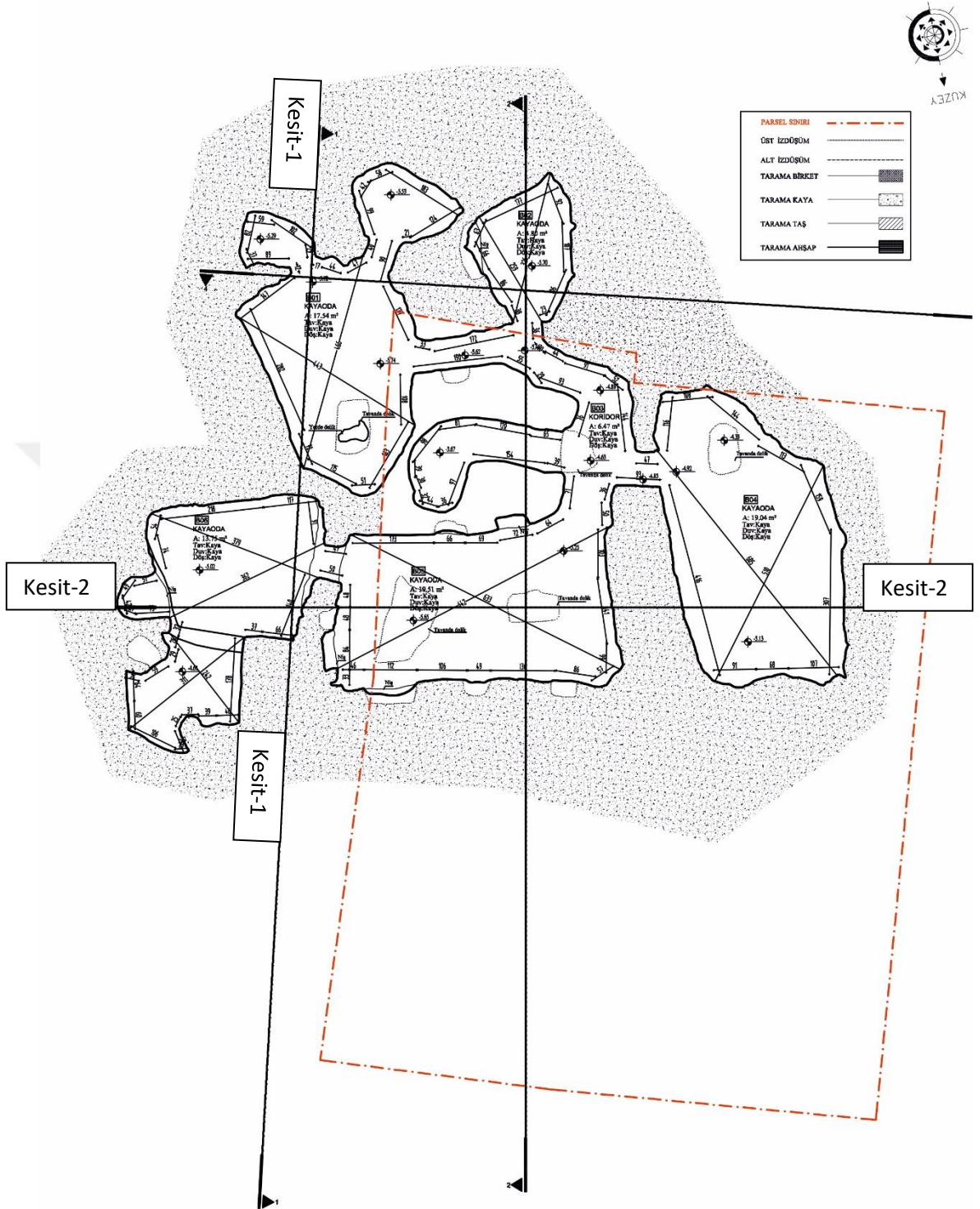
3.1. Materyal

Çalışma alanı olarak Nevşehir ili Derinkuyu İlçesi Koruma Amaçlı İmar Planı içerisinde kalan Namık Kemal Mahallesi L33A15B4C Pafta 10 Ada 4 Parsel (Lokasyon-1) ve Baş Mahalle 30.27.A.A. Pafta 105 Ada 1 Parsel (Lokasyon-2) seçilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen duraylılık analizlerinde bu parseller için hazırlanmış olan 2 adet rölöve projesi başlıca materyal olarak kullanılmıştır.

Lokasyon-1, konum olarak Derinkuyu ilçe merkezinde Atatürk Caddesi üzerinde Yukarı Terminal karşısında yer almaktadır. Mevcut rölöve projesine göre, söz konusu yeraltı kaya oyma mekânların bir kısmı parsel sınırları içinde kalırken, açıklığın kalan kısmı kaldırım ve şu an ulaşım yolu olarak kullanılan cadde altında yer almaktadır (Şekil 3.1). Lokasyon-1'deki kaya oyma yapı ve üzerindeki konut şu an için kullanılmamaktadır. Lokasyon-1'deki bu yeraltı açıklığının yolun altında kalan kısmı, yoldan geçen ağır tonajlı araçların oluşturacağı yük nedeniyle duraysızlık oluşturma olasılığı bulunabilir.

Lokasyon-2 konum olarak Derinkuyu ilçe merkezinde yine Atatürk Caddesi üzerinde Merkez Cumhuriyet Cami karşısında yer almaktadır. Diğer lokasyondaki yeraltı açıklığında olduğu gibi, mevcut durum olarak rölöve projesi dikkate alındığında Lokasyon-2'deki yeraltı kaya oyma mekânların bir kısmı parsel sınırları içinde kalırken, diğer kısmı kaldırım ve şu an aktif olarak kullanılan camiye giden yolun altında kalmaktadır (Şekil 3.2). Lokasyon-2'deki kaya oyma mekânlar da mevcut durumda kullanılmamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında incelenen iki adet kaya oyma mekândan, boşluğun içerisinde oluşturulduğu ignimbirit malzemesinin özelliklerini yansıtabilecek şekilde blok numuneler alınarak Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na nakledilmiş ve burada deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere karot örnekler alınmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.1 Lokasyon-1'de yer alan yeraltı kaya oyma mekânlara ait vaziyet planı



Şekil 3.3 İncelenen lokasyonlarda yer alan ignimbiritten alınan karot örneğinden bir görünüm

Laboratuvar deneyleri kapsamında söz konusu karot örneklerinin kuru ve doymun birim hacim ağırlığı, gözenekliliği, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler açıklıkların duraylılıklarının değerlendirilmesi dikkate alınmıştır.

Büro çalışmaları kapsamında çizim ve yazım çalışmaları sırasında Autocad, Coreldraw ve Microsoft Ofis programları kullanılmıştır. Öte yandan yeraltı açıklıklarının sonlu elemanlar yöntemi ile duraylılığının değerlendirilmesinde RS2 yazılımından yararlanılmıştır [15].

3.2 Yöntem

Bu tez çalışması literatür taraması, arazi çalışması, laboratuvar deneyleri ve büro çalışmaları (analizler ve yazım) olmak üzere dört aşama sonucunda neticelendirilmiştir.

3.2.1 Literatür Taraması

Bu kapsamda Nevşehir ili Derinkuyu İlçesi sınırları içerisinde yapılmış olan akademik ve teknik çalışmalar ve jeolojik veriler araştırılmıştır. Daha önce yayımlanmış makaleler ve raporlar incelenmiştir. Bu bölümle ilgili olarak daha ayrıntılı bilgi “Önceki Çalışmalar” bölümünde verilmiştir.

3.2.2 Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları kapsamında, öncelikle Lokasyon-1 (Şekil 3.4) ve Lokasyon-2 (Şekil 3.5) alanlarındaki yeraltı kaya oyma yapıları için daha önce yapılmış olan rölöve projeleri dikkate alınarak yerinde incelenmiştir. Kaya kütle özelliklerinin belirlenebilmesi için her iki inceleme alanındaki yeraltı boşluğunu oluşturan ignimbirit malzemesinden blok numune alımı yapılmıştır. Lokasyon alanları için hazırlanmış olan rölöve projelerinin yerinde uygunluğu da kontrol edilmiştir. Öte yandan, yeraltı boşluklarının duraylılığına etki edecek süreksizliklerin varlığının tespiti amacıyla yeraltı boşluklarında süreksizlik incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda Lokasyon-2’de bir adet süreksizliğin iç mekândan geçtiği gözlenmiş ve bu süreksizliğin özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 3.4 Lokasyon-1’de bulunan kaya oyma mekânın iç kısmından bir görünüm



Şekil 3.5 Lokasyon-2’de bulunan kaya oyma mekânın iç kısmından bir görünüm

3.2.3 Laboratuvar Çalışmaları

Bu tez çalışmasında Lokasyon-1 ve Lokasyon-2’den alınan blok numunelerden 54 mm çapta, 110 mm uzunluğunda karot numunelerin alımı yapılmış olup, toplamda 44 adet karot numunesi üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu karot numuneleri üzerinde kuru ve doymun birim hacim ağırlık deneyleri, kuru ve doymun tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ISRM [16] önerileri doğrultusunda yapılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Dolaylı çekme dayanımı deneyi, elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri ise Ankara Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüd Proje Müh. Müş. İnş. San. Tic. Ltd. Şti laboratuvarında yaptırılmış ve elde edilen sonuçlar analizlerde kullanılmıştır.

3.2.3.1 Kuru ve Doymun, Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlıklarının Tespiti

Lokasyon-1 ve Lokasyon-2’den alınan blok numunelerden laboratuvar ortamında karotiyer yardımıyla 54 mm çapında düzgün silindirik numuneler alınmıştır. Silindirik olarak alınan bu numunelerin hacimleri belirlendikten sonra kuru ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra bir kap içerisine konularak 48 saat saf su içerisinde bekletilmiştir. Suya doymun hale gelen numunelerin dış yüzü silinerek sırasıyla tartılmıştır. Çıkan sonuçlar kaydedilerek aritmetik olarak doymun birim hacim ağırlığı tespiti yapılmıştır.

3.2.3.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımının Tespiti

Tek eksenli basınç dayanımı tespitinde laboratuvarında bulunan kaya presi makinası kullanılmıştır. Çapı 54 mm ve boyu 110 mm olan silindirik karot numunenin taban alanına kırılma anında etkiyen yük belirlenmiştir. Deney sırasında yükleme hızı 0.35 kN/s seçilmiştir. Yenilme sonrası (Şekil 3.6) her bir örneğin tek eksenli basınç dayanımı değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 3.6 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonrası yenilen karot numunesi

3.2.3.3 Elastisite Modülü, Poisson Oranı ve Brazilan Çekme Dayanımı Tespiti

Alınan karot numuneleri Ankara Akademi Jeolojik Jeoteknik Etüd Proje Müh. Müş. İnş. San. Tic. Ltd. Şti laboratuvarına gönderilmiş ve söz konusu deneyler ISRM önerileri çerçevesinde gerçekleştirilmiştir [16].

3.2.4 Büro Çalışmaları

Çalışma alanı olan Lokasyon-1 ve Lokasyon-2’de hazır olan rölöve projeleri Autocad programında hazırlanarak çalışılacak yeraltı kaya oyma mekânların üçer adet kesitleri

hazırlanmış ve dxf dosyası olarak sonlu elemanlar yazılımı olan RS2 programına aktarılmıştır.

Daha sonra RS2 yazılımında açıklıkları çevreleyen kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon özelliklerine ait veri girişleri yapılmıştır. Her bir kaya oyma mekan kesitinin üzerine araç ve bina yükleri göz önünde bulundurularak maksimum 100 kPa basınç etkiyeceği kabul edilmiştir.



BÖLÜM 4

BULGULAR

4.1 İgnimbiritlerin Kaya Malzemesi Özellikleri

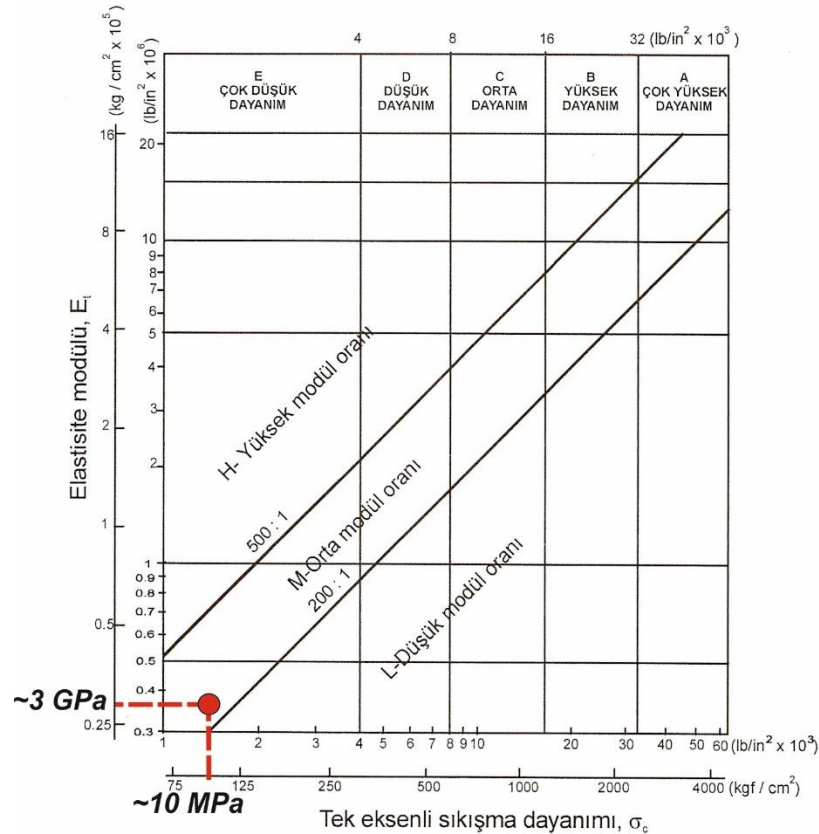
Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'den alınan ignimbirit numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda ignimbiritlerin kuru birim hacim ağırlığının ortalama olarak 15.66 kN/m^3 olduğu tespit edilmiştir. Aynı numuneler için doygun birim hacim ağırlığı ortalama 18.66 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Çalışma alanından alınan örnek kaya malzemelerinin gözenekliliği ortalama olarak %30.66 ve boşluk oranı ortalama 0.44 olarak saptanmıştır. Öte yandan, ignimbirit örneklerinin kuru ve doygun koşullardaki tek eksenli basınç dayanımı sırasıyla 11.77 MPa ve 9 MPa olarak tespit edilmiştir. Söz konusu ignimbiritlerin kuru koşullardaki çekme dayanımı 0.64 MPa'dır. Aynı ignimbiritlerin elastisite modülü 3.64 GPa iken, Poisson oranı 0.37 olarak belirlenmiştir. İnceleme alanlarındaki ignimbiritlerin fiziko-mekanik özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 İnceleme alanlarındaki ignimbiritlerin fiziko-mekanik özellikleri

	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Aydan ve Ulusay (2012)
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	14.37	16.53	15.66	14.9
Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	17.53	19.42	18.66	17.6
Görünür Gözeneklilik (%)	28.47	35.04	30.66	-
Boşluk Oranı (%)	0.4	0.54	0.44	-
Kuru TEBD (MPa)	6.9	19.26	11.77	9
Doygun TEBD (MPa)	6.9	10.66	9	4.9
Çekme Dayanımı (MPa)	0.51	0.76	0.64	0.95
Elastisite Modülü (GPa)	3.38	3.93	3.64	2.2
Poisson Oranı	0.35	0.37	0.37	0.22

Tablo 4.1’de sunulan fiziko-mekanik özellikler genel olarak değerlendirildiğinde, söz konusu ignimbiritlerin düşük birim hacim ağırlığına ve yüksek gözenekliliğe sahip olduğu ifade edilebilir. Öte yandan aynı ignimbiritler “düşük dayanımlı” kaya sınıfına girmektedirler. Aynı tabloda Aydan ve Ulusay tarafından Derinkuyu yeraltı şehrinde yapılan bilimsel çalışmaya ait deneysel çalışma sonuçları da sunulmuştur. Aydan ve Ulusay çalışmasına ait sonuçlar incelendiğinde, Derinkuyu yeraltı şehrinin kaya malzemesi özellikleri ile bu tez çalışması kapsamında incelenen yeraltı açıklıklarındaki kaya malzemesi özelliklerinin birbirine benzer özellikte olduğu görülmüştür [12].

Öte yandan, inceleme sahasındaki ignimbirit [17] tarafından önerilen birleştirilmiş mühendislik sınıflamasına göre değerlendirildiğinde, söz konusu ignimbirit kayasının elastisite modülü değeri açısından “orta” modül oranına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 İnceleme sahasındaki ignimbirit için modül oranının Deere ve Miller (1966) sınıflamasına göre belirlenmesi [17].

4.2 İncelenen Yeraltı Açıklıklarındaki İgnimbiritlerin Kaya Kütle Özellikleri

İnceleme sahasındaki ignimbiritlerin kaya kütle kalitesi, en yaygın bilinen kaya kütle sınıflama sistemlerinden biri olan RMR sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Kaya Kütle Sınıflaması (RMR) olarak adlandırılan bu sınıflama ilk olarak Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiştir ve sistem son halini 1989'da almıştır [18] [19]. Bir kaya kütle RMR sistemini kullanarak sınıflandırabilmek için aşağıdaki altı parametre kullanılır.

- a) Sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı
- b) Kaya kalitesi tanımı (RQD)
- c) Süreksizlik aralığı
- d) Süreksizlik durumu
- e) Yeraltı suyu durumu
- f) Süreksizlik yönelimi

RMR kaya kütle sınıflama sisteminde her bir parametre için kaya kütle özelliğine göre puan atanmaktadır (Şekil 4.2). 6 parametreden elde edilen toplam puan, kaya kütle kalitesi bu puana göre değerlendirilmektedir. Öte yandan, süreksizlik yönelimi parametresi dikkate alınmadan ilk 5 parametreye göre belirlenen puan ise temel RMR puanı olarak ifade edilmektedir. Buna göre, RMR kaya kütle sınıflama sisteminde 6 parametre için belirlenen puanlar toplandıktan sonra elde edilen nihai RMR puanına göre kaya kütleleri sınıflandırılmaktadır. Toplam RMR puanı 20'den küçük kaya kütleleri "çok zayıf kaya kütle" olarak sınıflandırılmaktadır. RMR puanı 21 ile 40 arasında olanlar "zayıf kaya", 41 ile 60 arasında olanlar "orta kaya", 61 ile 80 arasında olanlar "iyi kaya", 81 ile 100 arasında olanlar ise "çok iyi kaya" sınıfında yer almaktadırlar.

