

BOŞLUKLU KAYA MALZEMELERİNİN
DAYANIM VE DEFORMASYON ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL VE NÜMERİK YAKLAŞIMLAR KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI

ENES ZENGİN

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilim Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER

Haziran - 2019



*En değerli varlıklarım
Annem, babam ve biricik kardeşime*

KABUL VE ONAY SAYFASI

Enes ZENGİN'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Boşluklu Kaya Malzemelerinin Dayanım ve Deformasyon Özelliklerinin DeneySEL ve Nümerik Yaklaşımlar Kullanılarak Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

18/06/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER
Anabilim Dalı Başkanı, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER
Danışman, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınav Komitesi Üyeleri

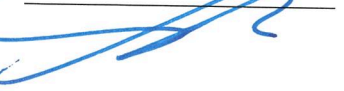
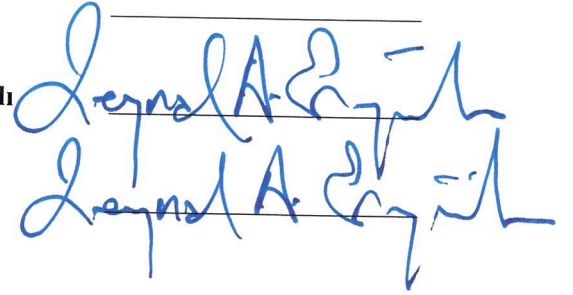
Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Ali KAYABAŞI
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR
Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

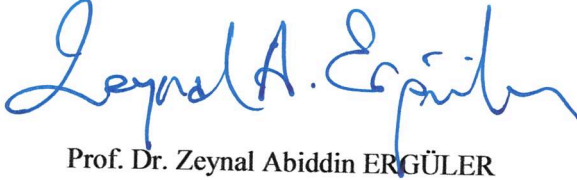
Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin KARAKUŞ
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan intihal programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %2 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER

Danışman



Enes ZENGİN

**BOŞLUKLU KAYA MALZEMELERİNİN
DAYANIM VE DEFORMASYON ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL VE NÜMERİK YAKLAŞIMLAR KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI**

Enes Zengin

Jeoloji Mühendisliği, Doktora Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER

ÖZET

Birçok mühendislik yapısının doğrudan kaya birimlerinin üzerinde veya içinde inşa edilmesi nedeniyle, bu birimlerin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi proje ve tasarım aşamasında son derece önemlidir. Boşluk, çatlak ve fisür gibi yapısal unsurların da bu parametreler üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri, çatlak gelişimi ve yenilme davranışı üzerindeki etkileri deneysel ve nümerik yaklaşımlar kullanılarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye'nin 4 bölgesinden lokasyon bazında benzer mineralojik bileşime ve farklı porozite değerlerine sahip blok boyutunda örnekler alınmıştır. Blokların gerçek porozite değerlerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için, “görgül boşluk hacmi yaklaşımı” önerilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda gerçek porozite değeri %10'un üzerinde olan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü ve gerçek porozite değerleri arasında bir ilişki olduğu ve %10 dan daha yüksek değerlerde yenilme davranışının boşluklar tarafından kontrol edildiği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte hem tek hem de üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri öncesi, sonrası ve sonrasında yapılan değerlendirmelere göre çatlak oluşumunun ilk olarak örnek içindeki en büyük çaplı boşlukların çevresinde oluşmaya başladığı ve yenilme davranışının da bu boşluklar tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir. Üç eksenli yükleme koşullarında ise küresel şekilli boşluklara sahip olan örneklerin dayanım değerlerinin tek eksenli yüklenenlerden yaklaşık 10 kata kadar daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin baz alındığı, Particle Flow Code yazılımı ile oluşturulan modeller kullanılarak deneysel çalışmalardan elde edilen veriler doğrulanmış ve boşluk çapının karot çapının %8-10'u kadar olduğu durumda yenilme davranışının değiştiği saptanmıştır. Bunların yanında nümerik deneylerden elde edilen makaslama ve çekme çatlaklarının birbirine olan oranı olarak tanımlanan ve modelin yenilme davranışı temsil eden yeni bir “çatlak oranı” parametresi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, Deformasyon, Boşluklu kaya malzemeleri, Particle Flow Code, Sentetik kaya malzemesi

INVESTIGATION OF STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF POROUS ROCK MATERIALS USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES

Enes Zengin

Geological Engineering, PhD Thesis, 2019

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER

SUMMARY

Due to the construction of many engineering structures directly on or within the rock units, determination of strength and deformation parameters of these units are crucial during both the feasibility and design phases of projects. Structural textures such as pores, cracks, and fissures also have an effect on these parameters. In this dissertation, the effect of gap properties on strength and deformation, crack propagation, and failure behaviour of rock materials was investigated by using experimental and numerical approaches. For this purpose, block-sized samples were taken from four locations in Turkey with similar mineralogical compositions and different porosity values. In order to determine the real porosity values of rock blocks accurately, “empirical void volume approach” was proposed. As a result of experimental studies, it has been found that there is a relationship between uniaxial compressive strength, elasticity modulus, and real porosity values of specimens with porosity values more than 10%, and the failure behaviour of specimens having such porosity values is controlled by the gaps. In addition to this phenomenon, based on the evaluation done before, during and after both uniaxial and triaxial compressive strength tests, it was determined that crack propagation primarily occurs around gaps having the highest diameter in specimen, and the failure behaviour of rock material is controlled by these gaps. Under triaxial loading condition, it was also specified that the strength values of the specimen with spherical shaped gaps were up to 10 times higher than those on the uniaxial loading conditions. Based on data obtained from experimental studies, some numerical models were idealized with Particle Flow Code software in which experimental test results were verified by a pretty good agreement, and correspondingly it was determined that the failure behaviour of models changes when the gap diameter reaches up to %8-10 of core diameter. A new parameter, “The crack ratio”, which is defined as the ratio of the shear and tensile crack numbers obtained from numerical analyses which represent the failure behaviour of the model, was also proposed.

Keywords: Strength, Deformation, Porous rock materials, Particle Flow Code, Synthetic rock material

TEŞEKKÜR

Başta doktora tez çalışmam olmak üzere tüm akademik kariyerim boyunca yapmış olduğum çalışmalara zaman mefhumundan muaf olarak destek veren, görüş ve önerilerini hiçbir zaman benden esirgemeyen, ihtiyaç duyduğum her anda tereddütsüz olarak bana yardımcı olan tez danışmanım ve çok değerli hocam **Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER**'e,

Başta tez çalışmam olmak üzere tüm akademik çalışmalarında bana destek veren ve önerilerini esirgemeyen çok değerli hocam **Doç. Dr. Hüseyin KARAKUŞ**'a, tez çalışmam sırasında yapmış olduğum laboratuvar ve nümerik çalışmalarına katkılarını esirgemeyen **Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR**'e (İstanbul Teknik Üniversitesi), tez savunması sınavı jüri üyelerinden **Doç. Dr. Ali KAYABAŞI**'na (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi) ve **Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ**'a (Kocaeli Üniversitesi), lisans eğitimimden başlamak üzere tüm akademik kariyerim boyunca değerli katkı, görüş ve önerilerini benden esirgemeyen **Dr. Öğr. Üyesi Özkan CORUK**'a (Kocaeli Üniversitesi),

Doktora sırası araştırma çalışmaları amacıyla bulunduğum Aberdeen Üniversitesi'nde (İskoçya, Birleşik Krallık) geçirdiğim süre boyunca bana her aşamada destek veren ve önerilerini esirgemeyen **Dr. David HEALY** ve **Dr. Natalie FARRELL** ile birlikte Particle Flow Code yazılımı konusunda destek veren **Dr. David POTYONDY** (Itasca Consulting Group, Inc.) ve **Dr. Sacha EMAM**'a (Itasca Consulting Group, Inc.),

Kaya türlerinin tanımlanması için yapılan analiz ve yorumlama çalışmalarında bana yardımcı olan Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi Müdürü çok değerli hocam **Prof. Dr. Gürsel YANIK**'a, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nı kullanma imkanı veren **Doç. Dr. Levent SELÇUK**'a,

Doktora tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, moral ve motivasyon desteklerini esirgemeyen meslektaş ve dostlarım **Arş. Gör. İrem AKSOY**, **Arş. Gör. Recep Uğur ACAR** ve **Arş. Gör. Sariye Duygu DURAK**'a,

Hayatım boyunca her zaman ve her koşulda maddi ve manevi desteklerini benden asla esirgemeyen, hayatımdaki en değerli varlıklarım olan annem **Ayla ZENGİN**, babam **Kamil ZENGİN** ve biricik kardeşim **Nurseli Asel ZENGİN**'e göstermiş oldukları anlayış ve sabır nedeniyle,

Şükran ve minnetlerimi sunar, içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
2.1. Deneysel ve Teorik Yaklaşımları Temel Alan Önceki Çalışmalar	8
2.2. Deneysel ve Nümerik Yöntemler Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar	21
3. ARAZİ ÇALIŞMALARİ ve ÖRNEKLEME ALANLARININ TANITILMASI.....	32
3.1. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanlarının (Kütahya) Jeolojisi.....	33
3.2. Kula Volkanik Jeoparkı'nın (Manisa) Jeolojisi.....	34
3.3. Köşk Bölgesinin (Van) Jeolojisi.....	36
3.4. Naşa Bölgesinin (Kütahya) Jeolojisi	37
4. ÖRNEKLERİN BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN TANIMLANMASI	39
4.1. Bilgisayarlı Tomografi Tarama (CT-Scan)	40
4.2. Görünür Gözeneklilik Deneyi	44
4.3. Karot Yüzeyi Tarama Yöntemi	46
4.4. Görgül Boşluk Hacmi Yaklaşımı	51
4.5. Kullanılan Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	61
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
5.1. Örnek Hazırlama Çalışmaları ve Karşılaşılan Sorunlar	63
5.2. Kaya Türlerinin Tanımlanması İçin Yapılan Çalışmalar	68
5.2.1. Örnek hazırlama	68
5.2.2. X-Işını Difraktometresi (XRD), X-Işını Flüoresans (XRF) ve Ateşte Kayıp Analizleri.....	70