Tablo 4.2'de 4. parametre olan süreksizlik durumu, tabloda sunulan ifadelerle belirlenebilmekle birlikte, süreksizlik yüzey koşulunun detaylı şekilde puanlandırılması amacıyla sistemin son halinde Tablo 4.3'te verilen puanlama tablosu da kullanılabilir. Bu amaçla arazide tanımlanan ya da ölçülen süreksizlik parametrelerine karşılık gelen

puanlar tablodan belirlenerek, bunların toplamı süreksizlik durumu puanı olarak dikkate alınır.

Tablo 4.2 RMR sınıflama sistemi parametreleri ve puan tablosu [19]

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ ve PUANLAMALARI									
Parametre			Değer aralığı						
1.	Sağlam kaya dayanımı	Nokta yük dayanım indeksi (MPa)	>10	10-4	4-2	1-2	Düşük tek eksenli basınç dayanım değerleri		
		Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	<i>Puanlama</i>		15	12	7	4	2	1	0
2.	Kaya Kalitesi Tanımı (RQD) (%)		100-90	90-75	75-50	50-25	<25		
	<i>Puanlama</i>		20	17	13	8	3		
3.	Süreksizlik aralığı (m)		>2	2-0.6	0.6-0.2	0.2-0.06	<0.06		
	<i>Puanlama</i>		20	15	10	8	5		
4.	Süreksizliklerin durumu		Çok pürüzlü yüzeyler. Devamlı değil. Ayrılma yok. Ayrışmamış yüzey	Pürüzlü yüzeyler. Ayrılma<1mm. az ayrılmış yüzey	Pürüzlü yüzeyler. Ayrılma<1mm. çok ayrılmış yüzey	Dalgalı yüzey veya dolgu kalınlığı <5 mm veya ayrılma 1-5 mm. devamlı	Yumuşak dolgu kalınlığı >5 mm veya Ayrılma > 5 mm. devamlı		
	<i>Puanlama</i>		30	25	20	10	0		
5.	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su (lt/m)	Yok	<10	10-25	25-125	>125		
		Süreksizlikteki su basıncı/ana asal gerilme oranı	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	<i>Puanlama</i>		15	10	7	4	0		
B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME									
Süreksizliklerin doğrultu ve eğim yönelimi			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil		
Puanlama	Tüneller ve madenler		0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller		0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler		0	-5	-25	-50	-60		
C. TOPLAM PUANLAMADAN BELİRLENEN KAYA KÜTLESİ SINIFLARI									
Puanlama			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤20		
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Açıklama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ ÖZELLİKLERİ									
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m'lik açıklık için 20 yıl	10 m'lik açıklık için 1 yıl	5 m'lik açıklık için 1 hafta	2.5 m'lik açıklık için 10 saat	1 m'lik açıklık için 30 dakika		
Kaya kütlelerinin kohezyonu (kPa)			>400	400-300	300-200	200-100	<100		
Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı			>45	45-35	35-25	25-15	<15		
E. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM VE EĞİM YÖNÜNÜN ETKİSİ									
Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel			Doğrultuya bakılmaksızın		
Eğim yönünde ilerleme		Eğime ters yönde ilerleme		Eğim 45-90°		Eğim 20-45°		0-20°	
Eğim 45-90°	Eğim 20-45°	Eğim 45-90°	Eğim 20-45°	Eğim 45-90°		Eğim 20-45°		Orta	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil		Orta		Orta	

Tablo 4.3 Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması için önerilen kılavuz [19]

Parametre	Puanlar				
Süreksizlik uzunluğu (devamlılık)	<1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	>20 m (0)
Süreksizlik açıklığı	Yok (6)	<0,1 mm (5)	0,1-1,0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5 mm (0)
Pürüzlülük	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan (0)
Dolgu	Yok (6)	Sert dolgu <5 mm >5 mm (4) (2)	Yumuşak dolgu <5 mm >5 mm (2) (0)		
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

Bu tez çalışması kapsamında incelenen alandaki kaya kütlesi değerlendirmelerinde süreksizlik yönelimi düzeltmesi dikkate alınmamış, kaya kütle kalitesi temel RMR puanına göre gerçekleştirilmiştir. Lokasyon-1 ve Lokasyon-2 alanında yapılan arazi çalışmaları ve elde edilen verilerle ignimbiritlerin ortalama olarak kaya kütle özellikleri belirlenmiştir. Bu verilere bağlı olarak Tablo 4.4'te her bir parametre için puanlar verilerek Derinkuyu ignimbiritinin RMR puanı ortaya konmuştur.

İncelemeye konu olan sahada, ignimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımı ortalama 12 MPa civarında olup, RMR puanlama tablosuna göre ignimbiritin RMR puanı 2'dir. Tezin ana materyalini oluşturan yeraltı açıklıklarında sadece bir adet süreksizlik izlenebilmiştir. Bu nedenle süreksizlik aralığı ve RQD hakkında doğrudan bilgi sahibi olunamamakla birlikte, literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ve incelemeler, Derinkuyu ve çevresindeki ignimbiritlerde süreksizlik sıklığının fazla olmadığını ortaya koymaktadır. Öte yandan, incelenen açıklıklardaki açıklık genişliklerinin 2-3 m'den büyük olduğu göz önüne alınırsa, inceleme alanındaki süreksizlik aralığının fazla olduğu yorumu yapılabilir. Buna göre, ignimbiritler için RMR puanlama tablosunda RQD ve süreksizlik aralığı puanları 20 olarak seçilmiştir.

İncelenen yeraltı açıklığında gözlene süreksizlikte devamlılık açıklık boyutu boyunca devam ettiğinde devamlılık 3-10 m arasında kabul edilmiş ve Tablo 4.3'e göre 2 puan atanmıştır.

Tablo 4.4 İnceleme sahasındaki ignimbirit birimine ait RMR puanlama tablosu ve temel RMR puanı

		Değer	RMR Puanı
1	Sağlam kayaç Dayanımı (MPa)	12	2
2	Kayaç kalite göstergesi (RQD) (%)	90-100	20
3	Süreksizlik aralığı (mm)	>2 m	20
4. Süreksizlik Özellikleri	Devamlılık (m)	3-10 m	2
	Açıklık (mm)	<0.1 mm	5
	Pürüzlülük	Pürüzlü	5
	Dolgu	Yok	6
	Bozunma	Az bozunmuş	5
5	Yeraltı suyu durumu*	Nemli	10
		Temel RMR puanı	75
		Kaya Sınıfı	İyi

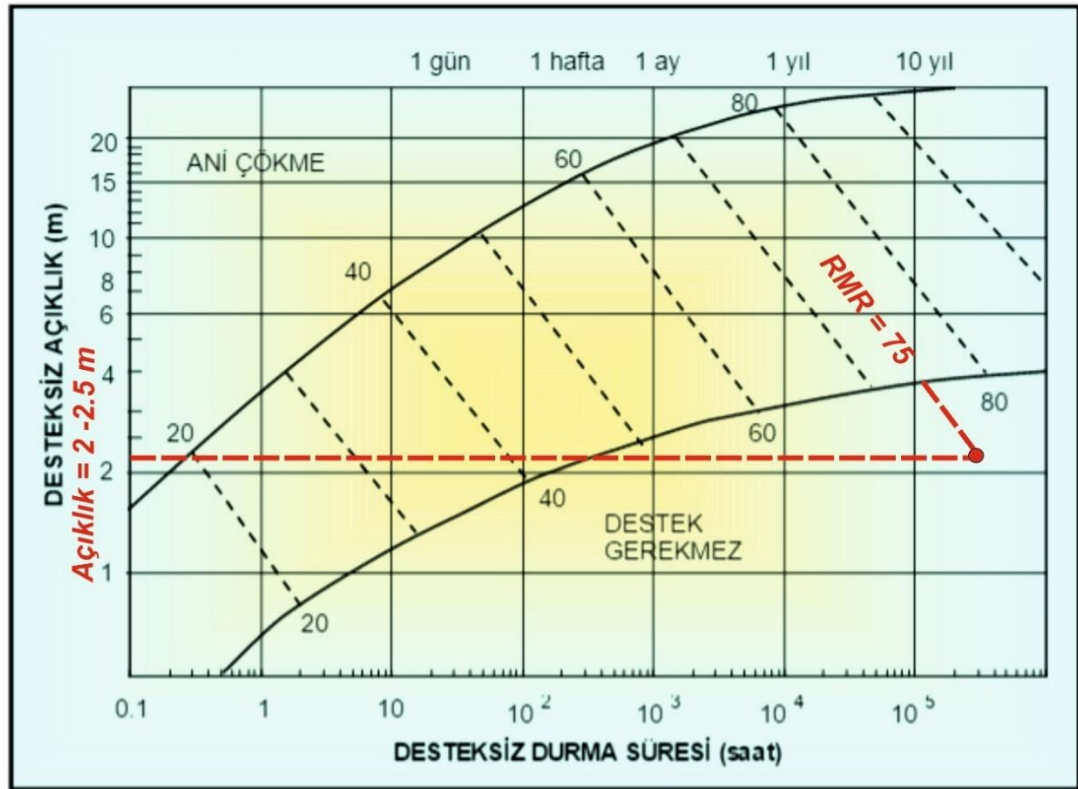
*En olumsuz koşul dikkate alınmıştır.

Öte yandan, incelenen boşluklardaki süreksizlik açıklığı çok azdır. Aynı zamanda pürüzlü ve az bozunmuş bir özellik sunan bu süreksizlikte dolgu tespit edilememiştir. İncelenen boşluklarda zaman zaman yağış sularına bağlı olarak nemlenme gözlemlendiğinden en olumsuz koşulu yansıması açısından ortam nemli olarak kabul edilmiştir.

Tüm parametrelere ait RMR puanları toplandığında, incelenen yeraltı açıklıklarındaki RMR nihai puanı 75 olarak saptanmıştır. Buna göre, bu açıklıklardaki ignimbiritlerin “iyi” kaya sınıfında olduğu söylenebilir.

Kaya kütleleri içerisinde açılan yeraltı boşlukları, kaya kütlelerinin kalitesine ve açıklığın boyutuna bağlı olarak belirli bir süre desteksiz kalma özelliğine sahiptirler. Açıklık

boyutu küçüldükçe ve kaya kalitesi yükseldikçe desteksiz kalabilme süresi de artmaktadır. Kaya kütlelerinin desteksiz kalma sürelerinin veya desteksiz olarak kalabilecek açıklık boyutlarının yaklaşık olarak tahmininde RMR kaya kütle sınıflaması sisteminden faydalanılabilmektedir. Buna göre, Şekil 4.2’de sunulan grafiksel ilişki yardımıyla belirli bir RMR puanına sahip kaya kütlelerinin desteksiz durabileceği açıklık miktarı ve desteksiz durma süresi ortaya konabilmektedir. İncelenen yeraltı boşluklarında kazı açıklıkları genel olarak 2-2.5 m arasında değişmektedir. Buna göre RMR puanı 75 olan bu ignimbiritlerin 2-2.5 m açıklık genişliklerinde desteksiz durabildikleri Şekil 4.2’den de görülebilmektedir.



Şekil 4.2 İncelenen yeraltı açıklıklarındaki ignimbiritlerin kazı açıklığına bağlı olarak desteksiz kalma süresi

4.3 İncelenen Yeraltı Açıklıklarındaki İgnimbiritlerin Kaya Kütle Özelliklerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) Yardımıyla Değerlendirilmesi

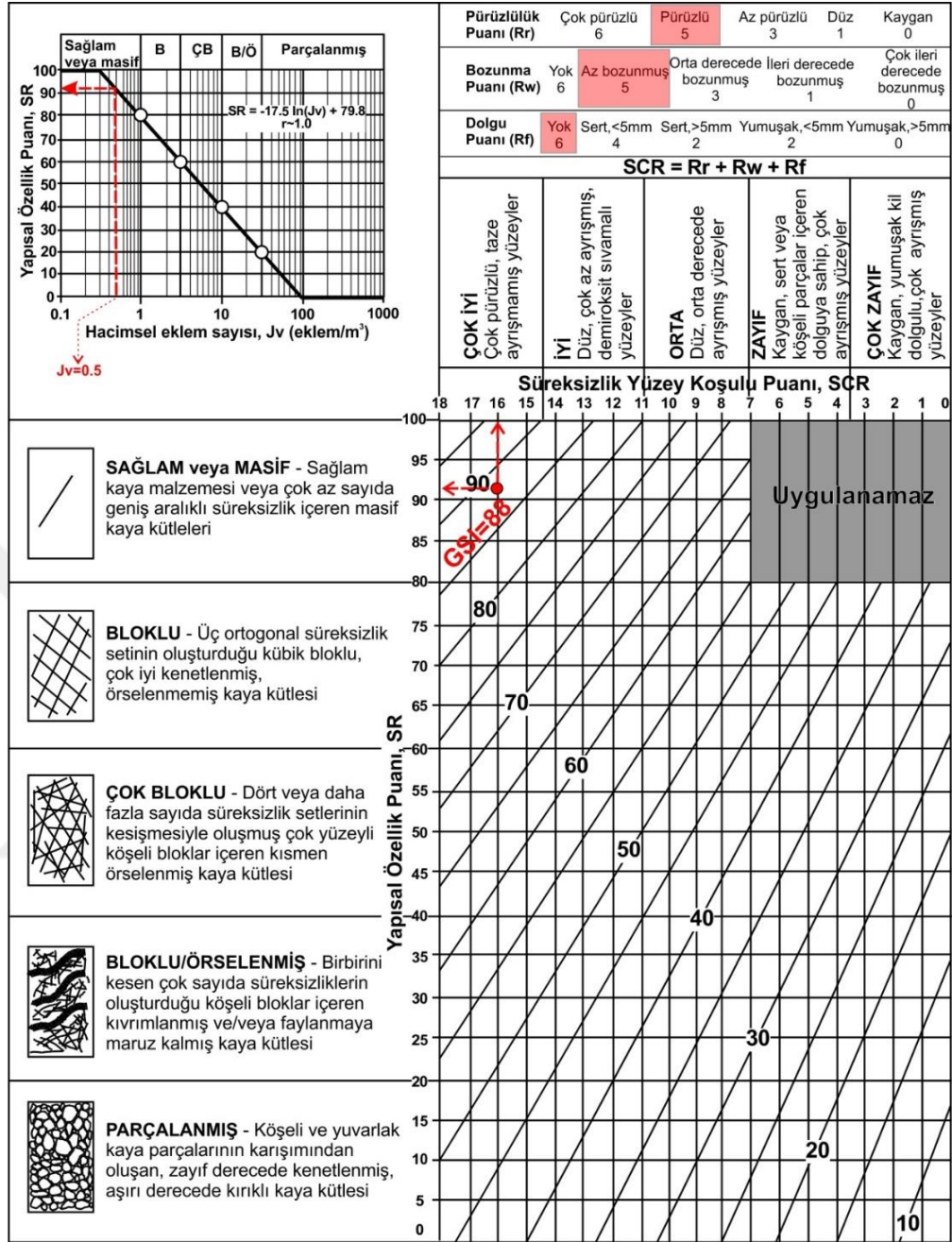
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kaya kütlelerinin tanımlanması için geliştirilmiş bir sistem olup, kaya kütle özelliklerine bağlı olarak sayısal analizler için gerekli olabilecek girdi parametrelerinin belirlenmesi için de kullanılmaktadır. Jeolojik Dayanım İndeksi

(GSI)'nin ilk ortaya çıktığı 1990'lı yılların başlarında kaya malzemesinin jeolojik karakteri ve bu malzemenin oluşturduğu kaya kütesinin görsel değerlendirmesi kaya kütle dayanımının ve deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesi için gerekli olan parametre seçiminde doğrudan kullanılmaktaydı [20]. Bu amaçla, Hoek ve Brown tarafından kaya kütesinin görsel tanımlamasını esas alan bir GSI sınıflama abağı geliştirilmiştir [21]. Görsel ve öznel bir değerlendirmeye dayanan ilk GSI abakları, bu özelliğin ve GSI tahminlerindeki geniş dağılım aralığının ortadan kaldırılması amacıyla ilerleyen zamanla birlikte modifiye edilmiş ve farklı sınıflama abakları öne sürülmüştür. Sönmez ve Ulusay tarafından önerilen kantitatif (niceliksel) GSI abağı [22] (Şekil 4.3), kaya kütle özelliklerinin ve süreksizlik yüzey koşullarının daha nicel şekilde belirlenmesine imkan sağlamaktadır.

Buna göre incelenen yeraltı açıklıklarındaki ignimbiritlerin kaya kütle özellikleri RMR kaya kütle sınıflamasından sonra, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır [22] (Şekil 4.3).

Lokasyon-1 ve Lokasyon-2 alanlarında yapılan incelemeler neticesinde kaya kütle özellikleri belirlenmiş ve bu değerler yardımıyla GSI puanı hesaplanmıştır. GSI sisteminde kaya kütleleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütesinin özelliğini yansıtan yapısal özellik puanı yardımıyla sınıflanabilmektedir. İncelenen ignimbiritlerdeki süreksizlik yüzeyi genel olarak iyi özellikler sergilemektedir. Buna göre, süreksizlik yüzeyi genellikle pürüzlü ve az-bozunmuş özelliktedir. Süreksizlikte dolguya rastlanmamıştır. Bu özellikler ışığında ignimbiritin süreksizlik yüzey koşulu (SCR) puanı 16'dır. Öte yandan, ignimbiritin hacimsel eklem sayısı (J_v) sırasıyla 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu durumda, GSI sistemindeki yapısal özellik puanı (SR) 91 olarak saptanmaktadır. Şekil 4.3'teki abaktan da görülebileceği üzere, incelenen açıklıklardaki ignimbiritlerin GSI puanı 88'dir. GSI değerine göre ignimbiritler "sağlam veya masif" olarak sınıflandırılmaktadır.

İgnimbiritler için belirlenen GSI puanı (88), söz konusu kaya kütesinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü yardımıyla belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

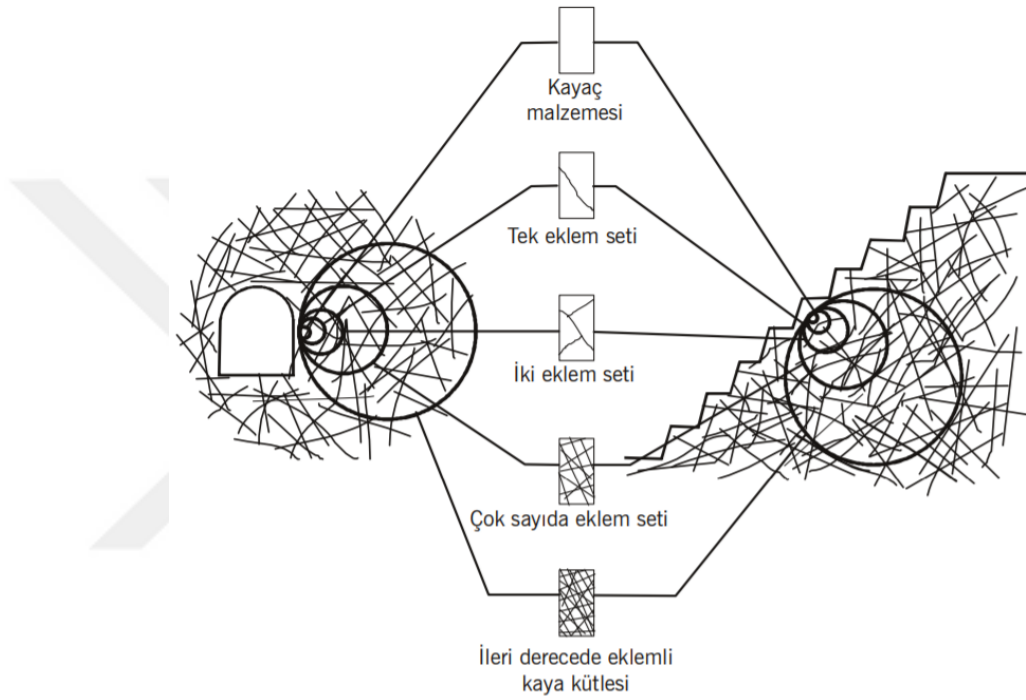


Şekil 4.3 İncelenen yeraltı açıklıklarında GSI puanının kantitatif abak yardımıyla belirlenmesi

4.4 Derinkuyu İgnimbiritlerinin Kütleli Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

Bilindiği üzere kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri sağlam kaya dayanımı ve süreksizliklerin ortak bir fonksiyonudur (Şekil 4.4). Bu nedenle kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin kaya malzemesi ve süreksizlikleri içeren örnekler üzerinde belirlenmesi gerekir. Ancak, laboratuvar deneyleri için hem kaya malzemesini hem de süreksizlikleri içeren büyük boyutlu örnekler alınması

neredeysen imkânsızdır. Öte yandan bu boyutlardaki örnekler için uygun deney donanımları da mevcut değildir. Bu nedenle, kaya kütlelerinin sayısal çözümlerinde ihtiyaç duyulan kaya kütlesi dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenebilmesi için görgül yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden en bilineni 1980'li yılların başlarından itibaren geliştirilmeye başlanılan Hoek-Brown görgül yenilme ölçütüdür.



Şekil 4.4 Boşluk veya örnek boyutunun artmasına bağlı olarak kaya malzemesinden kaya kütlesi davranışına geçiş [23]

Kaya malzemesi ve süreksizliklerine ait geniş bir aralıkta dağılım gösteren deneysel verilerin incelenmesi ve eklemli kaya kütlelerine ait sınırlı sayıdaki uygun veri, yenilme anında ana-tali asal gerilmeler ile makaslama-normal gerilmeleri arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir ki bu ilişki doğrusal değildir. Hoek ve Brown (1980), orijinal Griffith kırılma teorisine ait doğrusal olmayan yenilme zarfını ele alarak ve birtakım deneme-yenilme metotları kullanarak yenilme anındaki asal gerilmeler arasında bir ilişki bulmuşlardır [24]. Söz konusu görgül yenilme eşitliği zaman içerisinde revize edilerek aşağıda belirtilen son halini almıştır [25].

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

σ_1^1 : yenilme anındaki maksimum asal efektif gerilme

σ_3^1 : yenilme anındaki minimum asal efektif gerilme

σ_c : kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı

m_b , s ve a : kayanın özelliklerine bağlı Hoek-Brown sabitleri

Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünün güncel şeklinde kaya kütle sabitlerinin (m_b ve s) belirlenmesi için Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri kullanılmakta olup, oldukça kötü kaliteli kaya kütleleri için 10 ile sağlam kaya için 100 puan aralığında değişmektedir. Yenilme ölçütündeki m_b katsayısı, deforme olmuş kaya malzemesini temsil ederken, m_i sabiti sağlam kayayı ifade eden bir sabit olarak ilgili ölçütte önerilmiştir. m_i sabiti kaya malzemesi üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden belirlenebileceği gibi, farklı kaya grupları için önerilen m_i sabiti değerleri de mevcuttur.

Hoek-Brown sabitleri m_b , m_i , s ve a ile GSI ve örselenme faktörü (D) arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekildedir.

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

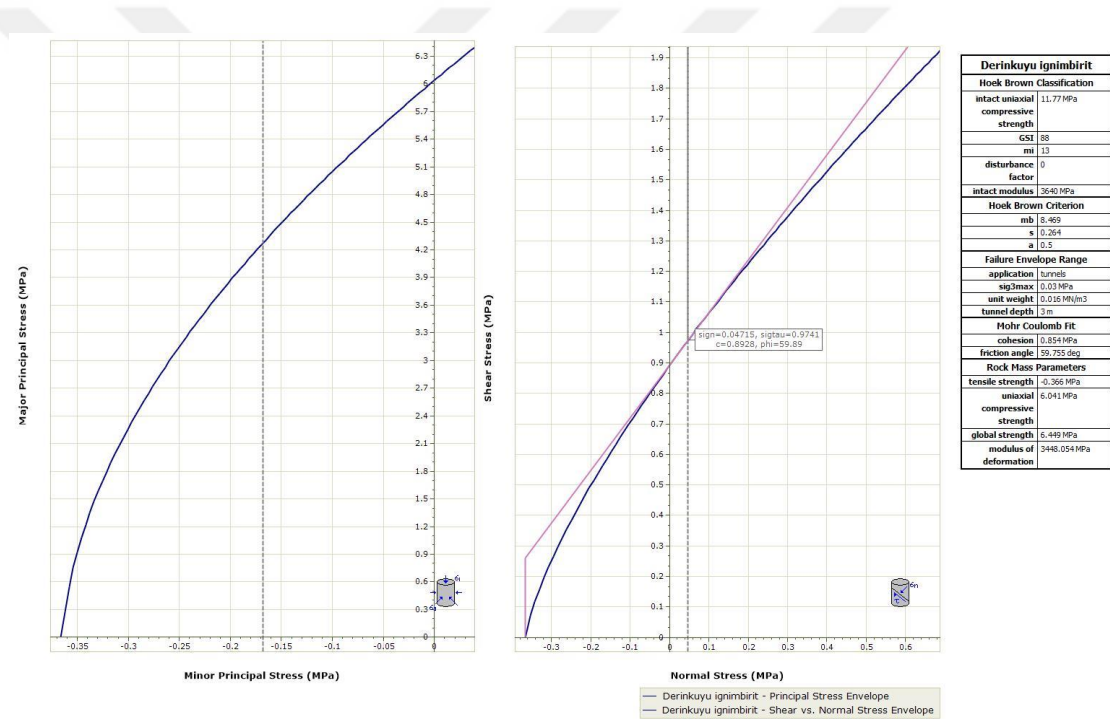
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} + e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

Yeraltı açıklığının veya şevin açılması sırasında kaya kütleindeki kazıya bağlı deformasyonu ifade eden örselenme faktörü (D) değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, örselenmemiş kaya kütleleri için bu değer 1 iken çok örselenmiş kaya kütleleri için 0'dır. İnsan gücü ile açılmış yeraltı açıklıklarında örselenme miktarı ihmal edilebilir derecede az olacağından D katsayısı 1 kabul edilebilir.

Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'deki ignimbiritlerin kaya malzemesi dayanımı laboratuvar deneyleri ile ortaya konmuştur. Öte yandan, ignimbiritlerin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden

yararlanılmıştır [25]. Buna göre, Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre çizilen Derinkuyu ignimbiritlere ait yenilme zarfları Şekil 4.5'te verilmektedir.

GSI puanı 88 olan kaya kütesinin, Hoek-Brown sabitleri olan “ m_b , s ve a ” sırasıyla 8.469, 0.264 ve 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu sabitlere bağlı olarak kaya kütesinin (ignimbirit) çekme dayanımı 0.366 MPa, tek eksenli basınç dayanımı 6.04 MPa, kütsel dayanımı 6.45 MPa ve deformasyon modülü 3448 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.5). Öte yandan, Hoek-Brown eğrisel yenilme zarfında 0.05 MPa normal gerilme değerine göre ignimbiritlerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değeri 0.89 MPa ve 59.9° 'dir.



Şekil 4.5 Derinkuyu ignimbiritleri için hazırlanan kaya kütesi yenilme zarfları

4.5 İncelenen Yeraltı Açıklıklarında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizler

Bu tez çalışmasında Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'de yer alan iki adet yeraltı açıklığının duraylılık ve deformasyon analizleri, açıklıkların rölöve kesitleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizler RS2 yazılımı (Rocscience, 2019) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi, bir malzemenin matematiksel olarak ifade edilmesi esasına dayanmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde incelenen malzeme, alt parçalara

ayrılabilen model olup, malzeme özelliklerine ve uygulanabilir sınır şartlarına sahiptir.

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır:

1. Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır.
2. Her elemandaki, sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.
3. Aranılan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır.

Sonlu Eleman Yönteminin diğer nümerik yöntemlere göre avantajları

- a) Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- b) Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- c) Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
- d) Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- e) Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Derinkuyu ignimbiritleri içerisinde açılan yeraltı açıklıklarının duraylılıklarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi sırasında kullanılan malzeme özellikleri Tablo 4.5'te sunulmuştur. Yeraltı açıklıklarını çevreleyen ignimbirit kütlelerinin homojen ve izotrop özellik göstermesinden dolayı analizlerde yenilme ölçütü olarak genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü dikkate alınmıştır.

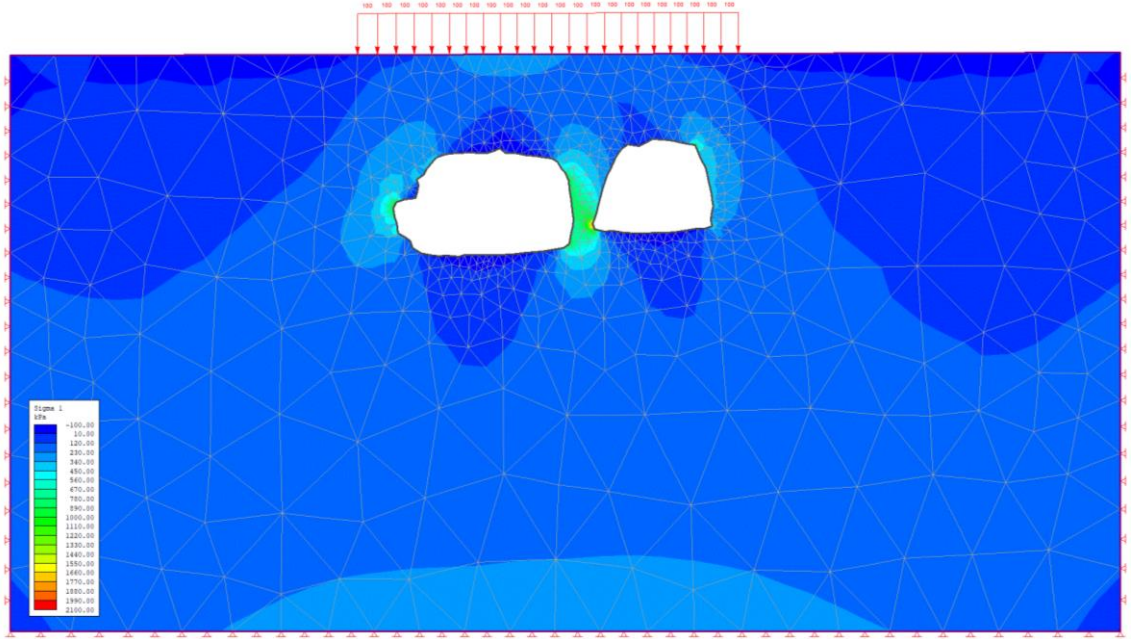
Tablo 4.5 Sonlu elemanlar analizlerinde ignimbiritlere ait malzeme özellikleri

Parametre	Değer
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	11.7
m_b	8.469
s	0.264
a	0.5
Elastisite modülü (GPa)	3.64
Poisson oranı	0.37
Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	16

Analizler sırasında sınır koşullarının analiz sonuçlarını etkilememesi model kenarları yeraltı açıklıklarının yan duvarlarından ve tabanından itibaren yeterli uzaklıkta (yanlarda açıklık genişliğinin minimum 2 katı, tabanda açıklık yüksekliğinin minimum 4 katı) seçilmiştir.

4.5.1 Lokasyon-1/Kesit 1'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

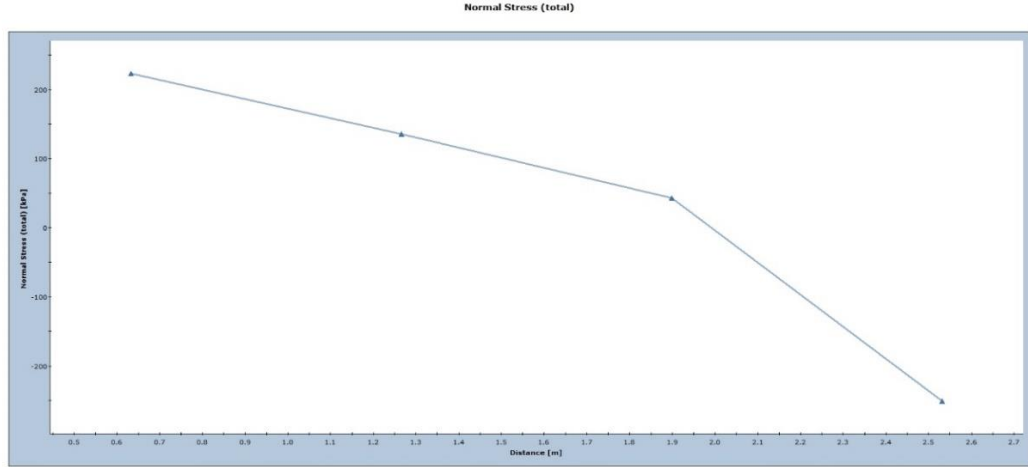
Bu bölümde Derinkuyu yerleşiminde inceleme alanı olarak seçilen noktalardan biri olan Lokasyon-1'deki duraylılık sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerle iki ayrı kesit üzerinde incelenmiştir. Lokasyon-1'de iki adet kaya oyma mekân mevcuttur. Şekil 4.6'da sunulan ilk kesitteki iki adet yeraltı açıklığının genişlikleri sırasıyla 4.76 ve 3.06 metre, yükseklikleri ise 2.86 ve 2.53 metredir. Açıklıkların üstündeki örtü kalınlığı 2.57 ve 2.31 metredir. Analizlerde bina, trafik vb. gibi etkilerle yeraltı açıklıkları üzerinde oluşabilecek basınçları yansıtmak amacıyla 100 kPa düşey gerilme eklenmiştir. Belirtilen koşullara bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda Lokasyon-1/Kesit-1'deki maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6 Lokasyon-1/Kesit-1’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı

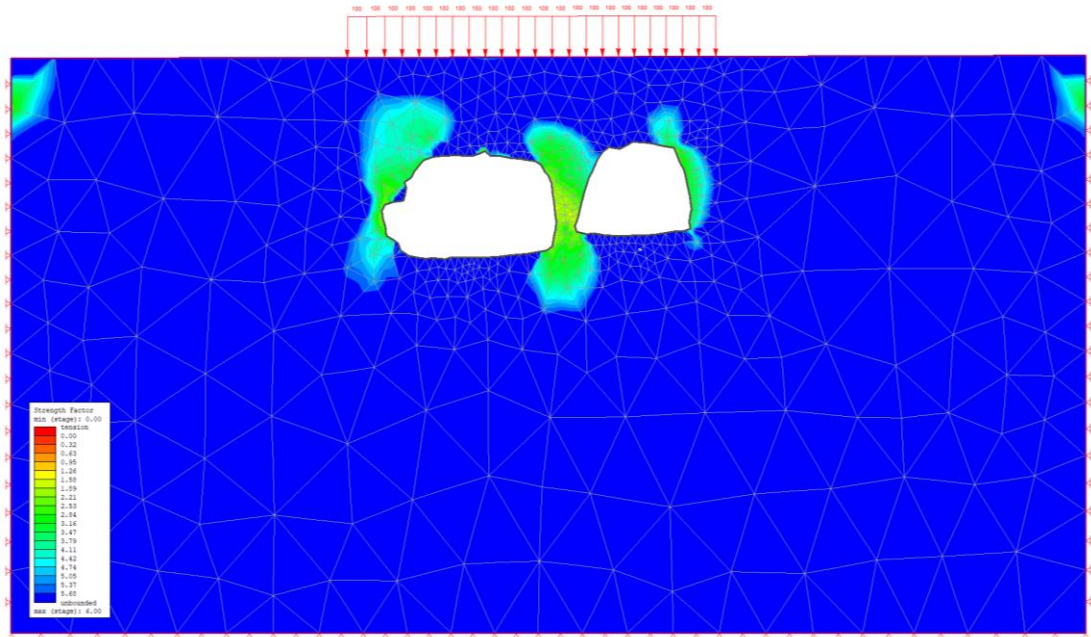
Lokasyon-1’de incelenen ilk kesitteki yeraltı açıklıklarının tavan kesimlerinde 74.93 kPa mertebesinde çekme gerilmeleri oluşmuş olup, modelde belirlenen en yüksek maksimum basınç gerilmesi değeri 2 MPa civarındadır. Bu değer incelenen kaya malzemesinin minimum tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık 1/3’ü kadardır. Şekil 4.6 incelendiğinde gerilmelerin genel olarak açıklık yan duvarlarında yoğunlaştığı ve özellikle iki açıklık arasındaki dar kesitte oldukça arttığı belirlenmiştir.