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. İnce Kesit Çalışmaları	76
5.2.4. Kaya türlerinin belirlenmesi	80
5.3. Yapay Örneklerin Hazırlanması	82
5.4. Yoğunluk ve Kuru Birim Hacim Ağırlık Değerlerinin Belirlenmesi	88
5.5. Görünür Gözeneklilik ve Ağırlıkça Su Emme Değerlerinin Belirlenmesi	89
5.6. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri ve Elastisite Modülü Tayinleri	90
5.6.1. L-1'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri	91
5.6.2. L-2'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri	94
5.6.3. L-3'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri	96
5.6.4. L-4'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri	99
5.7. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri	101
6. BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN DAYANIM ve DEFORMASYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	107
6.1. L-1 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki	110
6.2. L-2 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki	113
6.3. L-3 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki	115
6.4. L-4 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki	118
6.5. Beton Örneklerin Yenilme Davranışları İle Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki	120
6.6. Boşluk Özelliklerinin Dayanım ve Deformasyon Özellikleri Üzerindeki Etkisi	121
7. BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN DAYANIM ve DEFORMASYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN NÜMERİK YÖNTEMLER KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI	125
7.1. Particle Flow Code (PFC) Yazılımı ve Çalışma Prensipleri	125
7.2. Ayrık Elemanlar Yöntemi (Distinct-Element Method)	127
7.3. PFC Yazılımının Temel Bileşenleri	129
7.3.1. Tanecik (Ball)	129
7.3.2. Bağ (Contact)	130
7.3.3. Düzlem (Wall)	131
7.4. PFC Yazılımında Model Oluşturma Aşamaları	132
7.4.1. Bağlı parçacık modeli (Bonded particle model)	132
7.4.2. Sentetik modelin oluşturulması	134

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.4.3. PFC yazılımında modelin kalibre edilmesi.....	135
7.5. PFC’de Oluşturulan Boşlukların Seçimi ve Yenilme Davranışı Üzerindeki Etkisi	141
7.5.1. Dairesel şekilli boşlukların etkisi.....	141
7.5.2. Elipsoit şekilli boşlukların etkisi	144
7.5.3. Kare şekilli boşlukların etkisi	147
7.5.4. Dikdörtgen Şekilli Boşlukların Etkisi.....	149
7.5.5. Boşluk Tipinin Etkisi.....	152
7.5.6. Boşluk sayısı ve yerleşiminin yenilme davranışı üzerindeki etkisi	154
7.5.7. Deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması	159
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	163
KAYNAKLAR DİZİNİ	168
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. (a) Kaya malzemesi içindeki açıklıklara bağlı olarak meydana gelen çatlaklar, (b) Kaya malzemesi içindeki çentiklere bağlı olarak meydana gelen çatlaklar (Dzik, 1996).	5
2.1. Farklı boy ve çapta hazırlanan örnekler ve örnek üzerine yerleştirilen deformasyon ölçerlerin şematik görüntüsü.	11
2.2. Çalışmada oluşturulan boşlukların örnek boyutları ile ilişkisinin şematik gösterimi.	13
2.3. Açık ve kapalı çentiklere bağlı olarak meydana gelen ikincil ve kanat çatlakların görünümü. .	18
2.4. Oluşturulan modellerin şematik gösterimi.	20
2.5. Çatlak içeren jips örneklerinin şematik gösterimi.	22
2.6. (a) Küçük çentikler ile birlikte büyük çentikler içeren sayısal model, (b) Rasgele dağıtılmış heterojen yapıları içeren sayısal model.	24
2.7. Çalışmada kullanılan modelin yükleme sisteminin, dairesel açıklığı ve akustik emisyon sensörlerinin şematik gösterimi.	25
3.1. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlar.	32
3.2. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları'na (Merkez-Kütahya) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Ergüler vd, 2015'ten sadeleştirilmiştir).	34
3.3. Kula Volkanik Jeoparkı'na (Kula-Manisa) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Broan vd, 1983'den sadeleştirilmiştir).	36
3.4. Köşk bölgesine (Muradiye-Van) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Oyan, 2011'den sadeleştirilmiştir).	37
3.5. Naşa bölgesine (Simav-Kütahya) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Akdeniz ve Konak, 1979; Konak, 1982; Karakuş vd., 2017'den sadeleştirilmiştir).	38
4.1. Bilgisayarlı tomografi tarama (CT-Scan) işlemi sırasında kullanılan Nikon XT H 225 cihazının genel görünümü.	41
4.2. Tarama işlemi sırasında kullanılan X-ray kaynağı ve makro örnek.	42
4.3. "Volume Graphics" yazılımı kullanılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi.	42
4.4. Tarama işlemi sonucunda makro örnekte belirlenen boşluklar ve bu boşluklara ilişkin sayısal bilgiler.	43
4.5. Taraması yapılan makro örnek ve örneğin oluşturulan katı modeli (Voksel).	43
4.6. Karot örneklerin boşluk hacmi değerlerinden hesaplanan ortalama blok boşluk hacmi değerleri.	46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7. Karot yüzeyi tarama yöntemi uygulanan BE-21 örneğinin görünümü.	48
4.8. Karot yüzeyi tarama yöntemi sonrası elde edilen BE-21 örneğinin yüzey görüntüsü.	48
4.9. Karot yüzeyinde boşluklu ve boşluksuz yüzeylerin ArcMap yazılımında tanımlanması.	49
4.10. Örneklerin yüzey boşluk oranlarının belirlenmesi için takip edilen akış şeması.	49
4.11. Karot yüzeyinde “Image Classification” yaklaşımı ile belirlenen boşluklu ve boşluksuz alanların dağılımı.	50
4.12. (a) Retsch BB-51 ve (b) Retsch RS200 kullanılarak örneklerin öğütülmesi.	53
4.13. Öğütülmüş 50 gr örneğin eklenmesi ile saf suda meydana gelen hacim artışının belirlenmesi.	53
4.14. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları’ndan (L-1) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	54
4.15. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları’ndan (L-1) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	54
4.16. Kula Volkanik Jeoparkı’ndan (L-2) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	55
4.17. Kula Volkanik Jeoparkı’ndan (L-2) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	55
4.18. Kula Volkanik Jeoparkı’ndan (L-2) alınan 3. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	56
4.19. Kula Volkanik Jeoparkı’ndan (L-2) alınan 4. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	56
4.20. Köşk bölgesinden (L-3) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	57
4.21. Köşk bölgesinden (L-3) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	57
4.22. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	58
4.23. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	58
4.24. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 3. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	59
4.25. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 4. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.	59
5.1. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji ve Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları’nda karot alma çalışmaları.	63
5.2. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda karot alma çalışmaları.	64
5.3. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı’nda alınan karotların taşıma sırasında kırılma ve parçalanmaya karşı korumaya alınması.	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 Karotların kesilmesi için kullanılan Metkon Servocut 301AA cihazının genel görünümü.	67
5.5. Karotların kesim işlemi öncesinde metal mengeneler ile sabitlenmesi.....	67
5.6. Karotların alt ve üst yüzeylerinin örnek eksenine dikliğinin ölçülmesi.	68
5.7. Retsch BB-51 model çeneli kırıcı kullanılarak öğütülen örnek.	69
5.8. Retsch RS200 model diskli öğütücü kullanılarak öğütülen örnek.	69
5.9. XRD analizlerinde kullanılan Malvern PANaltical Empyrean model cihaz.	71
5.10. L-1'den (Höyüktepe ve Atttepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) alınan 2 bloğun XRD analizi sonuçları.	71
5.11. L-2'den (Kula Volkanik Jeoparkı) alınan 4 bloğun XRD analizi sonuçları.....	72
5.12. L-3'ten (Köşk bölgesi) alınan 2 bloğun XRD analizi sonuçları.....	72
5.13. L-4'den (Naşa bölgesi) alınan 4 bloğun XRD analizi sonuçları.	73
5.14. Örneğin XRF analizleri için eritilmesi.	73
5.15. XRF analizleri için kullanılan Malvern PANanalytical Axios mAX model cihaz.	74
5.16. Ateşte kayıp analizleri için kullanılan Nabertherm marka fırın.	74
5.17. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen, Op: Opak mineraller).....	77
5.18. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx Pirokse, Kpx: Klino-Piroksen, Op: Opak mineraller).	77
5.19. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 3. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen, Op: Opak mineraller).....	77
5.20. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 4. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).....	78
5.21. L-3 (Köşk bölgesi) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).	78
Şekil 5.22. L-3 (Köşk bölgesi) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).	78
5.23. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Olv: Olivin, Plj: Plajiyoklas).	79
5.24. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.25. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 3. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).....	79
5.26. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 4. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).....	80
5.27. L-1'e ait bloklar için kullanılan sınıflama diyagramı.....	81
5.28. L-2, L-3 ve L-4'e ait bloklar için kullanılan sınıflama diyagramı.	81
5.29. Yapay örneklerde boşlukları temsil etmek için kullanılan farklı çaplardaki straforlar.	84
5.30. (a) Alçı örneklerinde straforların örnek içinde dağılım göstermediği ve (b) istenilen şekilde dağılım gösterdiği örnek.	84
5.31. (a) Beton örneklerinde straforların örnek içinde dağılım göstermediği ve (b) istenilen şekilde dağılım gösterdiği örnek.	86
5.32. Çimento tozu - su karışımının hazırlanması (a), Karışımın döküldüğü polikarbon örnek kalıbı (b).....	87
5.33. (a) Hazırlanan karışımın örnek hücresine aktarılması ve (b) Hapsolmuş baloncukların ortamdan uzaklaştırılması.	87
5.34. (a) Örnek hücrelerine aktarılan karışımın şişlenmesi ve (b) Örneklerin mukavemet kazanması için sabit sıcaklıktaki su banyosunda bekletilmesi.....	88
5.35. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan bilgisayar kontrollü sistem.	91
5.36. L-1'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	92
5.37. L-1'den alınan H-2 örneğinin çekme gerilmesi etkisinde yenilmesi.	93
5.38. L-1'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.	93
5.39. L-2'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	95
5.40. L-2'den alınan K-32 örneğinin makaslama gerilmesi etkisinde yenilmesi.	95
5.41. L-2'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.	96
5.42. L-3'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	97
5.43. L-3'den alınan BE-24 örneğinin farklı çatlakların etkisinde yenilmesi.	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.44. L-3'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.	98
5.45. L-4'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	100
5.46. L-4'den alınan N-22 örneğinin çekme gerilmelerinin etkisinde yenilmesi.....	100
5.47. L-4'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.	101
5.48. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine kullanılan deney seti.	102
5.49. L-1'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	103
5.50. L-2'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	104
5.51. L-3'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	105
5.52. L-4'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.....	106
6.1. (a) Teğet (tanjant) elastisite modülü, (b) Ortalama elastisite modülü, (c) Kiriş (sekant) elastisite modülü hesaplaması.	109
6.2. L-4'e ait olan N-1 örneğinin gerilim-birim deformasyon grafiğinde görülen tekrarlı gerilim artışı.....	110
6.3. L-1'den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.	111
6.4. L-2'den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.	114
6.5. L-3'den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.	116
6.6. L-4'den alınan 4 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.	119
6.7. Tek eksenli yükleme koşulları için beton örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri. ..	121
6.8. Örneklerin tümünden elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı ile gerçek porozite arasındaki ilişki.....	122
6.9. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile gerçek porozite (> %10) arasındaki ilişki.	122
6.10. Elastisite modülü değerleri ile gerçek porozite (>%10) değerleri arasındaki ilişki.	124
7.1. PFC yazılımında farklı çaptaki tanecikler.....	130
7.2. PFC yazılımında tanecikler arasında meydana gelen bağlar (mavi).	131
7.3. PFC yazılımında yüklemenin sağlanabilmesi amacıyla kullanılan düzlemler (siyah).	132
7.4. N-1, N-3, N-5 ve PFC modelinin gerilim-birim deformasyon grafikleri.	140

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.5. PFC’de kalibre edilen modelin (n: %3) yenilme sonrası görünümü (mavi: makaslama çatlakları, yeşil: çekme çatlakları).	140
7.6. Dairesel şekilli (R: 5,4 mm) tek bir boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	143
7.7. Dairesel şekilli (R: 10,8 mm) tek bir boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	143
7.8. Dairesel şekilli boşluğunun çapında meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.	144
7.9. Elipsoit şekilli (R: 5,4 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	145
7.10. Elipsoit şekilli (R: 10,8 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	146
7.11. Elipsoit şekilli boşluğunun çapında meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.	146
7.12. Kare şekilli (R: 5,40 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	148
7.13. Kare şekilli (R: 10,80 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	148
7.14. Kare şekilli boşluğunun genişliğinde meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.	149
7.15. Kare şekilli (D: 5,4 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	150
7.16. Dikdörtgen şekilli (D: 10,8 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.	151
7.17. Dikdörtgen şekilli boşluğunun genişliğinde meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.	151
7.18. Boşluk çapı/genişliğinin elastisite modülü üzerindeki etkisi.	153
7.19. 5,4 mm çaplı, 3 adet çapraz yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	155
7.20. 5,4 mm çaplı, 3 adet dikey yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	156
7.21. 5,4 mm çaplı 3 adet yatay yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	156
7.22. 5,4 mm çaplı, 9 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	157
7.23. 5,4 mm çaplı 15 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	157
7.24. 5,4 mm çaplı, 27 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	158
7.25. 5,4 mm çaplı 4 adet rasgele yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	158
7.26. Boşluk sayısı ve yerleşiminin gerilim-birim deformasyon üzerindeki etkisi.	159
7.27. 5,4 mm çaplı, 50 adet dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.	161

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

7.28. PFC’de oluşturulan modellerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ile gerçek porozite değerleri arasındaki ilişki.	161
7.29. PFC’de oluşturulan modellerin kırış elastisite modülü değerleri ile gerçek porozite arasındaki ilişki.....	162



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlar.	33
4.1. Arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan bloklar ve karot örneklere ilişkin bilgiler.	39
4.2. Örneklerin görünür gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri.	44
4.3. Karot yüzeyi tarama yöntemi ile belirlenen yüzey boşluk oranı değerleri.....	50
4.4. Görgül boşluk hacmi yaklaşımı kullanılarak hesaplanan boşluk hacmi değerleri	60
4.5. Kullanılan yöntemler ile elde edilen porozite değerleri (%).	61
5.1. Rietveld metoduna yarı-kantitatif analizler sonucunda belirlenen mineral yüzdeleri.....	75
5.2. XRF analizleri sonucunda belirlenen bileşik oranları (%).	76
5.3.Farklı alçı tozu - su karışım oranlarına göre elde edilen sonuçlar.....	83
5.4. Farklı çimento tozu - su oranlarına göre elde edilen sonuçlar.	86
5.5. Beton örneklerin hazırlanması aşamasında takip edilen adımlar.	86
5.6. Örneklerin yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerlerinin değişim aralıkları.	89
5.7. Örneklerin ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin değişim aralıkları.....	90
5.8. L-1'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.....	92
5.9. L-2'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.	94
5.10. L-3'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.....	97
5.11. L-4'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.....	99
6.1. L-1'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.	112
6.2. L-2'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.	115
6.3. L-3'e ait olan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.....	117
6.4. L-4'e ait olan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.	119
7.1. "Flat Joint" bağ modelinin kalibrasyon aşamaları.	133
7.2. PFC'de oluşturulan modeller ve boşluk özellikleri.....	141
7.3. Boşluk çapı/genişliğinin elastisite modülü üzerindeki etkisi.	153
7.4. PFC'de yapılan deneylerden elde edilen parametreler.....	160

1. GİRİŞ

Yol, tünel, köprü, viyadük, depolama tesisleri, barajlar, havalimanları, demiryolları ve şevler gibi birçok mühendislik projelerinin uygulanabilirliği etkileşim halinde olduğu kaya birimlerinin dayanım ve deformasyon özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle, bu tip yapıların inşa edildikleri kaya birimlerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi, projelendirme ve inşa çalışmalarının da kaya birimlerinin mühendislik özelliklerine uygun olarak gerçekleştirilmesi bu projelerin uzun vadeli ve ekonomik olması açısından gereklidir. Günümüzde bu amaç doğrultusunda kaya birimlerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde yerinde (in-situ) deneylerin kısıtlı, çok yüksek maliyetli ve çoğu zamanda mümkün olmaması nedeniyle arazi ve örnekleme çalışmalarında standartlara uygun olarak alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile belirlenmektedir. Ancak, bu noktada da hem kaya malzemesinin türüne bağlı olarak hem de kaya malzemelerinin doğal olarak içermiş olduğu süreksizlikler, boşluklar, çatlaklar ve diğer yapısal kusurlar nedeniyle bazı durumlarda laboratuvar deneyleri için örnekleme yapılamamakta ve dolayısıyla da ilgili parametrelerin doğrudan belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Söz konusu bu sınırlamalar nedeniyle, kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde etkili olan yapısal unsurları barındıran kaya malzemelerin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi, değişimi ve bu değişimin bağlı olduğu parametrelerin saptanması gibi konular araştırmacıların üzerinde çalıştığı yoğunlaştığı konuların başında gelmektedir. Bu kapsamda özellikle kaya malzemelerinde çatlak oluşumu, ilerlemesi, birleşimi, porozite oranındaki değişim ve bunların kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri ile birlikte yenilme davranışları üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından detaylı olarak araştırılmış olup bu konu ile ilgili çalışmalar literatürde son derece yaygın olarak bulunmaktadır. Çatlak ve porozite özelliklerinin yanı sıra bir diğer önemli yapısal unsur olan ve kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan boşlukların geometrik özellikleri ve yoğunluklarının etkisi de kısıtlı da olsa araştırılmıştır. Ancak bu konuda yapılan çalışmaların bir bölümü teorik olarak kısıtlı kalmış, önemli bir bölümünde istenilen boşluk özelliklerini barındıran örneklerin arazi ve örnekleme çalışmaları ile elde edilmesinin son derece zor olması nedeniyle de kapsamlı bir şekilde araştırılamamıştır. Bu konu ile ilgili olarak yapılan araştırmaların çok önemli bir bölümü kaya malzemeleri üzerinde yapay yöntemler ile açılan düzenli şekilli ve kısıtlı sayıdaki boşluğun etkisinin araştırılması, bunların nümerik yöntemler ile denetlenmesi ve farklı boşluk özelliklerinin modellenmesi çalışmalarını içermektedir.