Şekil 4.7’deki grafikte açıklık üzerinde normal gerilmenin derinlikle olan değişimi gösterilmektedir. Bu kesitte yüzeye yakın kesimlerde normal gerilme değerlerinin yüzeydeki 100 kPa ilave gerilmenin de etkisiyle yaklaşık 200 kPa mertebesinde olduğu ve yaklaşık 2 metre derinlikten sonra yeraltı boşluğu üzerinde çekme gerilmelerinin (- ile gösterilen) olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Lokasyon-1/Kesit-1’de yüzeyden itibaren açıklık tavanına etkileyen normal gerilme grafiği

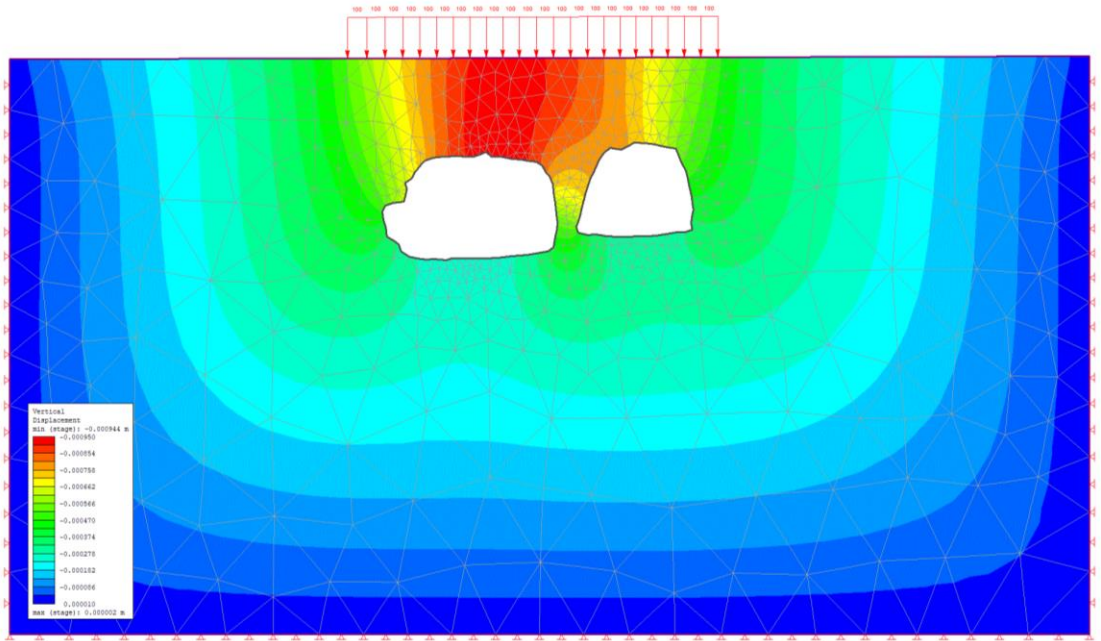
RS2 yazılımında dayanım faktörü (strength factor) belirli bir seviyedeki malzeme dayanımının, o seviyede etkili olan gerilmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir. Dayanım faktörünün 1’den büyük olması, malzeme dayanımının etkili olan gerilme şartlarından büyük olduğunun ve dolayısıyla bir yenilmenin olmayacağını ifade eder. Bu kapsamda Lokasyon-1’deki 1 nolu kesit için dayanım faktörünün dağılımı Şekil 4.8’de verilmiştir.



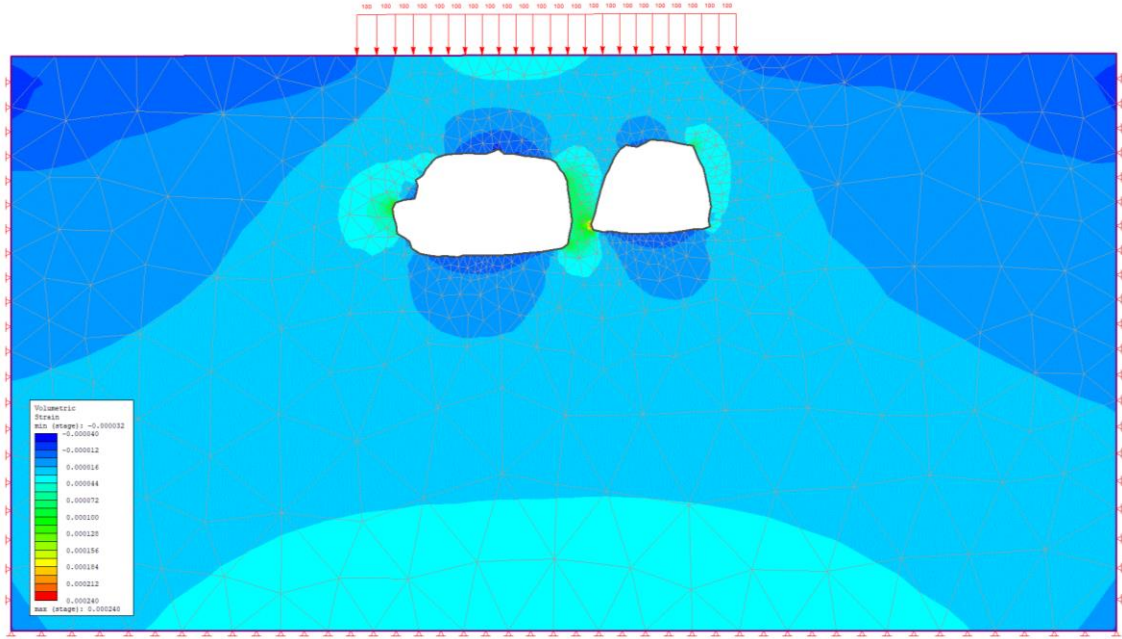
Şekil 4.8 Lokasyon-1/Kesit-1’de dayanım faktörü dağılımı

Şekil 4.8’de dayanım faktörü değerlerinin modelin hiçbir yerinde 1’in altına düşmediği görülmektedir. Bu nedenle mevcut koşullar için hazırlanan modelde herhangi bir yenilme beklenmemektedir. Diğer bir ifadeyle, yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan gerilme değerleri, malzemenin (ignimbirit) basınç ve çekme dayanımı değerlerinden daha düşüktür. Açıklıkların yan duvarlarında oluşan yüksek gerilme değerlerine rağmen bu bölümlerdeki dayanım faktörü değerleri 2 civarındadır.

Şekil 4.9’da incelenen kesit için düşey yerdeğiştirme değerleri sunulmuştur. Düşey yerdeğiştirme geniş olan açıklığın tavanında dar olan açıklığa oranla daha yüksek değerler sunmaktadır. Buna göre, maksimum olarak düşey yerdeğiştirme değeri tavanda 1 milimetre civarındadır. Öte yandan, incelenen açıklıklardaki hacimsel deformasyon dağılımı Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Hacimsel deformasyonların açıklıklar arasında kalan kesimlerde yoğunlaştığı ancak önemli bir değere ulaşmadığı (en yüksek 0.0002) göze çarpmaktadır.



Şekil 4.9 Lokasyon-1/Kesit-1’de düşey yerdeğiştirme dağılımı

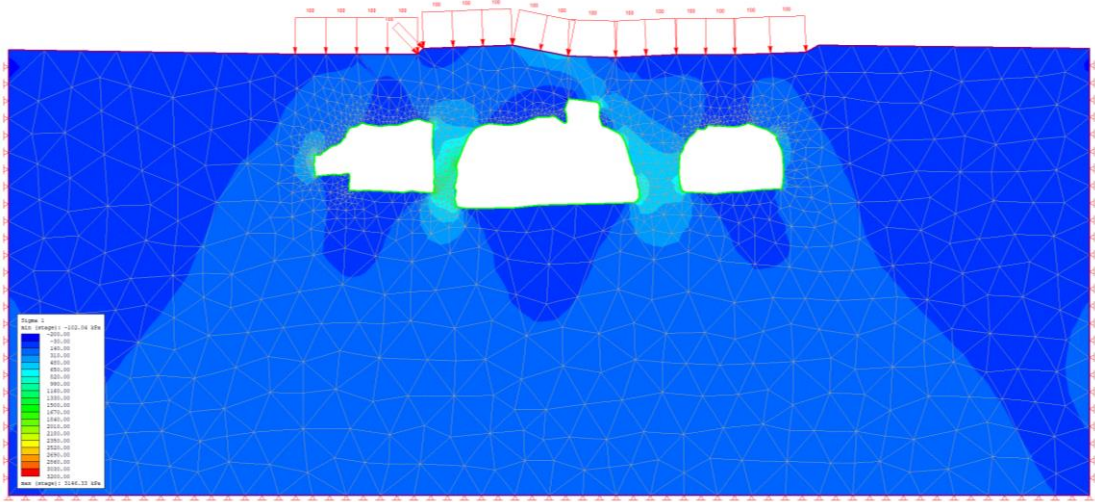


Şekil 4.10 Lokasyon-1/Kesit-1’de hacimsel deformasyon dağılımı

4.5.2 Lokasyon-1/Kesit 2’deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

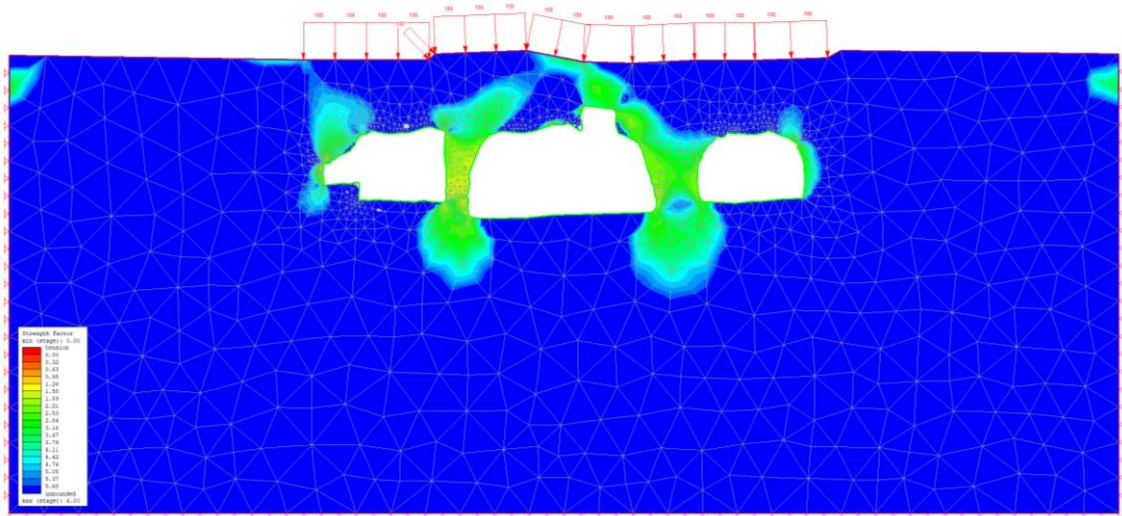
Lokasyon-1’e ait ikinci kesit, inceleme alanındaki üç adet yeraltı boşluğunu içermektedir. Kesit 2’deki üç adet yeraltı açıklığının genişlikleri 3.76, 5.76 ve 3.26 metre, yükseklikleri ortalama 3.41 metredir. Kaya oyma mekânların üzerindeki örtü kalınlığı 2.3 metre civarındadır. Mevcut gerilme koşullarına bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda Lokasyon-1/Kesit-2’deki maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı Şekil 4.11’de sunulmaktadır.

Şekil 4.11’de gösterilen maksimum asal gerilme dağılımında açıklık tavanlarında 30 kPa mertebesinde çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu çekme gerilmesi değeri ignimbiritin laboratuvarda belirlenen minimum çekme dayanımından (0.51 MPa) oldukça düşüktür. Bu sonuç, oluşan bu gerilme koşulunda çekme gerilmelerine bağlı bir yenilmenin olmayacağını işaret etmektedir. Bununla birlikte, modeldeki maksimum basınç gerilmesi değeri 3200 kPa (~3.2 MPa) civarında oluşmuştur. Genel olarak basınç gerilmeleri, bir önceki kesitte olduğu gibi açıklıkların duvar bölgelerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 4.11 Lokasyon-1/Kesit-2’de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı

Lokasyon-1’deki 2 nolu kesit için dayanım faktörünün dağılımı Şekil 4.12’de verilmiştir. Elde edilen dayanım faktörü sonuçları aynı alandaki 1 nolu kesit hattında elde edilen sonuçlarla oldukça benzerlik göstermektedir. Üç adet kaya mekânın bir arada bulunduğu bu kesit hattında, açıklık tavanlarında ve yan duvarlarda herhangi bir yenilme bu koşullarda beklenmemektedir. Yan duvarlarda dayanım faktörü değeri azalsa bile 2 civarlarındadır. Bu durum da belirli bir seviyedeki malzeme dayanımının o seviyedeki gerilmeye oranının yüksek olduğunu göstermekte ve kesitte herhangi bir yenilmenin olmayacağını ortaya koymaktadır.



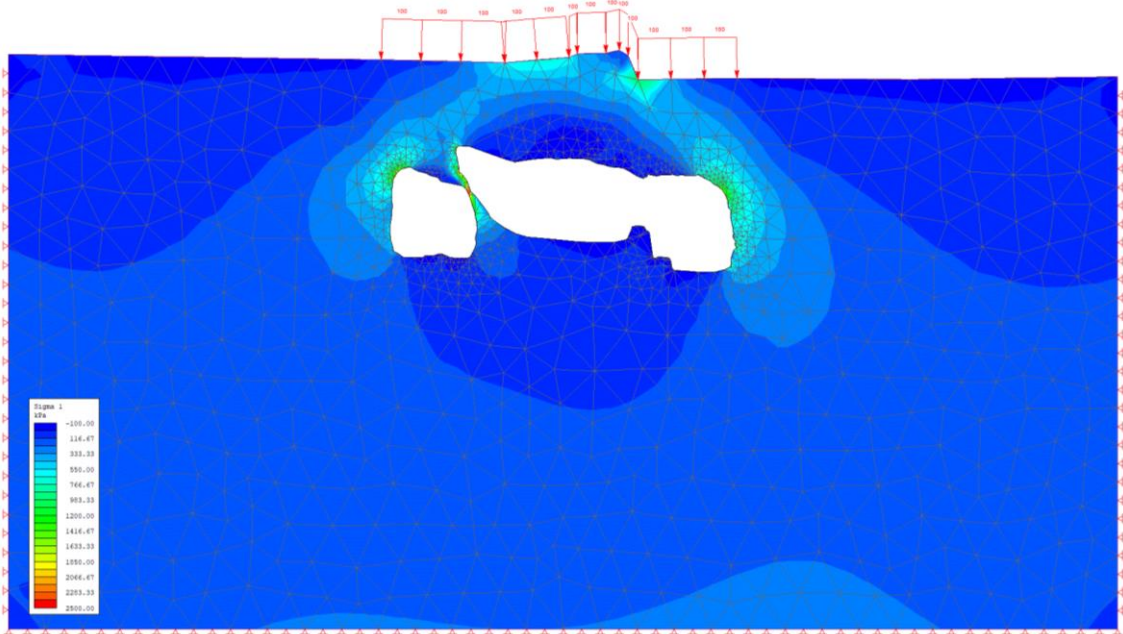
Şekil 4.12 Lokasyon-1/Kesit-2’de dayanım faktörü dağılımı

4.5.3 Lokasyon-2/Kesit 1'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

Bundan önceki bölümde Lokasyon-1'deki iki ayrı kesit hattına ait sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonuçları sunulmuştur. Bu bölümde Derinkuyu yerleşiminin farklı bir bölgesinde yer alan Lokasyon-2'deki analiz sonuçlarına yer verilecektir.

Lokasyon-2 de yer alan 1 nolu kesitte iki adet kaya oyma mekân mevcuttur. Bu kesitteki büyük açıklığın genişliği 6.47 metre, yüksekliği ise 1.87 metre ve 2.49 metre arasında değişmektedir. Tavandaki örtü kalınlığı yaklaşık 2.64 metredir. Bir önceki lokasyondaki açıklıklardan farklı olarak, bu açıklık önemli bir genişliğe sahiptir. Açıklık tavanına 100 kPa ilave gerilme bu modelde de konulmuştur.

Mevcut gerilme koşullarına bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda Lokasyon-2/Kesit-1'deki maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

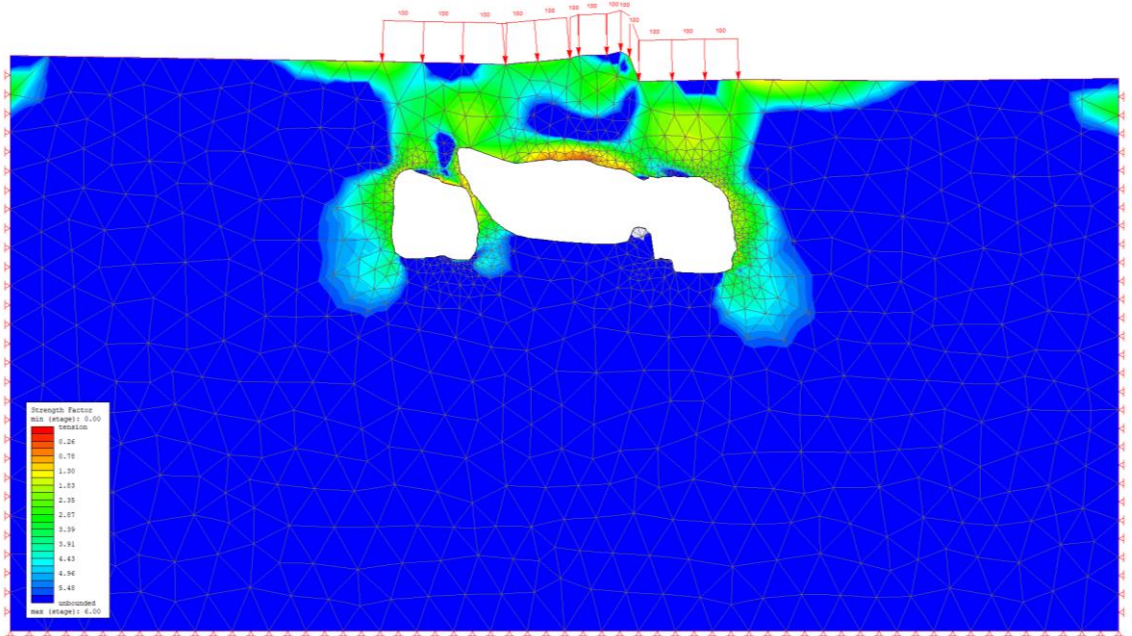


Şekil 4.15 Lokasyon-2/Kesit-1'de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı

Lokasyon-2/Kesit-1'deki maksimum asal gerilme dağılımında açıklık tavanlarında maksimum 71.65 kPa mertebesinde çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu çekme gerilmesi değeri diğer lokasyonlarda ve kesitlerde olduğu gibi ignimbiritin laboratuvarında belirlenen minimum çekme dayanımından (0.51 MPa) oldukça düşüktür. Bunun yanı

sıra, modeldeki maksimum basınç gerilmesi değeri 2458 kPa (~2.5 MPa) civarındadır ve basınç gerilmeleri, özellikle iki kaya oyma mekânın arasındaki incelen duvar kesiminde yoğunlaşmıştır.

Lokasyon-2'deki 1 nolu kesit için dayanım faktörünün dağılımı Şekil 4.16'da verilmiştir. Biri oldukça geniş olmak üzere iki adet kaya oyma mekânın bir arada bulunduğu bu kesit hattında, özellikle yaklaşık 6.5 metre genişliğe ve 1.9 m yüksekliğe sahip geniş açıklığın tavan kesimlerinde dayanım faktörünün 1'in altına düştüğü belirlenmiştir.

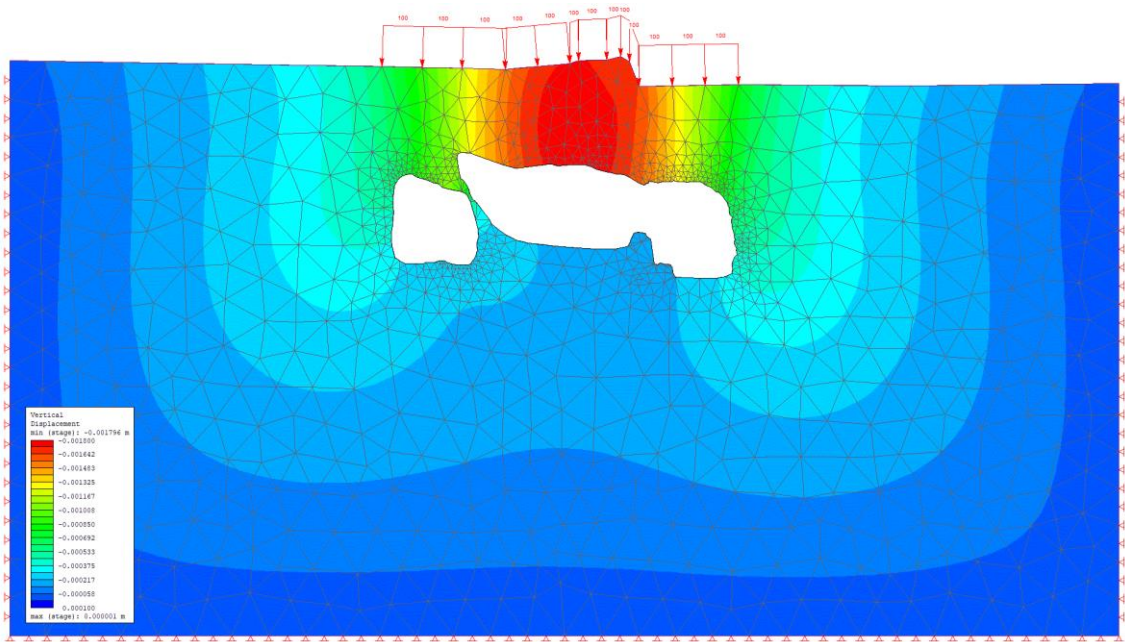


Şekil 4.16 Lokasyon-2/Kesit-1'de dayanım faktörü dağılımı

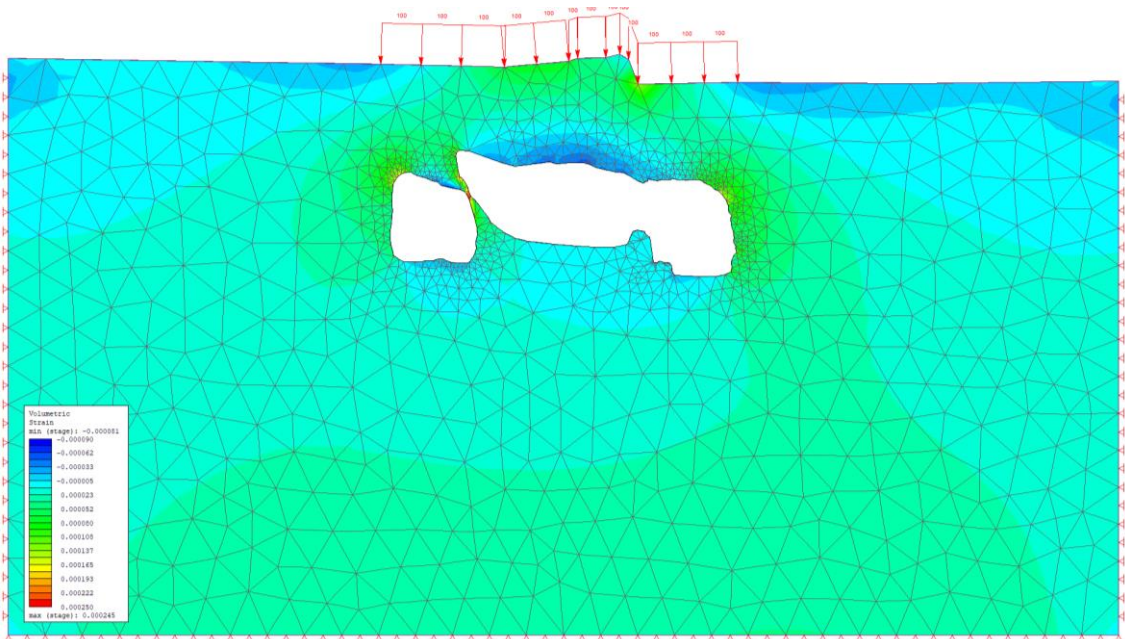
Ancak dayanım faktörünün 1'in altına indiği kesimler oldukça sınırlıdır ve açıklık tavanının üzerinden itibaren 10-20 cm'lik bir kesimi içermektedir. Bu sonuç açıklık tavanında toptan göçme tarzında bir yenilme yerine lokal yenilme problemleri olabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde iki yeraltı açıklığının arasındaki ince duvarda da dayanım faktörü 1 değerinin oldukça altına (0.26) inmektedir.

Lokasyon-2/Kesit-1'deki düşey yerdeğiştirme modeli Şekil 4.17'de sunulmaktadır. Bu kesit hattında belirlenen maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı 1.8 mm civarındadır ve yüksek deplasman değerleri geniş açıklığın tavanında yoğunlaşmıştır. Kesitlerdeki açıklıkların duvar kısımlarının tavan kesimlerine göre daha az düşey yerdeğiştirmeye

maruz kaldığı görülmektedir. İncelenen sahadaki hacimsel deformasyon dağılımı Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Hacimsel deformasyonların açıklıklar arasında kalan kesimlerde yoğunlaştığı ancak önemli bir değere ulaşmadığı (en yüksek 0.0003) tespit edilmiştir. Ancak yine de yeraltı açıklık boyutunun artmasına bağlı olarak diğer kesitlere göre çok düşük miktarda da olsa daha fazla hacimsel deformasyona meydana geldiği saptanmıştır.



Şekil 4.17 Lokasyon-2/Kesit-1’de düşey yerdeğiştirme dağılımı

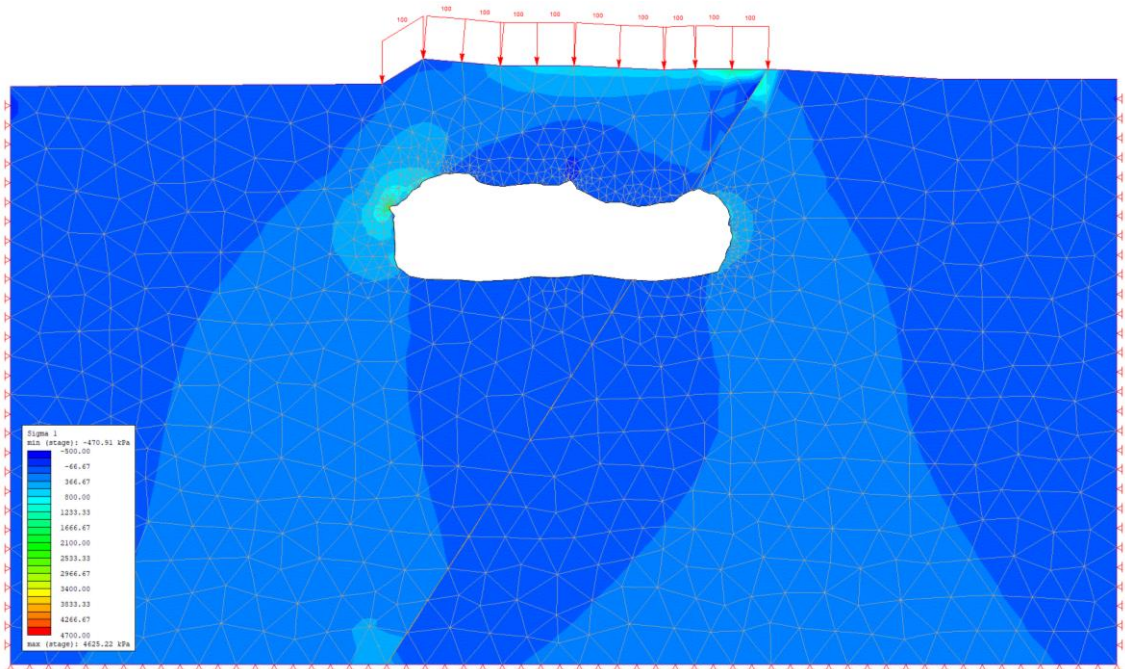


Şekil 4.18 Lokasyon-2/Kesit-1’de hacimsel deformasyon dağılımı

4.5.4 Lokasyon-2/Kesit 2'deki Duraylılığının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

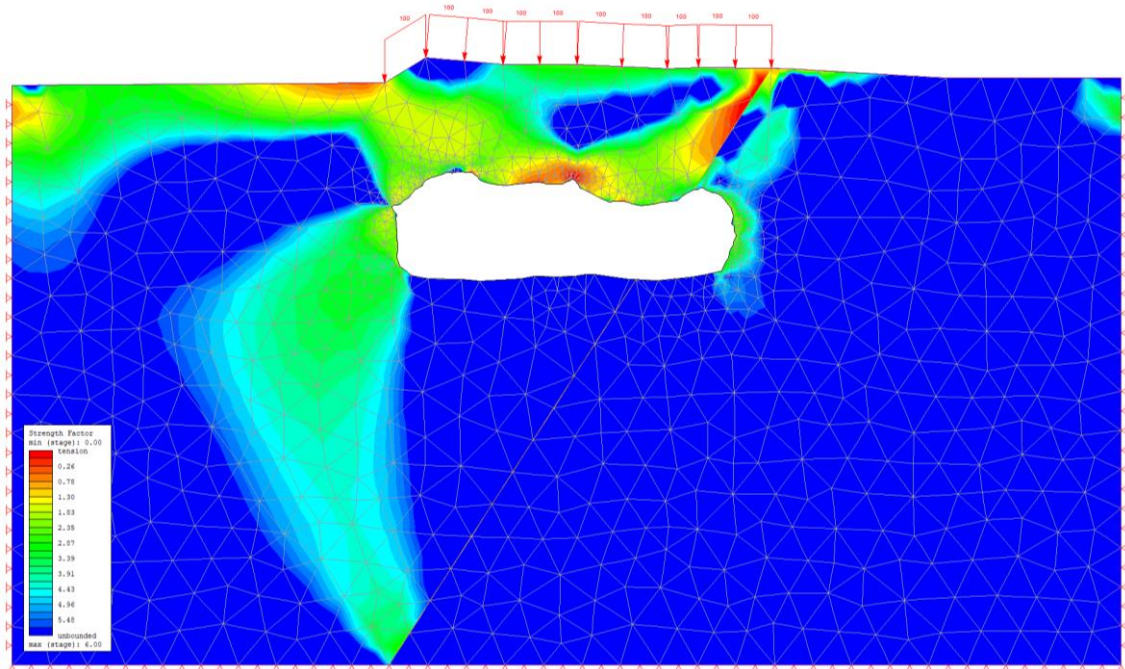
Lokasyon-2'de yer alan ikinci kesitte sadece bir adet kaya oyma mekân mevcuttur. Aynı inceleme sahasında bulunan bu kaya oyma mekânın genişliği 8.83 metre, yüksekliği ortalama 2.73 metredir. Tavan üzerindeki örtü kalınlığı yaklaşık 3.08 metredir. Bu tez kapsamında incelenen en büyük açıklık bu kesit hattında yer almaktadır. Açıklık boyutu büyük olmasına rağmen, açıklığın yüzeyden itibaren derinliği diğer kesit hatlarındaki yeraltı boşluklarına oranla daha fazladır. Diğer bir ifadeyle bu açıklık daha derindedir. Öte yandan bu açıklığı diğer yeraltı boşluklarından farklı olarak bir adet süreksizlik kesmektedir.

Mevcut gerilme koşullarına bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda Lokasyon-2/Kesit-2'deki maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Lokasyon-2/Kesit-2'deki maksimum asal gerilme dağılımında açıklık tavanlarında maksimum 470 kPa mertebesinde çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu çekme gerilmesi değeri bu tez çalışması kapsamında elde edilen en yüksek çekme değeridir ve ignimbiritin laboratuvarında belirlenen minimum çekme dayanımına (0.51 MPa) oldukça yakındır. Bunun yanı sıra, modeldeki maksimum basınç gerilmesi değeri 4625 kPa (~4.6 MPa) civarındadır ve basınç gerilmeleri özellikle kaya oyma mekânın duvar kesiminde yoğunlaşmıştır.



Şekil 4.19 Lokasyon-2/Kesit-2'de maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı

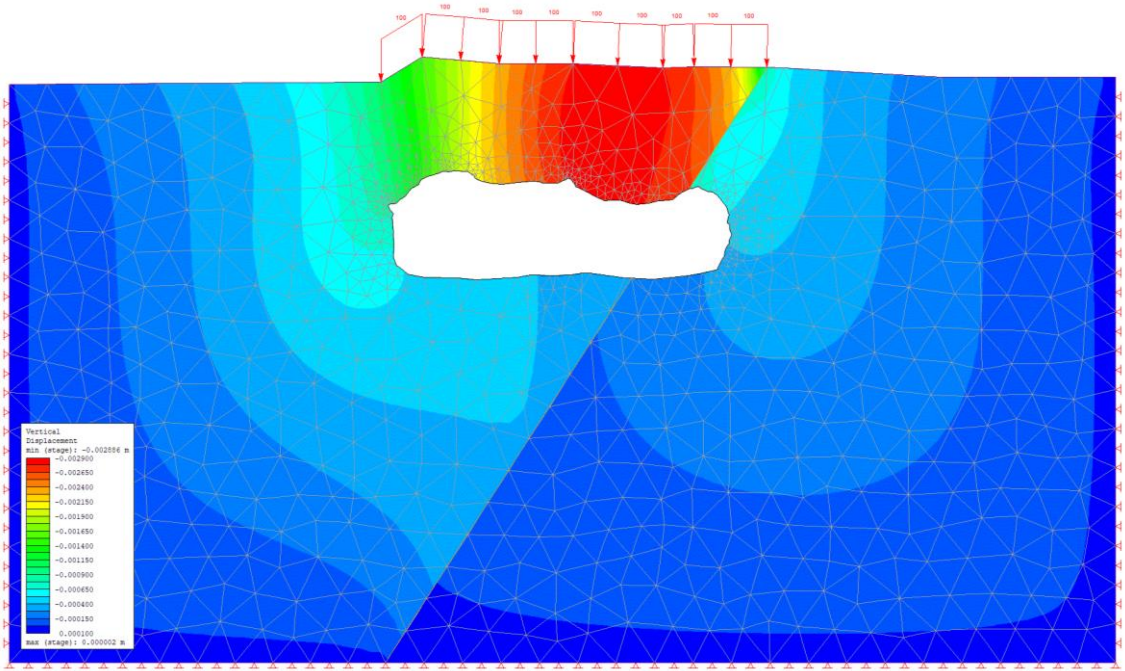
Lokasyon-2'deki 2 nolu kesit için dayanım faktörünün dağılımı Şekil 4.20'de verilmiştir. 100 kPa ilave düşey gerilmeler altında incelenen yeraltı boşluğunun tavan kesimlerinde dayanım faktörünün 1'in altına düştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte açıklığı kesen süreksizlikte de yenilmelerin olabileceğini işaret eden dayanım faktörü değerleri (0.26) elde edilmiştir. Buna göre sadece örtü yükü gerilmelerine maruz kalan söz konusu açıklık duraylılığını koruyabilse de, bina yükü, trafik yükü vb. gibi ilave gerilmeler altında kaya oyma mekânda yenilmelerin oluşması muhtemeldir. Diğer kesimlerde dayanım faktörü değeri 2.8 mertebelerindedir ve herhangi bir yenilmeyi işaret etmemektedir.