Konu ile ilgili olarak yapılan önceki çalışmaları kapsayan literatür araştırmalarında yapısal unsurların kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin araştırılması kapsamında boşluk geometri ve yoğunluğunun etkisinin yeterli ve tatmin edici miktarda araştırılmadığı tespit edilmiştir. Özellikle son birkaç on yıllık dönemde bilgisayar teknolojisi ve yazılım programlarında ilerlemelerin de etkisiyle boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin nümerik yöntemlerle de araştırılmasını kolaylaştırmıştır. Bu gelişmelere ve yeni doğan imkanlara bağlı olarak gerçekleştirilen ve gerçekleştirilmesi muhtemel çalışmaların birçok yeni araştırmanın ve fikrin önünü açması ihtimali de son derece kuvvetlidir.

Kayalarda yenilmenin meydana gelmesi için çatlakların oluşması gerekmektedir. Çatlak oluşumunun meydana gelebilmesi için kaya malzemesi içinde gerilim birikimlerinin belirli bölgelerde yoğunlaşması gereklidir. Özellikle boşluklu kaya malzemelerinde her bir boşluk gerilim yoğunlaşmasının meydana geldiği bir yapısal bölge olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu boşlukların farklı geometrik özelliklerinin çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşimi dolayısıyla da dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde ne derece etkili olduğu ve bunları kontrol eden parametrelere ilişkin kapsamlı bir çalışma literatürde mevcut değildir. Doğal koşullarda yoğun süreksizlik içeren kaya kütlelerinde çatlakların boşluklara bağlı olarak oluşabileceği de göz önüne alındığında boşluk geometrisi ve yoğunluğunun etkisinin ortaya konulabilmesi için yapılması gereken laboratuvar çalışmalarında kullanılacak olan kaya malzemelerinin temin edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilmesi gereken örnekleme çalışmalarının da son derece zor olduğu ortaya çıkmaktadır. Özellikle farklı boşluk özelliklerine sahip olan kaya malzemelerinin arazi ve örnekleme çalışmaları ile elde edilmesinin zor olması, örnekleme yapılabilse dahi elde edilen verilerin değerlendirilmesine veya karşılaştırılmasına yönelik olarak literatürde bir veri tabanının bulunmaması, yazılım ve modelleme teknolojilerinin geçmişte yeterli düzeyde olmaması gibi çeşitli kısıtlayıcı nedenler boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması ile ilgili olan çalışmaların sınırlı düzeyde kalmasına neden olmuştur. Ancak günümüzde teknolojik gelişmelerin etkisi ile birlikte örnekleme imkanlarının da gelişmesi ve örnekleme çalışmalarının daha verimli bir şekilde yapılabilmesi sonucunda boşluklu kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri laboratuvar koşullarında daha kapsamlı ve detaylı şekilde belirlenebilmektedir. Buna ek olarak kayaların içerdikleri boşlukların özelliklerinin hassas bir şekilde tanımlanabilmesine yönelik olarak gelişen tarama ve analiz yöntemleri ile de kaya malzemesinin bir

bütün olarak sayısal ortama aktarılabilmekte ve bu şekilde de nümerik analiz ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilebilmektedir. Sayısal ortama aktarılan veriler kullanılarak mikro fiziksel ve mekanik özelliklerin tanımlanması, deney sistemlerinin modellenmesi ile birlikte farklı koşullar altında denetleyici ve doğrulayıcı deneylerin nümerik olarak yapılması imkanı bulunmaktadır. Bu şekilde laboratuvar koşullarında elde edilen verilerin çok daha geniş bir perspektifte değerlendirilmesi ve dolayısıyla yapılan analizler ve değerlendirmelerin daha kapsamlı bir şekilde farklı koşullar için gerçekleştirilebilmesi mümkün olmaktadır. Kaya malzemeleri ile ilişkili olarak inşa edilen mühendislik yapıları göz önüne alındığında, boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve farklı koşulları temsil eden nümerik çalışmaların gerçekleştirilmesinin literatür açısından son derece önemli olduğu düşünülmektedir.

Kaya malzemelerin dayanım parametresi, araştırmacılar tarafından mühendislik projelerinin ön değerlendirme ve tasarım aşamasında kullanılması amacıyla önerilen kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde yer almaktadır. Bieniawski (1989) tarafından önerilen ve literatürde başlangıçta Jeomekanik Sınıflama olarak bilinen ancak adı daha sonra Kaya Kütlesi Puanlama Sistemi (RMR) olarak kullanılmaya devam edilen sistem kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, kaya kalite göstergesi (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulları (aralık, bozunma derecesi, dolgu, devamlılık, pürüzlülük), yeraltı suyu durumu ve süreksizliklerin yönelimi olmak üzere altı temel parametreyi esas almaktadır. Önerilen sistemin en önemli girdi parametrelerinden olan kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı doğrudan sayısal olarak ifade edilmesi ve araştırmacının veya kullanıcının şahsi değerlendirmesinin dışında olması nedeniyle yaygın bir şekilde kabul görmekte olup, sistem içinde bulunan önemli bir girdi parametresi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte yine kaya kalite göstergesi (RQD) parametresi de kaya malzemesinin bir nevi mekanik parametrelerinin temsil edilebilmesi açısından öne çıkan bir diğer girdi parametresidir. Kaya kalite göstergesi (RQD) parametresinin puanlama yöntemi de sondaj çalışmaları ile edilen karotların değerlendirilmesi yoluyla yapılması ve karot bütünlüğünün korunmasının kaya malzemesindeki boşluklar ve süreksizlikler ile ilgili olması açısından da önemlidir. Kaya Kütlesi Puanlama Sistemi (RMR) zaman içerisinde uygulama sonuçlarından alınan geri bildirimler ve elde edilen deneyimler sonucunda çeşitli araştırmacılar tarafından birkaç defa güncelleştirilmiş, günümüzde de hala yaygın olarak önerildiği şekilde kullanılmaktadır. Sistemin altı parametresinde de zaman içinde değişiklikler yapılması ve önerilmesine karşın en az değişiklik yine kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya kalite göstergesi (RQD) parametreleri olmuştur. Bu iki parametreye ilişkin olarak

yapılan öneriler doğrultusunda bu iki parametreden elde edilen puanların güncellenmesi yoluyla puanlama sisteminde değişiklikler yapılmıştır. Ancak, boşluk özellikleri nedeniyle örneklemenin yapılamadığı kayaların dayanım ve deformasyon parametrelerine yönelik olarak yapılacak olan çalışmalar bu parametrelerin kullanıldığı sınıflama sistemlerinin uygulama alanlarını da arttıracığından literatür açısından önem taşımaktadır. Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların günümüzde puanlanması mümkün olmayan boşluklu kaya malzemelerinin gelecekte puanlama sistemine dahil edilebilmesinin önünü açacağı düşünülmektedir.

Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, kaya kütlelerinin dayanımının görgül olarak belirlenmesine yönelik olarak Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünde de yer almaktadır (Eşitlik 1.1). Ölçütte bununla birlikte yer alan ve kaya malzemesinin özelliklerini temsil eden “m” parametresi ise farklı yanal basınç değerleri altında yapılan üç eksenli deney sonuçları kullanılarak belirlenmekte, doğrudan sağlam kaya malzemesi hariç olmak üzere kaya malzemesinin içerdiği boşlukların dayanım ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisine bağlı olmaktadır. Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi’nde (RMR) olduğu gibi Ölçütün diğer bir sabiti olan “m_i” parametresi de yine kaya malzemesi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda belirlenmektedir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1.1)$$

Burada;

- σ'_1 ve σ'_3 : Yenilme anındaki en büyük ve en küçük efektif asal gerilmeler (MPa)
 σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
 m_b , s ve a : Boyutsuz malzeme sabitleri olup, aşağıda verilen bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (1.2)$$

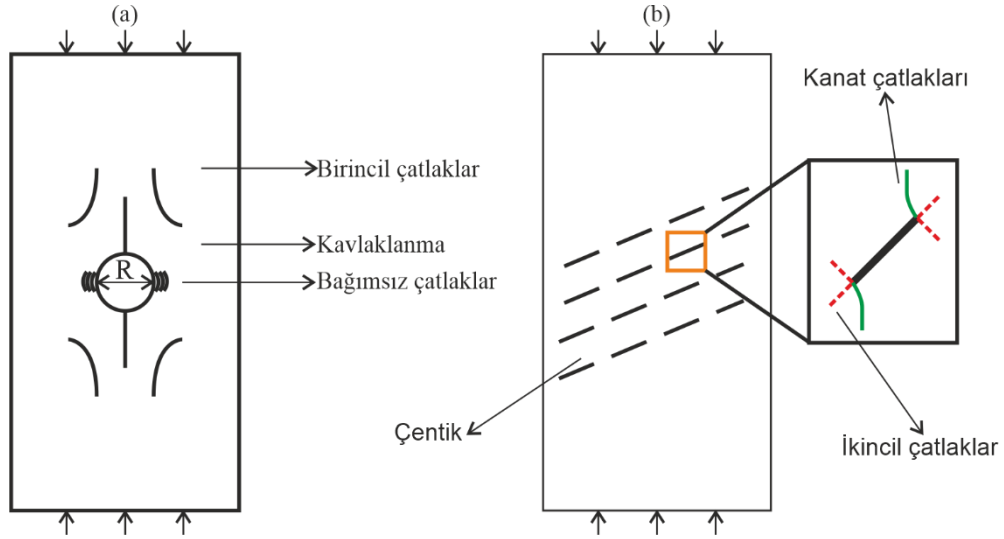
$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (1.3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\left(\frac{GSI}{15}\right)} + e^{-\left(\frac{20}{3}\right)} \right) \quad (1.4)$$

Burada;

- m_b : Kaya kütlesi için boyutsuz malzeme sabiti
 m_i : Kaya malzemesi için boyutsuz malzeme sabiti
 GSI : Jeolojik dayanım indeksi
 D : Örselenme faktörü katsayısı
 s ve a : Kaya kütlesinin özelliklerine bağlı olan sabitler

Kaya malzemesi içerisinde gerilme koşullarının değişimine bağlı olarak çatlak oluşumu, ilerlemesi, birleşmesi ve yönelimi gibi konular doğrudan dayanım ve deformasyon özellikleri ile ilgili olması nedeniyle de değerlendirme aşamalarında dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalarda ise ağırlıklı olarak makaslama ve çekme gerilmeleri altında malzemede meydana gelen birincil (primary), ikincil (secondary), bağımsız (remote) ve kanat (wing) çatlaklarının (Şekil 1.1) oluşum ve ilerleme mekanizmaları, farklı şekillerdeki açıklıklara bağlı olarak oluşan çatlaklar ile birlikte boşluk geometrisi ve yoğunluğunun çatlak oluşumu üzerindeki etkisi gibi konular incelenmiştir. Ayrıca deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak gelişen teknoloji ve yazılım altyapılarından da faydalanılarak farklı boşluk geometrisi ve yoğunluğu koşulları da nümerik olarak araştırılmıştır.



Şekil 1.1. (a) Kaya malzemesi içindeki açıklıklara bağlı olarak meydana gelen çatlaklar, (b) Kaya malzemesi içindeki çentiklere bağlı olarak meydana gelen çatlaklar (Dzik, 1996).

Yukarıda açıklanan gerekçeler dikkate alınarak, özellikle magmatik ve sedimanter kaya malzemelerinin içinde doğal olarak bulunan boşlukların özelliklerini temsil eden farklı koşullarına ilişkin olarak kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı

amaçlayan bu çalışma kapsamında aşağıda verilen konularda kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir;

- a. Türkiye'deki farklı bölgelerden boşluklu kaya birimlerinin yüzeylendiği 4 farklı lokasyon (Merkez-Kütahya, Kula-Manisa, Köşk-Van, Naşa-Kütahya) belirlenmiş, söz konusu bu örnekleme lokasyonlarında arazi ve örnekleme çalışmaları gerçekleştirilerek boşluk özellikleri değişim gösteren kaya blokları alınmıştır.
- b. Arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan kayaların tanımlanması ve sınıflanması amacıyla mineralojik ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir.
- c. Arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan blok örneklerden Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji ve Maden Mühendisliği Laboratuvarları, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları'nın imkanları kullanılarak karot alma, kesme ve düzeltme işlemleri gerçekleştirilmiştir.
- d. Tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılarak kaya malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), elastisite modülü (E), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Φ) değerleri belirlenmiştir. Bu mekanik parametrelerin yanı sıra diğer düzenli ve düzensiz şekilli örnekler kullanılarak kaya malzemelerinin diğer fiziksel parametreleri de belirlenmiştir.
- e. Karot örneklerin boşluk özelliklerini bire bir karakterize edebilmek ve tanımlayabilmek amacıyla bilgisayarlı tomografi (CT-Scan) olarak bilinen yaklaşımın çok yüksek maliyet oluşturması ve tez çalışması kapsamında bu miktarda bir bütçenin bulunmaması nedeniyle bu yöntem yerine her örnek üzerinde görünür gözeneklilik, yüzey tarama ve görgül boşluk hacmi yaklaşımı ile gerçek porozite değerleri belirlenmiştir.
- f. Kaya malzemeleri ile ilgili çalışmalara yardımcı olabileceği ve kaya malzemesi ile benzer yenilme davranışı göstermesi nedeniyle yapay olarak sağlam, boşluksuz ve belirli miktarda boşluklu olmak üzere iki farklı beton karot örnekleri hazırlanmış tek eksenli sıkışma deneyine tabi tutularak boşluk özelliklerinin yapay örnekler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

- g. Gerçekleştirilen tüm deneysel araştırma ve yaklaşımlara ek olarak gelişen teknolojik imkanlar doğrultusunda boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla hem mevcut karot örnekler hem de farklı koşullar için iki boyutlu nümerik modeller oluşturularak modellerin kalibrasyon aşamalarının tamamlandıktan sonra farklı özelliklerini içeren modeller üzerinde deneyler yapılmıştır.
- h. Yapılan tüm deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde etkisi detaylı bir çalışma gerçekleştirilerek ortaya konulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri, yenilme davranışlarının bağlı olduğu değişkenler ve bu değişkenler üzerinde etkili olan parametrelere ilişkin günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır (Hoek, 1964; Hoek ve Bieniawski, 1965; Dzik ve Lajtai, 1996; Fakhimi vd, 2002; Wang vd, 2012; Baud vd, 2014). Yapılan bu çalışmalardan tez konusu ile ilgili olanları ağırlıklı olarak dayanım ve deformasyon özellikleri ile birlikte yenilme davranışı üzerinde çatlak oluşumu, ilerlemesi, birleşimi, porozite değişimi, kaya malzemesinin ve kütesinin içerdiği boşlukların (dairese, dikdörtgenler prizması veya kübik) ve açıklıkların etkisini içermektedir. Bununla birlikte özellikle son dönemde nümerik analiz ve modelleme çalışmaları ile birlikte bağlı parçacık modeli (BPM), ayrı elemanlar yöntemini (DEM) temel alan nümerik analiz ve modelleme yöntemleri ile de benzer parametrelere ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Bu bölümde tezin amaç ve kapsamı ile uyumlu olacak şekilde sadece kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde porozite, boşluk ve açıklıkların etkisi ve nümerik yöntemlere dayalı olan deneysel, nümerik ve hem deneysel hem de nümerik olan çalışmalara alt başlıklar halinde yer verilmiştir.

2.1.Deneysel ve Teorik Yaklaşımları Temel Alan Önceki Çalışmalar

Inglis (1913), eliptik ya da köşeleri yuvarlaklaştırılmış kare şekilli çatlaklar içeren metal plakalarda meydana gelen gerilim dağılımlarının büyük oranda matematiksel bir yaklaşımla çözülebilecek bir kavram olduğunu ve bu konu üzerinde matematiksel yaklaşımlar önermiştir. Gerilim yoğunlaşmalarının çatlakların uç kısımlarında olduğunu belirten araştırmacı farklı yapıdaki çatlaklar ve farklı gerilme koşullarına ilişkin değerlendirmelerde bulunmuştur. Inglis (1913) tarafından yapılan çalışma metal plakalar düşünülerek gerçekleştirilmiş olsa da özellikle çatlaklara bağlı olarak gerilim koşullarında meydana gelen değişimlerin matematiksel olarak açıklanmasına ilişkin değerlendirmeler içermesi nedeniyle literatürde yer alan temel kaynaklardan birisidir.

Griffith (1921), Inglis (1913) tarafından önerilen matematiksel eşitlikleri temel alarak metal ve cam gibi katı malzemelerde meydana gelen çentik türü yüzeysel kusurların oluşum mekanizmasına yönelik olarak çalışmış ve deneysel yöntemlerle incelemiştir. Araştırmacı bu amaçla 7,1 mm kalınlığında ve 2540 mm uzunluğunda olan yumuşak demir plakalar kullanarak plaka eksenine 45° lik açı yapacak şekilde elmas uçlu çelik kesiciler kullanarak oluşturulan yapay eliptik çentikler üzerine çekme gerilmesi uygulayarak söz konusu eliptik çentiklerin burğu şekilli bir yapı almasını sağlamıştır. Metaller üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda uygulanan çekme gerilmesinin meydana

gelen burgunun %15'lik bir değişime uğramasına neden olacak bir kritik değere ulaşmasından sonra kaldırılrsa bile malzemenin eski haline dönmediği görülen çalışmada gerilmenin malzemenin elastik limit değerine ulaştığı belirlenmiştir. Inglis (1913) tarafından önerilen teorik eşitliklerin deneysel olarak denetlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda ise oda sıcaklığında yüzey gerilmelerinin tahmin edilebilir ve gerilimin eşit olarak dağılımının beklenebileceğinden dolayı metal malzemelerin yerine sert cam malzeme kullanılması uygun görülmüştür. Yüzey gerilmelerinin belirlenebilmesi için ise sert cam malzeme 730° ile 940°C arasında ısıtma ve soğutma döngüsüne tabi tutularak meydana gelen sarkma açısının 20° olduğu belirlenerek yüzey gerilim değerleri farklı sıcaklıklar için hesaplanmıştır. Söz konusu bu çalışma Inglis (1913) tarafından önerilen teorik yaklaşımların kısmen de olsa deneysel yöntemler aracılığı ile doğrulanabilmesine olanak sağlaması açısından birçok farklı disiplinde çalışan araştırmacılar ve literatür açısından son derece önemlidir.