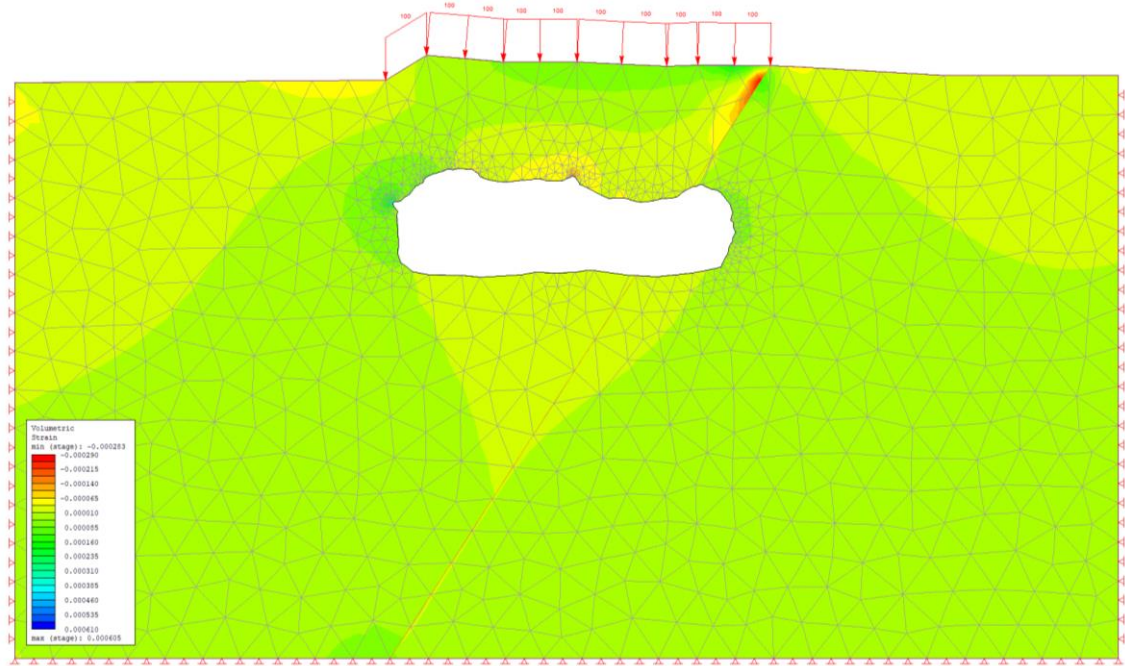
Şekil 4.20 Lokasyon-2/Kesit-2'de dayanım faktörü dağılımı

Lokasyon-2/Kesit-2'deki 100 kPa düşey gerilmeler altında meydana gelen düşey yerdeğiştirme dağılımı Şekil 4.21'de sunulmaktadır. Bu kesit hattında belirlenen maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı 3 mm civarındadır. Düşey deplasman değerleri geniş açıklığın tavanında yoğunlaşmıştır ve yerdeğiştirmenin süreksizlik tarafından kontrol edildiği görülmektedir. Süreksizliğin üzerindeki açıklık tavan kesiminde yerdeğiştirmeler artmıştır.

Kesit-2'deki hacimsel deformasyon dağılımı Şekil 4.22'de verilmiştir. Hacimsel deformasyonlar süreksizlik çevresinde yoğunlaşsa da bu açıklık için önemli bir değere ulaşmadığı görülmektedir.



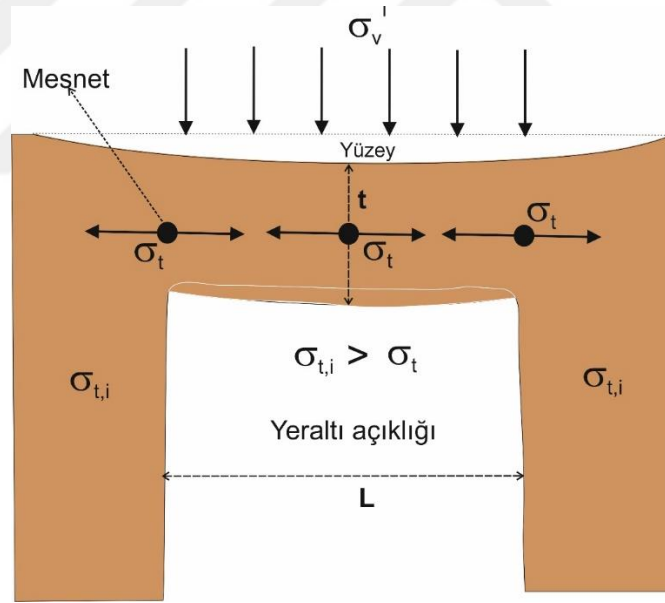
Şekil 4.21 Lokasyon-2/Kesit-2’de düşey yerdeğiştirme dağılımı



Şekil 4.22 Lokasyon-2/Kesit-2’de hacimsel deformasyon dağılımı

4.6 İncelenen Yeraltı Açıklıklarında Analitik Yöntemlerle Gerilme Analizi

Yüzeyden itibaren sığ derinliklerde açılan (tavan kalınlığı düşük) ve tam olarak dairesel olmayan yeraltı boşluklarının üzerindeki örtü yüküne ve insani faaliyetlere (yapı ve trafik yükleri vb.) bağlı olarak oluşan düşey efektif gerilmeler (σ_v'), boşluk tavanında çekme ve makaslama gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda, kazı kolaylığı nedeniyle zayıf kaya kütleleri içinde açılan bu boşlukların tavan bölümlerinin birer kiriş gibi davrandığı düşünülebilir. Buna göre, kaya kütlelerinde yenilmeyi kontrol edecek bir süreksizlik düzlemi bulunmaması durumunda, açıklık tavanında bir yenilme olmaması için tavanın kenar kesimlerinde (mesnet) ve ortasında oluşan çekme gerilmelerinin (σ_t), kaya malzemesinin laboratuvarında belirlenen çekme dayanımından ($\sigma_{t,i}$) büyük olması gerekmektedir (Şekil 4.23). Aynı şekilde, makaslama dayanımı için de benzer koşulun sağlanması lazımdır.



Şekil 4.23 Yeraltı açıklık tavanında oluşan çekme gerilmelerinin kaya malzemesi çekme dayanımı ile karşılaştırılması [26]

Sığ ve dairesel olmayan, süreksizlik kontrollü yenilmelerin beklenmediği yeraltı açıklıklarında açıklık tavan mesnetlerine etkiyecek çekme gerilmesinin belirlenmesinde kirişler için kullanılan aşağıdaki eşitlikten yararlanılabilir. Tavan ortasındaki çekme gerilmesi, mesnetlere etkiyen gerilmenin yarısı olarak kabul edilebilir [26].

$$\sigma_t = \left(\frac{g\gamma t}{2}\right) \left(\frac{L}{t}\right)^2$$

Burada;

σ_t : Çekme gerilmesi

g : Yerçekimi ivmesi

γ : Tavan seviyesi üstündeki kayanın birim hacim ağırlığı

t : Yüzeyden itibaren açıklık tavanına olan derinlik, tavan (örtü yükü) kalınlığı

L : Açıklık genişliği

Mesnetlere etkiyecek makaslama gerilmesinin hesaplanmasında ise aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$\tau = \left(\frac{gL}{2}\right) \gamma$$

İnceleme alanımız olan Namık Kemal Mahallesi L33A15B4C Pafta 10 Ada 4 Parsel ve Baş Mahalle 30.27.A.A. Pafta 105 Ada 1 Parsel içindeki kaya oyma yapıların yapımı esnasında farklı boyutlarda yeraltı boşlukları oluşturulmuştur. Bu açıklıklardaki çekme ve makaslama gerilmeleri kaya oyma mekânların duraylılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu açıklıklardaki örtü kalınlığı ve boşluk boyutları dikkate alınarak çekme ve makaslama gerilmesi değerleri yukarıdaki bölümde bahsedilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır. Lokasyon-1 ve Lokasyon-2’de bulunan açıklıklar için hesaplanan çekme ve makaslama gerilmesi değerleri Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Lokasyon-1 ve Lokasyon-2’deki farklı kesit hatlarına ait yeraltı açıklıklarında oluşan çekme ve makaslama gerilmesi değerleri

LOKASYON NO	KESİT NO	AÇIKLIK NO	Genişlik (L) (m)	Örtü Kalınlığı (t) (m)	γ (kN/m ³)	g (m/sn ²)	Çekme Gerilmesi (σ_t) (MPa)		Makaslama Gerilmesi (τ) (MPa)
							Mesnetlerde	Tavan Ortasında	
1	1	1	4.78	2.51	18.66	0.00098	0.083	0.042	0.044
1	1	2	2.93	2.28	18.66	0.00098	0.034	0.017	0.027
1	2	1	3.26	1.23	18.66	0.00098	0.079	0.040	0.030
1	2	2	1.22	1.08	18.66	0.00098	0.013	0.006	0.011
1	2	3	4.03	3.31	18.66	0.00098	0.045	0.022	0.037
1	3	1	3.94	2.34	18.66	0.00098	0.061	0.030	0.036
1	3	2	5.76	1.38	18.66	0.00098	0.220	0.110	0.053
1	3	3	3.4	2.35	18.66	0.00098	0.045	0.023	0.031
2	1	1	2.24	2.83	18.66	0.00098	0.016	0.008	0.021
2	1	2	6.5	2.74	18.66	0.00098	0.141	0.071	0.059
2	2	1	8.8	3.03	18.66	0.00098	0.234	0.117	0.081

Tablo 4.6 incelendiğinde Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'deki farklı kesit hatlarına ait her bir yeraltı açıklığında oluşacak çekme gerilmesinin açıklık tavanlarının kenarlarındaki mesnet bölgelerinde 0.234 MPa değerine kadar ulaşabildiği görülmektedir. Hesaplamalarda mesnet bölgesi için elde edilen en düşük çekme gerilmesi ise 0.013 MPa'dır. Tavan bölgesinin orta noktasında ise daha düşük çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında Derinkuyu ignimbiritlerinin laboratuvarında belirlenen kuru koşullardaki çekme dayanımı 0.63 MPa iken, doygun koşullarda bu dayanım 0.32 MPa'a kadar düşmektedir. Öte yandan ignimbiritlerin kütsel çekme dayanımı Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü ile 0.366 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 4.5). Doygun koşullardaki en düşük çekme gerilmesi dayanım değeri (0.32 MPa) dikkate alınsa bile, analitik yöntemlerle belirlenen açıklık tavanında oluşacak maksimum çekme gerilmesi değerinden (0.234 MPa) büyüktür. Öte yandan Tablo 4.6'da sunulan makaslama gerilmesi değerleri de 0.011 ile 0.081 MPa arasında değişmekte olup, oldukça düşük değerlerdedir. Şekil 4.5'te inceleme alanlarındaki ignimbiritler için Hoek-Brown yenilme ölçütü yardımıyla hazırlanan eğrisel yenilme zarfı dikkate alındığında bu değerlerin zarfın güvenli bölgesinde kaldığı görülecektir.

Tablo 4.6'da verilen sonuçlarda, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan hesaplamalarda kullanılan 100 kPa ilave düşey gerilme dikkate alınmamıştır. Diğer bir ifadeyle, Tablo 4.6'da sunulan değerler, açıklıkların mevcut koşullarında, üzerlerinde herhangi bir ilave gerilme olmayan durumu yansıtmaktadır ve bu değerler tavan kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir.

Yumuşak ve düşük dayanıma sahip kaya kütlelerinde açılan bu tür yeraltı boşluklarında minimum tavan kalınlığının olması gerektiği değerin incelenmesi amacıyla, incelenen yeraltı boşluklarında örtü kalınlığı (t) değeri, oluşan çekme gerilmesinin, inceleme alanlarındaki ignimbiritlerin minimum çekme dayanımına (0.32 MPa) yaklaşık eşit olacak şekilde azaltılmıştır. Buna göre Tablo 4.7'den de görülebileceği üzere, yeraltı açıklıklarında 1 m örtü kalınlığından daha az kalınlıklarda oluşan çekme gerilmelerinin malzemenin çekme gerilmesine eşitlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, bu örtü kalınlığı değerlerinden daha az kalınlıklarda, açıklık tavanlarında yerçekimi etkisiyle yenilme olması muhtemeldir.

Tablo 4.7. Lokasyon-1 ve Lokasyon-2'deki farklı kesit hatlarına ait yeraltı açıklıklarında yenilme olmadan oluşturulabilecek minimum örtü kalınlığı (t) değerleri

LOKASYON NO	KESİT NO	AÇIKLIK NO	Genişlik (L) (m)	Örtü Kalınlığı (t) (m)	γ (kN/m ³)	g m/sn ²	Çekme Gerilmesi (σ_t) (MPa)		Makaslama Gerilmesi (τ) MPa
							Mesnetlerde	Tavan Ortasında	
1	1	1	4.78	0.65	18.66	0.00098	0.322	0.161	0.044
1	1	2	2.93	0.24	18.66	0.00098	0.327	0.164	0.027
1	2	1	3.26	0.3	18.66	0.00098	0.324	0.162	0.030
1	2	2	1.22	0.1	18.66	0.00098	0.136	0.068	0.011
1	2	3	4.03	0.46	18.66	0.00098	0.323	0.162	0.037
1	3	1	3.94	0.44	18.66	0.00098	0.323	0.161	0.036
1	3	2	5.76	0.94	18.66	0.00098	0.323	0.162	0.053
1	3	3	3.4	0.33	18.66	0.00098	0.321	0.160	0.031
2	1	1	2.24	0.14	18.66	0.00098	0.328	0.164	0.021
2	1	2	6.5	1.2	18.66	0.00098	0.322	0.161	0.059
2	2	1	8.8	2.2	18.66	0.00098	0.322	0.161	0.081

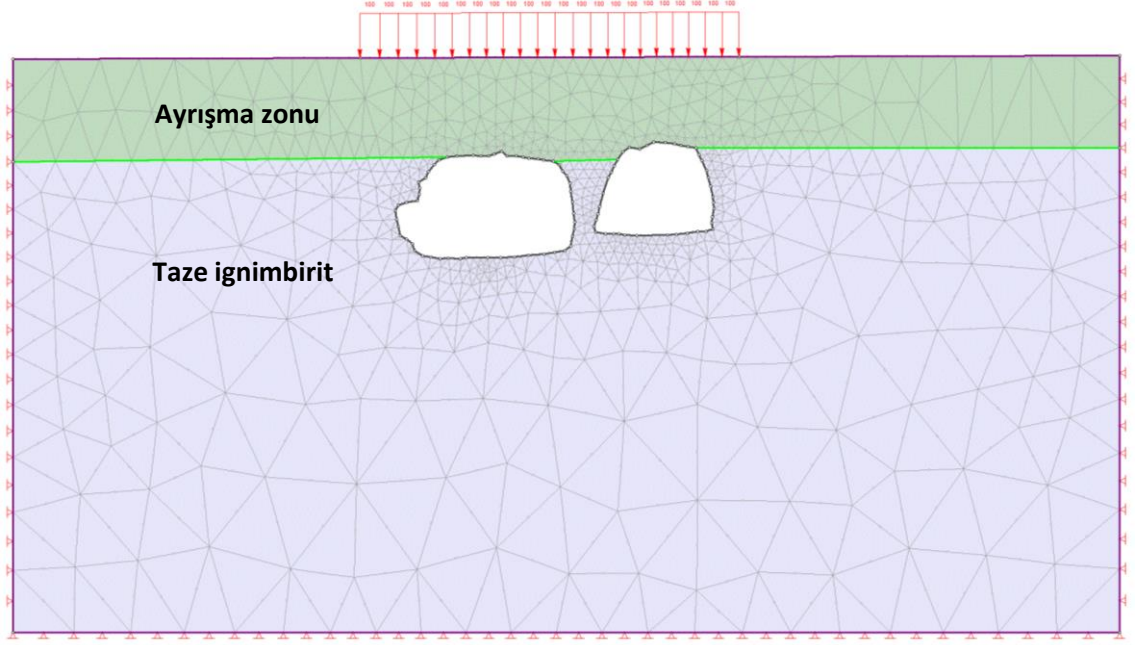
4.7 Ayırışmanın ve Süreksizliklerin Yeraltı Açıklıklarının Duraylılığı Üzerindeki Etkisi

Tez çalışmasının bundan önceki bölümlerinde Derinkuyu ilçe merkezinde incelemeye konu olan iki farklı lokasyondaki yeraltı açıklıklarının duraylılığı farklı koşullar dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle ve analitik hesaplamalarla değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde 100 kPa ek düşey gerilmeler altında boyutları değişkenlik gösteren açıklıklarda lokal yenilmeler dışında toptan göçme şeklinde bir yenilme beklenmemektedir. Bunun yanı sıra, analitik çözümler mevcut yeraltı boşluklarının üzerlerindeki örtü kalınlığının yeterli olduğunu ve örtü yükü nedeniyle oluşacak çekme gerilmelerinin malzemenin çekme dayanımını aşmadığını ortaya koymaktadır.