Hoek (1964), sedimanter kayaların oluşum koşullarındaki gerilim dağılımlarından kaynaklı olarak anizotropik bir yapıda olmaları ve özellikle sığ madencilik kazıları ile birlikte mühendislik yapılarının da bu tür kayalar üzerinde gerçekleştirildiği göz önüne alındığında bu kayalarda meydana gelen kırık ve deformasyonların önemli olduğunu belirterek anizotropinin kaya davranışını üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmacı Griffith (1921, 1924) tarafından önerilen ve kırılğan malzemelerde yenilmenin malzeme içindeki doğal çatlak ve çentiklerden çekme gerilmesi sonucu meydana gelen kırıkların etkisinde gerçekleştiğini öneren yaklaşımı esas alarak çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Hoek (1964), araştırmacılar tarafından önerilen teorik yaklaşımların uygulanabilirliğini denetlemek amacıyla sleytlerden alınan örnekler üzerinde tabakalanma düzlemlerine dik ve paralel olacak şekilde çekme dayanımı, tabakalanma düzlemine göre 0° ile 90° arasındaki her 15°'lik açılarla da değişecek şekilde de üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Tabakalanma düzlemine dik olarak yapılan çekme dayanımı deneyleri sonucunda sleytlerin çekme dayanımı değeri ortalama olarak 4,24 MPa, paralel olarak yapılan deneyler sonucunda ise 19,85 MPa olarak bulunmuştur. Tabakalanma düzlemine dik olarak yapılan deneylerdeki çekme dayanımı ağırlıklı olarak birincil çatlakların, tabakalanma düzlemine paralel olarak yapılan deneylerde ise birincil çatlaklar dayanımın değil ikincil çatlakların oluşumu üzerinde etkili olduğu da yine araştırmacı tarafından belirtilmiştir. 7 farklı çatlak açısı ve 3 farklı asal gerilme oranında (σ_3/σ_1 : 0, 0,113, 0,171) gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde ise çatlak yöneliminin 30° derece olduğu durumda her 3 asal gerilme oranında dayanımın 30 ile 40 MPa arasında olduğu belirlenmiştir. Hoek (1964) yapmış olduğu çalışma sonucunda Griffith teorisinin

özellikle sleyt türü yüksek oranda düzlemsel anizotropi gösteren malzemelerde sıkışmaya bağlı çatlak kapanımının da etkisinin dikkate alınması ile kırık davranışının tahmin edilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Yapılan çalışma özellikle Griffith teorisinin kaya malzemeleri üzerinde uygulanmasına yönelik laboratuvar deneylerini içermesi ve malzemede meydana gelen yenilmenin asal gerilmeler ve çatlak yönelimine bağlı olarak değerlendirilmesi açısından önemlidir.

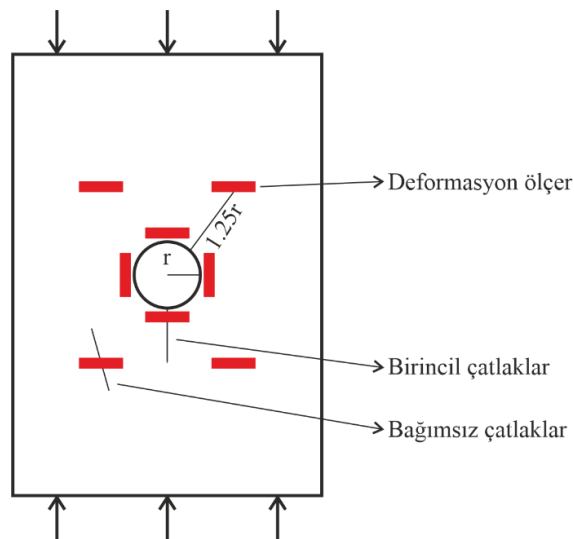
Hoek ve Bieniawski (1965) altın madenciliği için yapılan derin kazılarda kırılğan kaya malzemesi içinde meydana gelerek büyük hasarların oluşmasına sebebiyet veren kaya patlamalarına neden olan çatlak oluşumu ve ilerlemesi mekanizmasını araştırmak amacıyla literatürde yer alan mevcut deney sonuçlarından da faydalanarak yeni yapılan bir dizi deney sonucunu da dikkate alarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Araştırmacılar tarafından oluşturulan 38 cm² yüzey alanına sahip, 6,35 mm kalınlığındaki tavlanmış cam modelde 12,70 mm uzunluğunda tek bir çatlak oluşturulmuş ve kritik çatlak açıları belirlenerek, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin foto elastik yöntemle takip edildiği çekme ve sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli yükleme koşulunda çatlak oluşumunun çok hızlı bir şekilde, iki eksenli yükleme koşulunda ise çatlak oluşumunun tek eksenli yükleme koşuluna göre daha stabil davranış göstererek meydana geldiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda Griffith (1924) tarafından tek bir çatlaktan kaynaklı olarak meydana gelen çatlakların belirlenmesine yönelik olarak önerilen yaklaşımın güvenilir olduğu, ancak tek bir çatlakın malzemenin yenilmesine üzerinde asal gerilmelerden birinin sıfır olduğu durumların dışında etkisinin olmadığı da yine Hoek ve Bieniawski (1965) tarafından ortaya konulmuştur.

Hoek (1968) yarı statik yükleme koşulunda kaya yapılarında meydana gelen çatlaklara yönelik yapmış olduğu çalışmada çatlak oluşumu, farklı koşullar altında çatlak ilerlemesi, sıkışmaya bağlı olarak kayalarda çatlak oluşumuna yönelik olarak hem bir literatür özeti hem de genel değerlendirmede bulunmuştur. Araştırmacı özellikle kayalarda meydana gelen çatlaklar ve dayanım parametresine ilişkin önerilen eşitliklerin ideal malzemeler için önerildiği ancak arazi ve laboratuvar koşullarında benzer şartların sağlanmasının son derece zor olduğunu belirtmiş ve elde edilen sonuçlar ile birlikte kullanılan yöntemlerin bu durum göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Bompard ve Francois (1984) tane boyu 4 ile 6 µm arasında değişen sinterlenmiş nikelin porozitesinin %1 ile %40 arasında değişmesi durumunda yüklemeye bağlı olarak meydana gelen yorulma çatlaklarının ilerlemesine etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada

porozitenin %11'den %17'ye çıkması durumunda meydana gelen çatlak oluşumunun porozlu yapıda olmayan nikel oranla on kat daha hızlı olduğu belirtmişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucunda nikelin sinterleme işlemi sırasındaki sıcaklığa bağlı olarak porozite oranının değiştiğini ve yüksek sıcaklıklarda daha az porozlu malzeme elde edildiğini ve buna bağlı olarak yorulma çatlaklarının daha uzun zamanda oluştuklarını belirtmişlerdir. Yapılan çalışma her ne kadar doğrudan kaya malzemesi kullanılarak yapılmış olmasa da porozite değişiminin farklı malzeme türleri için çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisine yönelik bir değerlendirme olması açısından önemlidir.

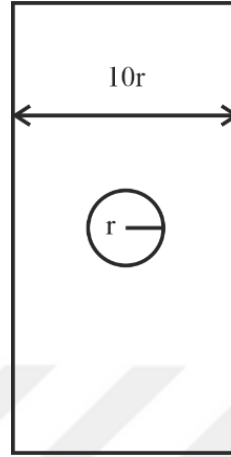
Carter (1992) tarafından kireçtaşlarından alınan örnekler üzerinde boyutları 102 x 86 x 33 mm ile 305 x 305 x 89 mm arasında değişen dikdörtgenler prizması şeklinde sütunlar (9 model) oluşturmuş ve bu sütunlar içerisinde de çapı 1,6 ile 31 mm arasında değişen dairesel boşluklar açılarak (Şekil 2.1) boyut değişiminin ve gerilim dağılımının açıklıkların etrafında oluşan çatlaklar üzerindeki etkisini 25 deney yapılarak araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda birincil, bağımsız ve kavlaklanma çatlakları açıklığın çapından bağımsız olmak üzere tüm deney setlerinde gözlenmiştir. Deney setlerinde gözlenen çatlakların açıklıkları arttıkça, bunların meydana gelmesi için gereken yük miktarı artan boşluk çapına bağlı olarak tüm örnekler için göreceli olarak azalmıştır. Carter (1992) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma özellikle farklı geometrik özelliklere sahip olan ve kaya malzemesi üzerinde açılan yapay açıklıkların çatlak oluşumu üzerindeki etkisinin deneysel yöntemlerle araştırılması konusunda yapılan detaylı çalışmalardan birisidir.



Şekil 2.1. Farklı boy ve çapta hazırlanan örnekler ve örnek üzerine yerleştirilen deformasyon ölçerlerin şematik görüntüsü.

Carter vd. (1992) tarafından yapılan çalışmada dolomitik kireçtaşları ve Lac du Bonnet granitinden alınan örnekler üzerinde farklı çaplarda dairesel açıklıklar oluşturulmuş ve tek eksenli yükleme koşulunda çekme gerilmesine bağlı olarak açıklığın etrafındaki çatlak oluşumu incelenmiştir. Örneklemenin yapıldığı üç kaya grubunun fiziksel ve mekanik parametreleri ile uyumlu olacak şekilde farklı çaplarda (3 ile 61 mm) dairesel boşluklar yapay olarak oluşturularak farklı yanal basınç değerlerinde gerçekleştirilmiş ve dairesel açıklığın etrafında oluşan çatlakların oluşum ve ilerleme mekanizmalarına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Araştırmacılar birincil, bağımsız ve kavlaklanma çatlaklarından hangisinin ilk oluşacağını yükleme ve dairesel açıklığın çapına bağlı olarak değiştiğini belirterek, dairesel açıklığın 5 mm'den daha büyük olduğu durumlarda ilk olarak birincil çatlakların, dairesel açıklığın 3 mm'den küçük olduğu durumlarda ise bağımsız çatlakların oluştuğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar dairesel açıklığın çapının çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerindeki etkisinin çapın 5 mm'den küçük olduğu durumlarda önem kazandığını ortaya koymuşlardır. Araştırmacıların yapmış olduğu çalışma özellikle dairesel açıklığının çapının çatlak oluşumu üzerindeki etkisini ortaya koymasından önemlidir.

Dzik ve Lajtai (1996) tarafından yapılan çalışma ile 2,5 ile 50 mm arasında değişen çaplardaki dairesel boşluklar içeren Lac du Bonnet granitleri üzerinde tek eksenli sıkışma deneyleri yapılarak yüklemeye bağlı olarak oluşan birincil çatlak ilerlemesi incelenmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları laboratuvar deneylerinde 750 x 500 x 100 mm boyutlarında model kullanmış ve açıklıkları modelin ortasına açarak, modelin boyutlarını dairesel açıklığın en az on katı kadar olacak şekilde belirlemişlerdir (Şekil 2.2). Yükleme sonucunda çekme gerilmesi nedeniyle dairesel açıklığın çevresinde birincil çatlaklar, çekme gerilmesi ve sıkışma gerilmesi nedeniyle birincil çatlaklardan bağımsız olarak oluşan bağımsız çatlaklar ve sıkışma gerilmesinin yoğunlaştığı alanlarda meydana gelen kavlaklanma çatlaklarının oluştuğunu belirten araştırmacılar özellikle birincil çatlakların oluşmasının doğrudan dairesel açıklığın boyutu ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle dairesel açıklığın boyutunun 20 mm'den daha az olduğu durumda çatlak uzanımının daha düzgün olmasına karşın 40 mm'den daha büyük olduğu durumda ise daha düzensiz olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, dairesel açıklığın 3 mm'den daha düşük olduğu durumlarda ise birincil çatlakların gözlenmediği sadece bağımsız çatlakların meydana geldiği de yine çalışmada belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Çalışmada oluşturulan boşlukların örnek boyutları ile ilişkisinin şematik gösterimi.

Hatzor ve Palchik (1997) tane boyu dağılımının ve porozitenin çatlak oluşumu ve kritik çatlak uzunluğu üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla porozitesi %2 ile %21 arasında değişen görece olarak düşük porozite değerlerine ve 54 mm çapında olan 32 adet silindirik dolomit örneği üzerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yaparak araştırmıştır. Malzemelerin tane boyu dağılımlarının belirlenebilmesi amacıyla ince kesit örnekleri, deney sonucunda meydana gelen yenilme davranışı, çatlak oluşumu ve ilerlemesi incelenmesinde ise elektron mikroskobu (SEM) araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Bilgisayar kontrollü olarak yapılan deney sonuçlarına göre malzemelerin elastisite modülü değerleri 18 ile 70 GPa, poisson oranları 0,16 ile 0,37, dayanım değerlerinin ise 62 ile 274 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Araştırmacılar bununla birlikte çatlak oluşumunun kaya malzemesinin dayanımının %52 ile 98'i kadar bir değere ulaştıktan sonra başladığını ortaya koymuşlardır. Ancak burada çatlak oluşumu mekanizmasının malzemenin porozite değeri ile ilgili olduğu, özellikle düşük porozite değerlerinde yenilme anına kadar çatlak oluşumunun gözlenmesinin mümkün olamayabileceği de göz önüne alınmalıdır. Çatlak oluşumuna ilişkin araştırmacılar tarafından toplam deformasyon, porozite ve ortalama tane çapı parametrelerinin baz alındığı görgül model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çatlak uzunluğu değerlerinin 0,028 ile 0,690 mm arasında değiştiğini belirten araştırmacılar uzunluk parametresi üzerinde düşük porozite koşullarında ortalama tane çapının ağırlıklı olarak etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Martini vd. (1997) yeraltı açıklıklarında gerçekleştirilen kazılardan kaynaklı gerilme koşullarının değişmesinden etkilenen birimleri ve özelliklerini incelemek amacıyla doğrudan kazı yöntemiyle kırılğan ve çatlaksız granit ve granidioritler içinde açılan 46 m uzunluğunda ve 3,5 m

çapındaki test tüneline yedi ay süren bir çalışma yaparak jeomekanik ve jeofiziksel yöntemler aracılığı ile yenilme davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarında kazı sırasında formasyonların değişen gerilme koşulları karşısındaki durumunu incelemiş, kazıdan etkilenen birimlerin hidrolik özelliklerini belirlemek için ise permeabilite deneyleri yapmış ve termal yükleme yaparak ısı-yenilme ilişkisini de incelemişlerdir. Martini vd. (1997) yapmış oldukları çalışmalar sonucunda yenilme davranışının doğrudan kazı aynası ile bağlantılı olduğunu, kavlaklanma türü sorunların ise tünel hattı boyunca devam etmediğini kazı bölgesi ile sınırlı kaldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışma kaya malzemesi ile ilişkili çalışmaların daha ölçeklendirilerek kaya kütlelerine yönelik olabilecek tecrübe ve çalışmaları içermesi açısından son derece önemlidir.

Bobet ve Einstein (1998) kırılğan malzemelerin yenilme davranışları üzerinde önemli bir etkisinin bulunması nedeniyle çatlak birleşmesinin araştırılmasına yönelik olarak çatlaklı yapıda olan ve kırılğan kayaları temsil eden jipsleri kullanarak oluşturdukları 152,4 x 76,2 x 30 mm boyutlarındaki prizmatik örnekler üzerinde tek ve iki eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yaparak araştırmışlardır. Örnekler üzerinde 12,7 mm uzunluğunda ve 0,1 mm derinliğinde çentik oluşturularak çatlak açısının 30° ile 60° arasında değiştiği koşullarda ve kontrol örneklerinin de oluşturulabilmesi amacıyla çatlaksız örnekler üzerinde de ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler değişen çatlak açıları dikkate alındığında tek eksenli koşullar için 140 örnek, iki eksenli koşullar için 11 farklı geometriye sahip örnek üzerinde 2,5 ile 10 MPa arasında değişen yanal basınç değerleri altında 132 deney, 0,002 mm/s yükleme hızı ve her 5 kN'luk yük değişiminde deformasyon ölçümü alınacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tek ve iki eksenli sıkışma deneyleri sonucunda meydana gelen çatlak sistemlerinin her zaman kanat çatlakları ve ikincil çatlakların etkisi altında meydana geldiğinin belirtildiği çalışmada ikincil çatlakların her koşul altında meydana geldiği ve çatlak birleşmesi durumunda mutlaka görüldüğü belirtilmiştir. Araştırmacılar iki tür çatlak oluşumunda çatlak birleşmesi meydana gelene kadar çatlak ilerlemesinin stabil bir şekilde meydana geldiğini sonraki aşamada ise belli bir düzen içermeyen yenilme olana kadar devam ettiklerini belirtmişlerdir. Yapılan çalışma özellikle birden fazla boşluğun bulunduğu kaya malzemesi içinde boşluklar arasında meydana gelecek olan çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesine yönelik olarak değerlendirmelerin yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir.

Al-Harhi vd. (1999) vesiküler dokudaki bazaltların içermiş olduğu küresel ve düzensiz geometrideki boşlukların birbirleri ile bağlantılı olmadığı durumlarda konvansiyonel test yöntemleri

ile belirlenmesinin mümkün olmamasından hareketle bu yapıdaki bazaltların porozite değerlerinin belirlenebilmesine yönelik olarak görsel bir analiz yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacıların kullanmış olduğu görsel görüntüleme yaklaşımı ile konvansiyonel deney yöntemlerine oranla vesiküler yapıdaki bazaltlarda üç kata kadar daha fazla porozite değerleri tespit edilmiştir. Bu yaklaşıma ek olarak araştırmacılar porozite ile diğer parametreler arasında da ilişkiyi belirlemek amacıyla istatistiki analizler yapmıştır. Yapılan analizler sonucunda porozite değerinin %20'ye kadar yükseldiği durumda tek eksenli sıkışma dayanımında hızlı bir düşme, sonraki porozite değerlerinde ise göreceli olarak daha yavaş bir düşme olduğu, elastisite modülü değerlerinin %20'ye kadar olan porozite değerleri için logaritmik olarak %20'den sonraki değerler için ise lineer olarak düştüğü ve poisson oranının ise %10 porozite oranına kadar arttığı sonraki değerler için ise sabit kaldığı belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışma özellikle kısmen de olsa boşluk olarak tanımlanabilecek derecede porozite değerlerine ulaşılması ve bunların mekanik parametreler üzerindeki etkisinin araştırılması bakımından önemlidir.

Eberhardt vd. (1999) tarafından üç farklı tane boyu dağılımına sahip olan ancak benzer mineralojik yapıdaki kristalen kayalar (Lac du Bonnet graniti) üzerinde yüklemeye bağlı olarak meydana gelen çatlakların oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesi ile tane boyu arasındaki ilişkiyi laboratuvar deneyleri ile ortaya koymaya çalışılmıştır. Deneyler sırasında meydana gelen çatlaklar mikroskop, elektron mikroskobu ve petrografik yöntemler kullanılarak gözlenmiştir. Deneylerde kullanılan örneklerin tane boyu dağılımı 10 ile 40 mm arasında değişmekte olup, çapı 61 mm ve örneklerin boy/çap oranı ise 2,25'tir. Yapılan çalışma sonucunda tane boyunun çatlak oluşumunu tetikleyen gerilim üzerinde düşük miktarda etkisinin olduğu, mineralojik incelemelere göre ise feldispat ve kuvars tanelerinin olduğu bölgelerde daha yoğun çatlak oluşumunun gözlemlendiğini belirten araştırmacılar bu nedenle mineralojik bileşimin tane boyundan daha yüksek oranda etkili olduğunu belirtmişlerdir. Tez çalışması kapsamında tercih edilecek olan boşluk içerme ihtimali yüksek olan kayaların mineralojik yapısından kaynaklı olarak çatlak oluşumuna yönelik olarak yapılması muhtemel değerlendirmelerde Eberhardt vd. (1999) tarafından yapılan çalışmaya benzer bir yöntemin izlenmesi düşünülmektedir. Araştırmacıların yapmış olduğu çalışma özellikle mineralojik bileşimin çatlak oluşumu üzerindeki etkisini ortaya koyması nedeniyle önemlidir.