Yapılan değerlendirmeler kapsamında yeraltı açıklıklarının üzerindeki tavan biriminin jeomühendislik özelliklerinin özellikle yüzey sularından etkilenmediği ve ayırışma gözlenmediği kabul edilmiştir. Ancak, piroklastik bir kaya türü olan ignimbiritler su etkisine karşı oldukça hassastırlar ve suyla temas halinde bünyelerine çok miktarda su alma kapasiteleri olduğundan kolaylıkla ayırışma eğilimi içerisine girmektedirler.

Bu kapsamda tez çalışması kapsamında incelenen yeraltı açıklıklarının üzerindeki örtü biriminde ayırışmış bir zon kabul edilmiş ve malzeme parametrelerinin değerleri ayırışmanın etkisini ortaya koymak amacıyla azaltılmıştır. Lokasyon-1'deki 1 nolu kesit

hattının dikkate alındığı değerlendirilmede, ayrışma zonunun açıklığın içerisindeki tavan kotuna kadar devam ettiği kabul edilmiştir (Şekil 4.24). Bununla birlikte ayrışma zonuna ait malzeme parametreleri de Tablo 4.8’de sunulmaktadır.

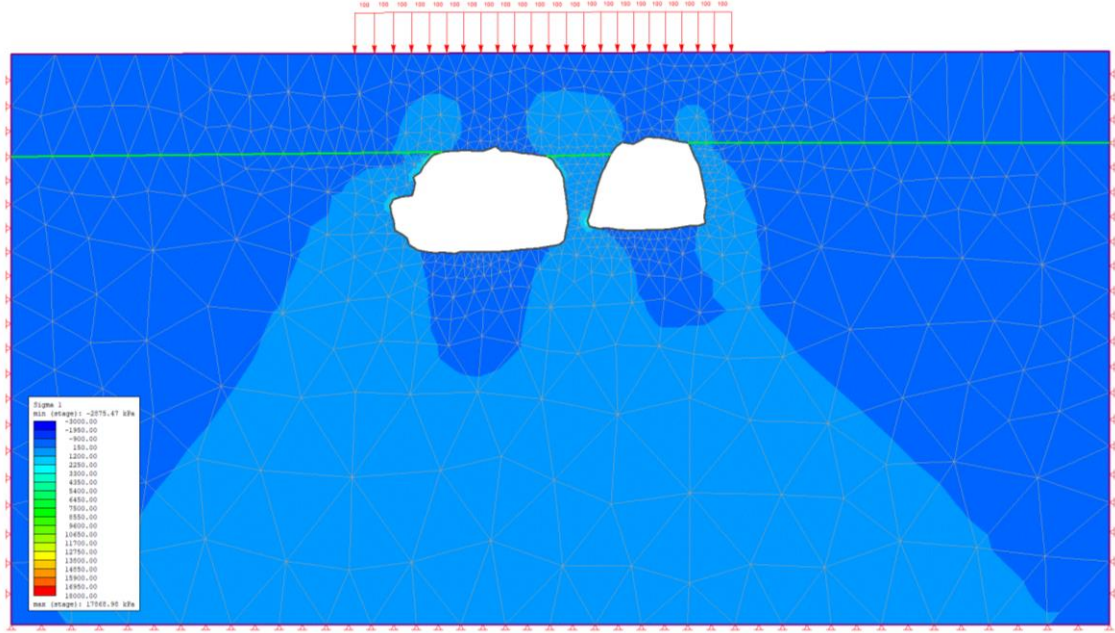


Şekil 4.24 Lokasyon-1/Kesit-1’de açıklık tavanında ayrışma zonu varsayımı

Tablo 4.8 Sonlu elemanlar analizlerinde yeraltı açıklık tabanında olduğu varsayılan ayrışma zonuna ait malzeme özellikleri

Parametre	Değer
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	5
m_b	3
s	0.001
a	0.5
Elastisite modülü (GPa)	0.002
Poisson oranı	0.3
Birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	14

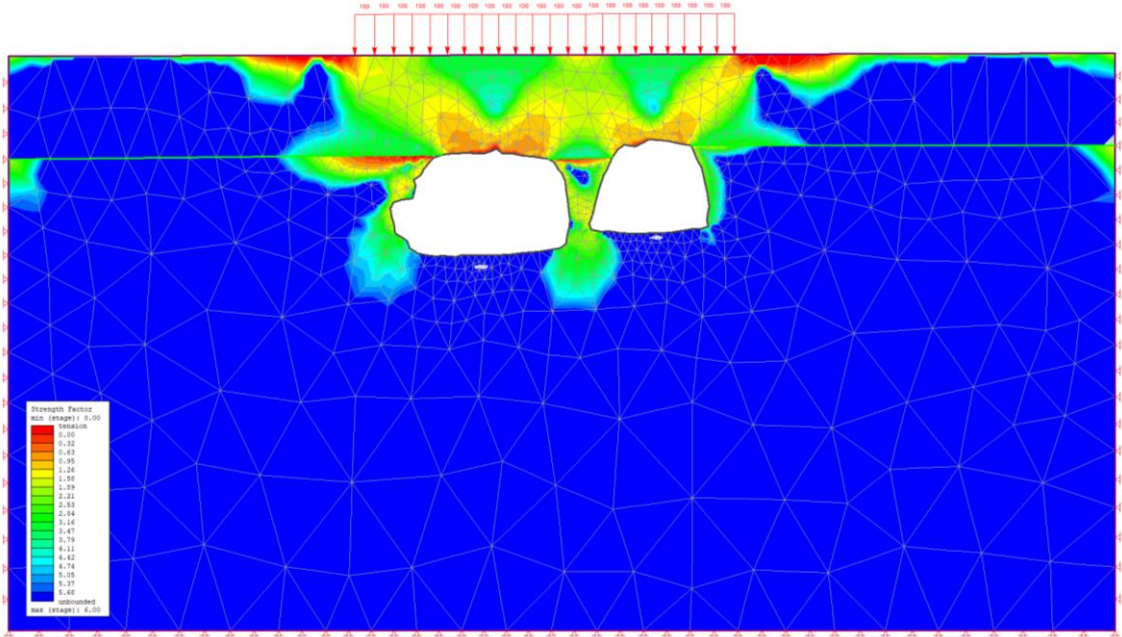
Yeraltı açıklıklarının tavan kesiminde bir ayrışma zonu varsayımına göre gerçekleştirilen analizler sonucunda Lokasyon-1/Kesit-1 için maksimum asal gerilme dağılımı Şekil 4.25’te gösterilmiştir.



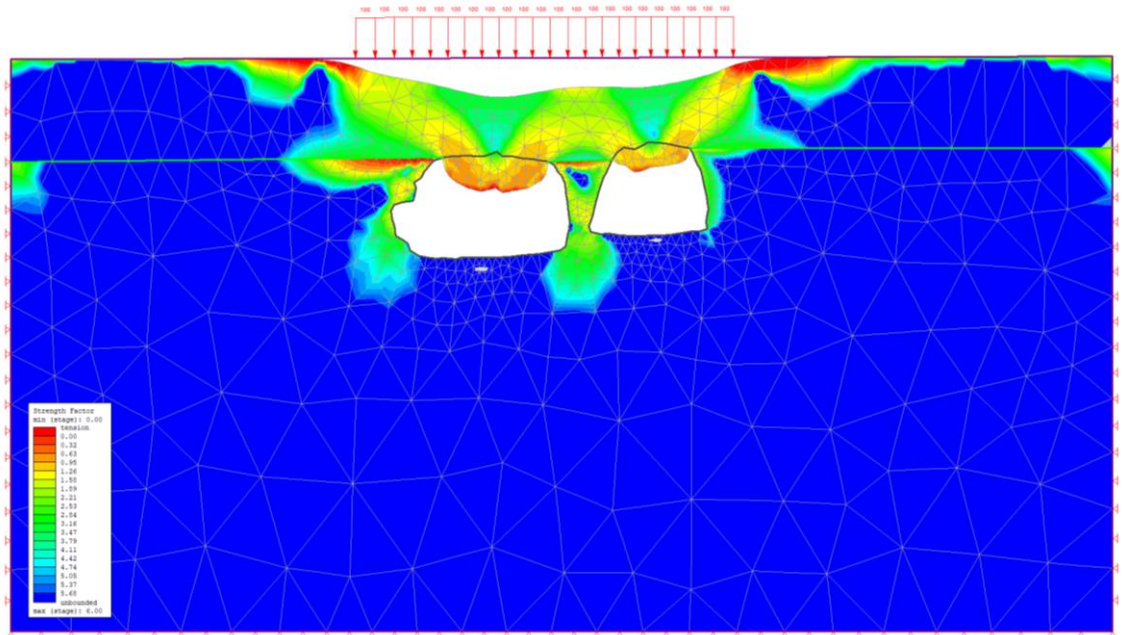
Şekil 4.25 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı

Şekil 4.25 incelendiğinde, kaya oyma mekanlarının tavanında oluşan asal gerilmelerin Şekil 4.6’da sunulan ayrışma zonu olmaması durumuna oranla daha fazla arttığı dikkati çekmektedir. Buna göre maksimum çekme gerilmeleri yaklaşık 2.8 MPa’a, basınç gerilmeleri ise 18 MPa’a kadar yükselebilmektedir. Bu değerler, ayrışma zonundaki ve taze seviyelerdeki ignimbiritlerin dayanım değerlerinin üzerindedir ve yenilmelerin olması kaçınılmazdır.

Şekil 4.26’te incelenen model için dayanım faktörü dağılımı sunulmaktadır. Buna göre, açıklık tavan kesimlerinde yenilmelerin olduğu açık şekilde görülmektedir. Bu yenilmeler açıklıkların tavan kesimlerinde oldukça geniş bir alanı kapsamaktadırlar ve yüzeye etkileri de kaçınılmazdır (Şekil 4.27).



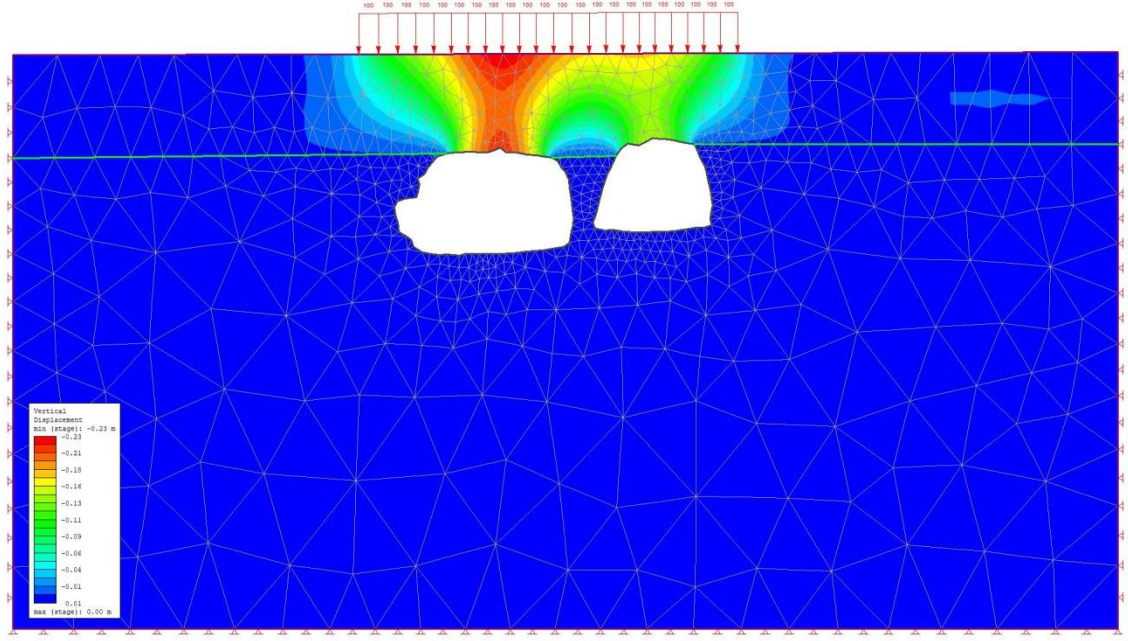
Şekil 4.26 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre dayanım faktörü dağılımı



Şekil 4.27 Lokasyon-1/Kesit-1’de ayrışma zonu varsayımına göre dayanım faktörünün deforme olmuş ağ görünümü

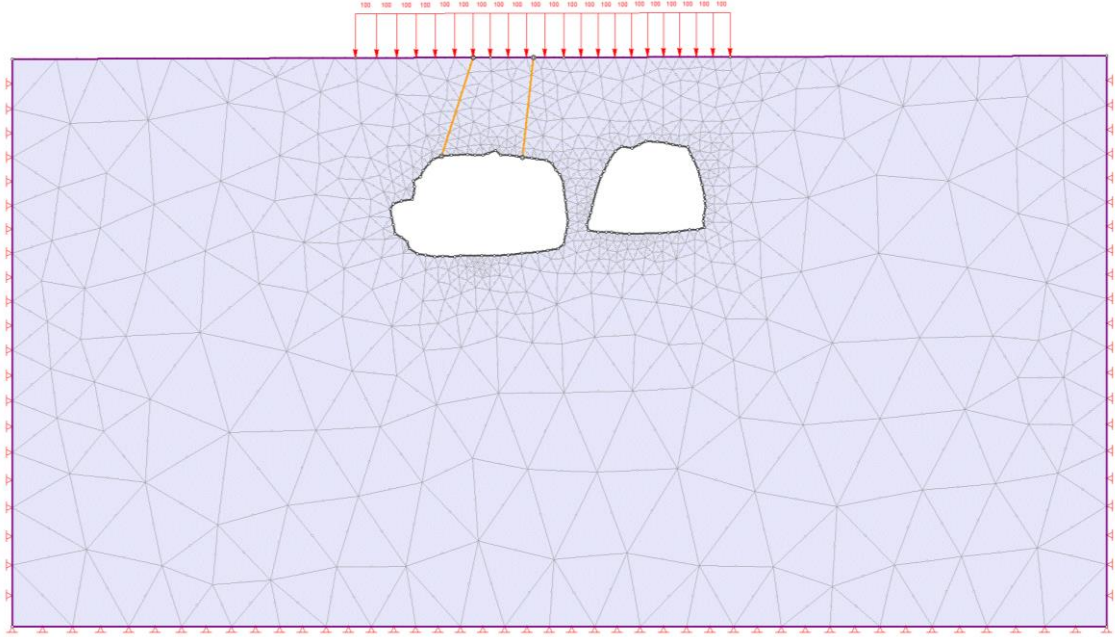
Şekil 4.28’de yeraltı boşluklarının tavan kesimlerinde meydana gelen düşey yerdeğiştirme dağılımı değerleri gösterilmektedir. Ayrışma zonu bulunmayan taze ignimbiritin yüzey kadar devam ettiği Şekil 4.9’da sunulan kesitte düşey yerdeğiştirme

miktarı 1 mm civarındayken, açıklık tavan kesimlerinde yüzeye kadar uzanan bir ayrışma zonu bulunması durumunda düşey yerdeğiştirmeler 23 cm'e kadar yükselebilmektedir. Belirlenen bu değer oldukça yüksek olup, bu mertebede bir düşey deplasman meydana gelmesi hem açıklık bütünlüğünün bozulmasına hem de yüzeydeki mevcut nesnelerin etkilenmesine neden olacaktır.



Şekil 4.28 Lokasyon-1/Kesit-1'de ayrışma zonu varsayımına göre düşey yerdeğiştirme dağılımı

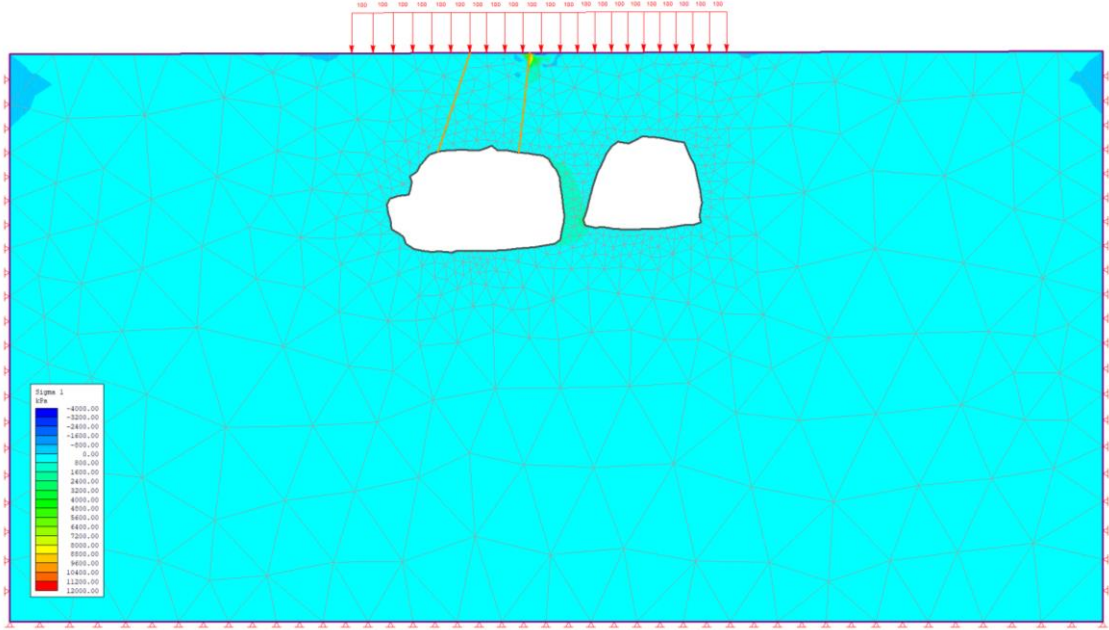
Yeraltı açıklıklarının tavan kesiminde oluşabilecek bir ayrışma zonunun kaya oyma mekanların duraylılığı üzerindeki olumsuz etkisi bundan önceki paragraflarda ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, ignimbirit kütlesi içerisinde birden fazla süreksizliğin tavan kesiminde keşişmesi sonucu oluşabilecek duraylılık koşulları da sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Lokasyon-1/Kesit-1'deki geniş yeraltı açıklığının tavanında kama bloğu oluşturacak yönelime sahip iki adet süreksizlik bulunduğu varsayılmıştır (Şekil 4.29).



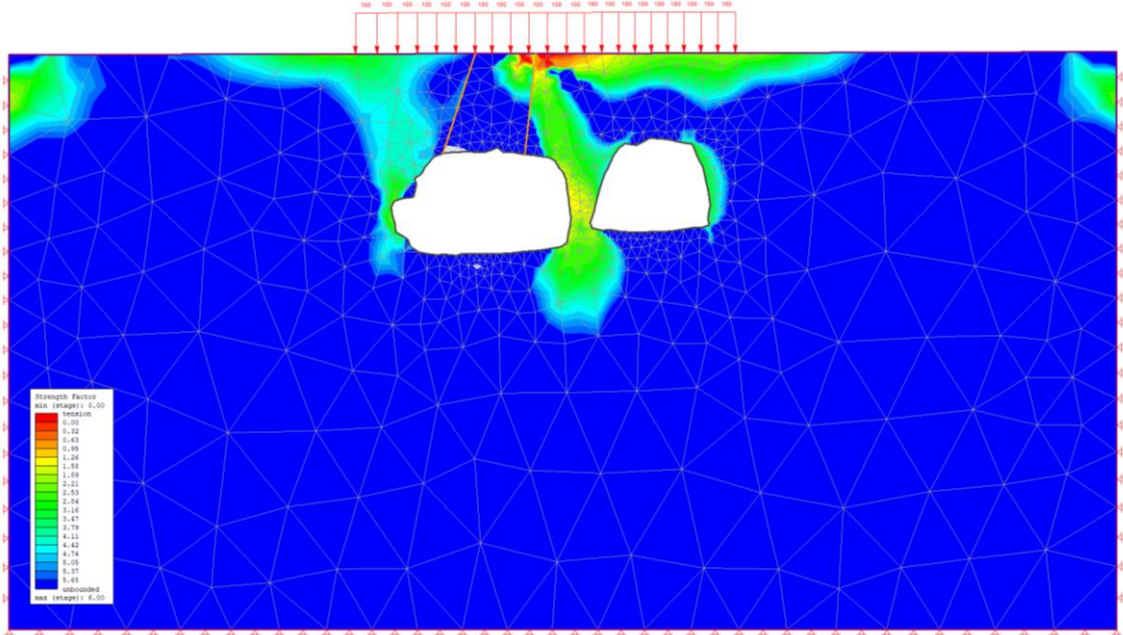
Şekil 4.29 Lokasyon-1/Kesit-1'de açıklık tavanında kama bloğu oluşturan iki adet süreksizlik bulunması varsayımı

Yeraltı açıklığının tavanında yer alan iki adet süreksizlik üzerine etki eden 100 kPa ilave düşey gerilmeye bağlı olarak meydana gelen asal gerilme dağılımı Şekil 4.29'da görülmektedir. Buna göre, açıklık çevresinde oluşabilecek maksimum asal gerilmeler 1000 kPa mertebesindedir. Süreksizlik çevresinde ve iki açıklığın arasındaki duvar bölümünde basınç gerilimi yoğunlaşmaları gözlenmektedir.

Şekil 4.30'da ise RS2 yazılımı ile belirlenen dayanım faktörü değerlerinin dağılımı verilmektedir. Süreksizliğin yüzey yakın kesimlerinde 100 kPa ek gerilme koşulları altında süreksizlik yüzeyinde bir yenilme olabileceği görülmektedir. Analizlerde, süreksizlikler için yenilme ölçütü olarak Barton-Bandis yenilme ölçütü dikkate alınmış olup, süreksizlik yüzey dayanımı (JCS) 1 MPa, süreksizlik yüzey pürüzlülük katsayısı (JRC) 4 ve rezidüel sürtünme açısı 20° olarak kabul edilmiştir. Elde edilen dayanım faktörü değerleri yenilmenin süreksizlik yüzeyleri boyunca gelişebileceğini işaret etmektedir.



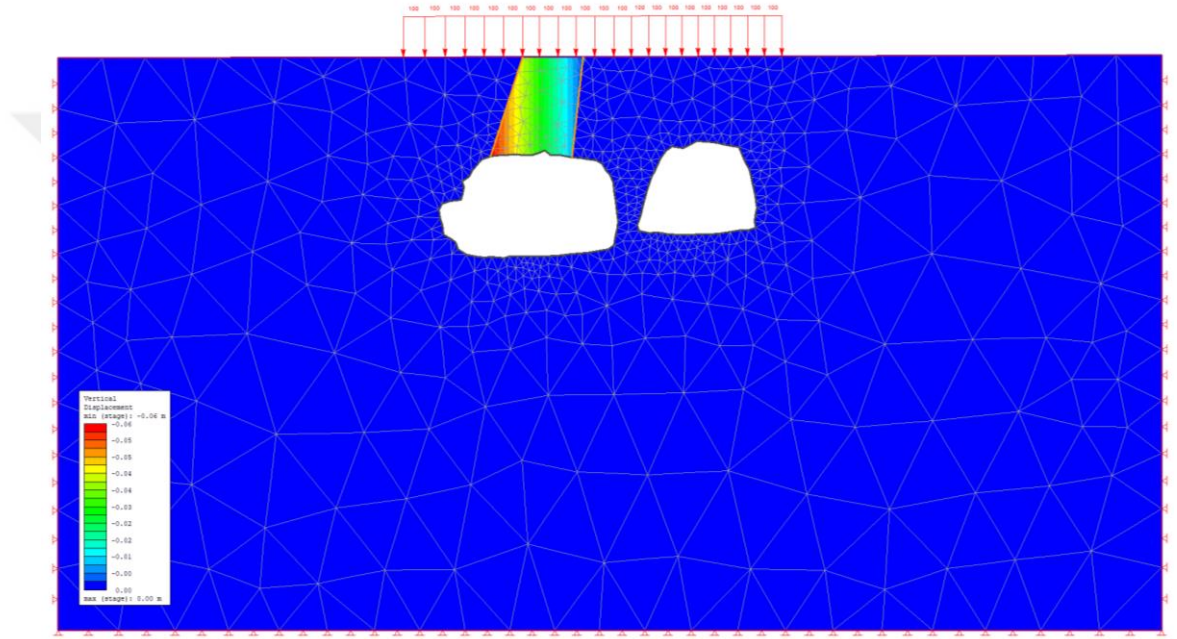
Şekil 4.30 Lokasyon-1/Kesit-1’de süreksizlik varsayımına göre maksimum asal gerilme (σ_1) dağılımı



Şekil 4.31 Lokasyon-1/Kesit-1’de süreksizlik varsayımına göre dayanım faktörü dağılımı

Şekil 4.32’de süreksizliklerin kestiği yeraltı boşluklarının tavan kesimlerinde meydana gelen düşey yerdeğiştirme dağılımı değerleri gösterilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere ayrışma zonu bulunmayan taze ignimbiritin yüzey kadar devam ettiği Şekil 4.9’da

sunulan kesitte düşey yerdeğiştirme miktarı 1 mm civarındayken, açıklık tavan kesimlerinde yüzeye kadar uzanan bir ayrışma zonu bulunması durumunda düşey yerdeğiştirmelerin 23 cm'e kadar olabileceği belirlenmiştir. Öte yandan açıklıkları kesen birden fazla süreksizlik bulunması durumunda süreksizlikler tarafından oluşturulan bloklarda yaklaşık 6 cm civarında yerdeğiştirme olacağı da Şekil 4.32'de görülebilmektedir. Belirlenen bu değer, kaya oyma mekanların tavan kesimlerinde duraysızlıkların tetiklenmesine neden olabilecektir.



Şekil 4.32 Lokasyon-1/Kesit-1'de süreksizlik varsayımına göre düşey yerdeğiştirme dağılımı

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Nevşehir iline bağlı Derinkuyu Belediyesi, Kapadokya yöresinde meşhur yedi katlı yeraltı şehri ile tanınmıştır. Yüzeyden itibaren yaklaşık 60 metre derinliğe kadar inen bu tarihi yeraltı şehri, bölgede geniş yayılım gösteren ignimbiritler içerisinde açılmıştır. Derinkuyu bu tarihi ve turistik yeraltı şehriyle ünlü olmakla birlikte, yerleşim içerisinde mevcut binaların altında birbiri ile bağlantılı da olabilen farklı boyutlarda ve düzensiz geometrilerde yeraltı boşlukları bulunmaktadır. Söz konusu boşlukların yeraltındaki yayılımına ait düzenli bir döküm bulunmadığından, bazı durumlarda bu yeraltı boşluklarının üzerine gelen yüklere bağlı olarak çökme olaylarının meydana geldiği de bilinmektedir. Özellikle mevcut ulaşım hatları altına denk gelen bu boşluklarda trafik yükleri nedeniyle oluşan yenilmeler mevcuttur.

Bu tez çalışması kapsamında diğer çalışmalara da örnek olması amacıyla Nevşehir ili Derinkuyu ilçesi Namık Kemal Mahallesi L33A15B4C Pafta 10 Ada 4 Parsel ve Baş Mahalle 30.27.A.A. Pafta 105 Ada 1 Parsel alanı içerisindeki kaya oyma mekânların duraylılığı gerçekleştirilen analizler ile değerlendirilmiştir.

Söz konusu kaya oyma mekânların rölöve projeleri dikkate alınarak farklı kesit hatları üzerindeki yeraltı boşluklarının sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizleri sonucunda incelenen yeraltı kaya oyma yapılarında 100 kPa ilave düşey gerilme etkisi altında herhangi bir duraaysızlık problemi olmayacağı tespit edilmiştir. Lokasyon-1, masif bir ignimbirit kütlesi içerisinde yer almaktayken, incelenen Lokasyon-2’de söz konusu açıklığı bir adet süreksizlik kesmektedir. Bu süreksizlik ikinci bir süreksizlik ile kesişmediği için açıklık çeperinde herhangi bir blok oluşumuna neden olmamıştır. 70 derecenin üzerinde bir eğim değerine sahip olan bu süreksizliğin de herhangi bir duraysızlık sorunu oluşturmayacağı analizlerle desteklenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerin yanı sıra, incelenen açıklıklardaki örtü yükü kalınlıkları analitik çözümlerle değerlendirilmiş olup, hesaplamalar sonucunda açıklık tavanlarındaki kalınlığın yerçekimi etkisiyle oluşan çekme gerilmelerini karşılayabilecek ölçüde olduğu ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen analizlerde yeraltı boşluklarının üst kesiminde bulunan ignimbirit

malzemesinde herhangi bir ayrışma olmadığı kabul edilmiştir. Oysaki incelenen sahalarda olmasa bile, bazı sahalarda ignimbiritlerin su ile temasa bağlı olarak ayrıştığı bilinmektedir. Bu durumda, açıklık tavanlarındaki birimin jeomühendislik özellikleri olumsuz yönde etkileneceğinden duraylılık koşullarında da değişimler olabilir. Bu durumun değerlendirilmesi amacıyla, sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde açıklık tavanında bir ayrışma zonu olduğu kabul edilerek ayrışma zonuna daha düşük malzeme özellikleri atanmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, ayrışma etkisi altında kalan ignimbiritlerde duraysızlık problemlerinin gelişebileceğini göstermektedir. Öte yandan, yeraltı boşluklarının tavanlarında süreksizlik kontrollü blok oluşumları olması durumunda duraysızlık problemleri olması muhtemeldir.

İgnimbiritlerin suya karşı olan hassasiyetleri dikkate alındığında, yeraltı boşluklarının bulunduğu sahalarda su drenajının yapılması uygun olacaktır. Kaya oyma mekânlarda açıklık boyutu arttıkça mesnet ve tavana etkileyen asal gerilmeler ve kesme kuvvetleri artacağı için örtü yükü kalınlığının artırılması duraylılık açısından önemlidir. Yeraltı boşluklarının yolun altına gelen kısımlarında araç trafiğinin oluşturacağı yükler de göz önüne alındığında duraysızlık problemi yaşanmaması için örtü kalınlığının az olduğu lokasyonlarda yeraltı açıklıklarının içerisinde yöre dokusuna uygun, kemerli destek sistemleri uygulanması önerilmektedir.

Tarihi ve kültürel açıdan çok önemli bir yeri olan Derinkuyu Yeraltı şehri bölgesinde yoğun araç trafiğinin azaltılması da önem arz etmektedir. İlçe genelinde kaya oyma yapıların kendi haline bırakılması durumunda, ilerleyen dönemlerde ignimbiritlerdeki ayrışma derecesinin artmasıyla duraysızlık problemlerinin çoğalacağı düşünülmektedir. Bu nedenle bu tür kaya oyma mekânların kullanımının artırılması için restorasyon çalışmaları teşvik edilmesi kültürel açıdan önemlidir.

Derinkuyu yerleşiminde yeraltı sığ kaya oyma mekanlara ait bir envanter çalışması oluşturulması amacıyla, ilçe genelinde detaylı jeofizik çalışmalar gerçekleştirilerek, söz konusu kaya oyma mekanların yeraltındaki yayılımları ve boyutları haritalanarak ortaya konmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Özata, Ş., “Kapadokya bölgesi kaya oyma yapı sorunları ve çözüm önerileri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.3-138, İstanbul, 2015.
2. Çorakbaş, F.K., “The comparison of rock-cut architecture sites in Turkey and Italy with special emphasis on Cappadocia”, *World Applied Sciences Journal* 17 (11), 1445-1453, 2012
3. İnternet: Kültür ve Turizm Bakanlığı Döner Sermaye İşletmesi Genel Müdürlüğü “Derinkuyu Yeraltı Şehri” <http://www.dosim.gov.tr/muze/60>.
4. Erguvanli K., Yuzer E., “Past and present use of under ground openings excavated in volcanic tuff at Cappadocia area. In: Proceedings on Rock storage”, Oslo, Norway, pp. 15–17, 1977
5. Bernt-Ersöz, “Phrygian rock-cut shrines structure, function and cult practise”, Brill, Leiden, 2006
6. Aydan, Ö., Ulusay, R., “Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey”, *Engineering Geology* v.69, 245-272, 2003
7. İller Bankası Anonim Şirketi, “Derinkuyu (Nevşehir) Belediyesi İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu” , antaş müh. inş. mad. gıda tem. san. ve dış. tic. ltd.şti., Ankara, 8-32 s, 2015
8. Aydar, E., Schmitt, A.K., Çubukçu, H.E., Akin, L., Ersoy, O., Şen, E., Duncan, R.A., Atıcı, G. “Correlation of ignimbrites in the central Anatolian volcanic province using zircon and plagioclase ages and zircon compositions” *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 213–214, 83–97, 2012.
9. Kara, İ., 2013. Nevşehir / Acıgöl - Derinkuyu - Gülşehir sıcak ve mineralli sularının hidrojeokimyasal özellikleri. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi, Ankara sayfa 29-42.
10. Dönmez, M., Türkecan, A., Akcay., A.E.. KayseriNiğde-Nevşehir Yöresi Tersiyer Volkanitleri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 10.574, Ankara (yayımlanmamış), 2003.
11. Türkecan, Aç, Kuzucuoğlu, C., Mouralis, D., Pastre, J.F., Atıcı, Y., Guillou, H. &

- Fontugne, M., Upper Pleistocene volcanism and Paleogeography in Cappadocia, Turkey. TÜBİTAK Project No: 101Y109, MTA Gn. Müd. Rapor No: 10625, 208 s. Ankara, 2004
12. Aydan, Ö., Ulusay, R., “Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering”, *Rock Mech Rock Eng* (2013) 46, 731-754, 2012
 13. Arda, A., “Geological and morphological investigations of the underground cities of Cappadocia using GIS”, *Middle East Technical University The Graduate School of Natural And Applied Sciences, Master of Science Thesis*, s.2-13, Ankara, 2004.
 14. Ulusay, R., Aydan, Ö. “The 2016 Hans Cloos lecture ”*Springer*, v.77, s 457-488, 2017
 15. RocScience. RS2. Toronto, Ontario: RocScience, Inc, 2018.
 16. ISRM (International Society For Rock Mechanics), 2007. “The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006.Suggested Methods”, Editörleri, R. Ulusay and J.A. Hudson, s. 628, Ankara, 2007
 17. Deere DU, Miller RP., “Engineering classification and index properties for intact rocks”. Technical report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No. AFNL-TR, pp 65–116, 1966
 18. Bieniawski Z.T., “Engineering classification of jointed rock masses”. *Trans.S.Afr.Inst. civ.eng*, 15, 335-344, London, 1973.
 19. Bieniawski, Z.T., “Engineering rock mass classification”, John Wiley Sons, New York, 1989.
 20. Marinos P., Marinos V., Hoek E. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Published in: *Underground works under special conditions*, eds. Romana, Perucho & Olalla, 13-21. Lisbon: Taylor and Francis, 2007
 21. Hoek E., Brown E.T., “Practical Estimates of Rock Mass Strength” *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol 34, No:8 PP. 1165-1186, 1997.
 22. Sönmez, H., Ulusay, R., “A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies”, *Yerbilimleri Dergisi*, v.26, p.77-79, 2002.

23. Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., “Support of underground excavations in hard rock”. Balkema, Rotterdam, 215 p., 1995.
24. Hoek, E. and Brown, E.T. Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng. Div.,ASCE. 106 (GT9): 1013-1035, 1980.
25. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion 2002 edition. Proceedings of the NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, 267-273, 2002.
26. Topal, T., “Nevşehir ili Uçhisar beldesinde bulunan bazı kaya oyma mekanlarının (Parsel No:592, 601, 635, 673, 757) jeolojik inceleme raporu”, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Rapor No: 11-03-09-1-00-37*, s 2-29, Ankara, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Doğan DOLAP 1988 yılında Derinkuyu (Nevşehir) ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Derinkuyu' da tamamladı. Lisans öğrenimini 2006 yılında başladığı Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2011 yılında mezun olarak tamamladı. 2017 yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.

Adres: Fatih Mahallesi. Harım yolu Sokak. No:6/2 Derinkuyu/Nevşehir

Belgegeçer: 0384 381 39 69

E-posta:dogan_dolap@hotmail.com