Palchik (1999) kırılğan ve porozlu yapıya sahip kumtaşlarına yönelik olarak porozite, elastisite modülü ve tane boyunun etkisini yansıtan bir model oluşturmuştur. Tane boyu oranı 0,19 ile 0,26 mm ve porozitesi %27 ile 47 arasında değişen kumtaşlarının dayanım ve deformasyon

özellikleri üzerinde porozite ve elastisite modülünün etkisini belirleyebilmek amacıyla 54 mm çapında olan 16 farklı örnek üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda, araştırmacı kumtaşlarının dayanım değerleri 7,1 ile 19,8 MPa arasında, elastisite modülü değerleri ise 1,4 ile 2,5 GPa arasında değiştiğini belirtmiştir. Araştırmacı tarafından yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılan ve istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler veren analizlere göre porozite oranının artması ile birlikte tek eksenli sıkışma dayanımında ve elastisite modülünde azalma olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada ayrıca tane boyu ile diğer parametreler arasında anlamlı bir istatistiksel ilişki belirlenememiş ve malzemenin dayanım ve deformasyon özelliklerinin porozite ve elastisite modülünün bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Araştırmacı tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar teorik olarak beklenen sonuçlar olmasına rağmen deneylerin doğrudan yapılması ve sonuçlarının da paylaşılması açısından yapılacak modelleme çalışmalarında kullanılabilecek olması nedeniyle önemlidir.

Palchik ve Hatzor (2002) kireçtaşı ve dolomitlerden alınan örnekler üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma deneylerinden elde edilen veriler ve porozite değerlerini kullanarak çatlaklardan kaynaklı olarak meydana gelen yenilmeye ilişkin olarak görgül bir eşitlik önermek amacıyla çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Toplam 25 örneğin (16 dolomit, 9 kireçtaşı) kullanıldığı laboratuvar çalışmalarında örneklerin porozite değerleri %5,4 ile 29, dayanım değerleri ise 32 ile 274 MPa arasında değişmektedir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucunda elastisite modülü değerlerinin porozite ile ters orantılı olduğu, bu parametrelerin arttığı veya azaldığı durumlarda da çatlak oluşumundan kaynaklı yenilme davranışının da hızlı bir şekilde geliştiğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada porozitenin hangi yöntemler kullanılarak belirlendiği belirtilmemiştir. Çalışmada kullanılan örneklerin porozite değerleri görünür gözeneklilik değerleri olarak değerlendirildiği takdirde örneklerin birbiri ile bağlantılı olmayan boşluklar içerebilme ve bunlarında hesaplamalara yansıtılması konusunda ise herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Sagong ve Bobet (2002) kaya malzemesinde bulunan birden fazla fisüre bağlı olarak oluşan çatlakların tek yönlü sıkışma koşulları altında ortaya koyduğu birleşme davranışına yönelik olarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirerek birleşme mekanizmasını ortaya koymaya çalışmışlardır. Araştırmacılar bu amaçla 101.6 x 202.2 x 30 mm boyutlarında su ve jips karışımından oluşan üç ve on altı fisür içeren iki örnek grubu hazırlayarak 0.04 mm/dk hızında tek eksenli yükleme koşullarında deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre kanat ve ikincil çatlaklar olmak üzere iki

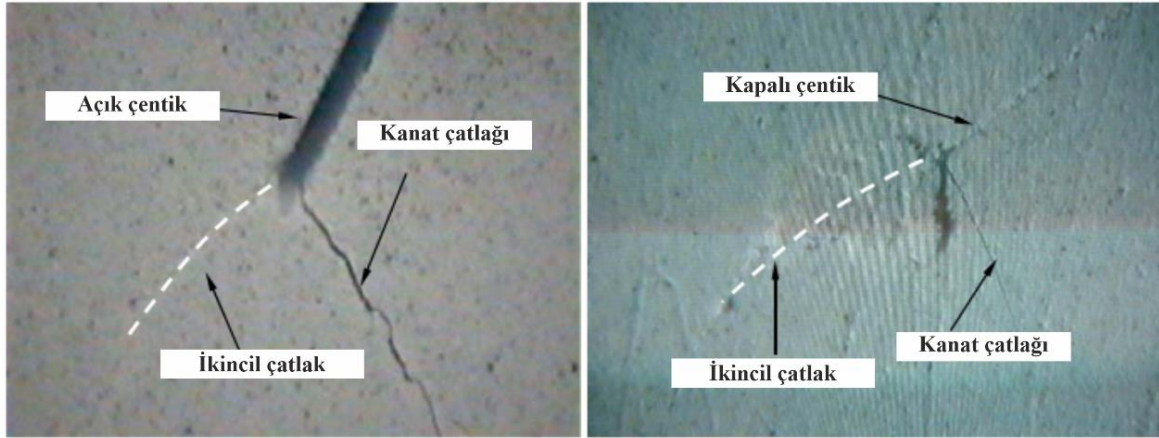
türde çatlak sistemi gözlenmiş olup, bunların oluşumunun ve dolayısıyla birleşimlerinin doğrudan fisürlerin geometrik konumları ile ilgili olduğu belirtilmiştir.

Chang vd. (2006) tarafından kumtaşı, şeyl, kireçtaşı ve dolomit gibi sedimanter kayaların sıkışma dayanımı, içsel sürtünme açısı gibi parametreleri ile porozite, elastisite modülü gibi diğer parametreleri arasındaki ilişkilere yönelik olarak kuyu loglarından elde edilen verileri kullanarak 31 görgül eşitliğe ilişkin genel bir değerlendirme yapılmıştır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada 260 kumtaşı, 100 şeyl ve 140 kireçtaşı-dolomit ile ilgili diğer araştırmacılar tarafından çalışılan ve literatürde yer alan fiziksel ve mekanik verileri kullanmışlardır. Yapılan çalışmada araştırmacılar tarafından önerilen eşitliklerin ağırlıklı olarak türetildikleri kaya türleri için yüksek porozite değerlerinde geçerli oldukları belirtilmiştir. Çalışma, özellikle porozite oranı ile ilgili çok sayıda kaya örneğine ilişkin deney sonuçları içermesi ve modelleme çalışmalarında kullanılabilecek bir veri tabanı oluşturulmasına katkı sağlaması açısından önemlidir.

Palchik (2006) tarafından Mohr-Coluomb yenilme kriterinin temel aldığı parametreler üzerinde porozite değişiminin etkisini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada porozite oranları %19 ile %49 arasında değişen 36 adet 54 mm çapındaki kumlu şeyl örneği üzerinde 0,01 ile 3 MPa arasında değişen yanal basınç değerlerinde tek ve üç eksenli eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yaparak araştırmıştır. Araştırmacı poroziteden bağımsız olarak farklı yanal basınç değerleri için şeyllerin dayanım parametrelerine yönelik yapmış olduğu istatistiki analizlerde örneklerin aynı yanal basınç değerlerinde farklı gerilme değerleri elde edildiğini belirterek iki parametre arasında bir ilişki kurulamayacağını ortaya koymuştur. İçsel sürtünme açısı ve kohezyonun porozite artışına bağlı olarak düştüğü de araştırmacı tarafından belirtilmiştir.

Park ve Bobet (2009) derin ve yüzeysel çentikler içeren alçıtaşı sıklıkmaya bağılı olarak meydana gelen çatlak oluşumlarını diğer araştırmacılarının yapmış olduğu çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırma amacıyla 2, 3 ve 16 adet derin (open) ve yüzeysel (closed) çatlğa sahip örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.3). Araştırmacılar deneylerinde kullanmış oldukları alçıtaşını alçı, su ve silisli toprak karışımı ile oluşturmuş ve titreşim, ısınma gibi süreçlerden geçirerek homojen koşulları sağlayacak şekilde deneylere hazırlamışlardır. Derin (open) ve yüzeysel (closed) çentikler ise alçıtaşını hazırlanmasından sonra film kağıdı ve metalik keskiiler kullanılmıştır. Oluşturulan tüm çentiklerin uzunluğu ise farklı yönelime sahip olsalar dahi 12,7 mm olarak ayarlanmıştır. Yapılan laboratuvar deneyleri sırasında hem derin hem de yüzeysel çentiklerde ilk önce bir tür gerilme çatlğı olan kanat çatlaklarını gözleyen araştırmacılar her koşulda ilk olarak

kanat çatlaklarının oluştuğunu daha sonra ikincil çatlaklar olarak tanımlanan makaslama çatlaklarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Oluşan makaslama çatlakları ise çentiklerin uç kısımlarında çentik yönelimine de bağlı olarak düzlemsel veya oblik şekilde meydana geldiği de yine araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Çentik türü ve sayısı farketmeksizin örneklerde genellikle çekme, düzlemsel ve oblik makaslama çatlakları görülmüş olup meydana gelen çatlaklar her zaman çentiklerin uç kısımlarda oluşmaya başlamıştır. Park ve Bobet (2009) tarafından yapılan çalışmada çentik türüne bakılmaksızın benzer çatlak oluşum mekanizmasının meydana geldiği belirtilmiştir. Yapılan çalışma özellikle yeni çatlak oluşumlarının yönelim, çentik türü gibi parametreler ile olan ilişkisini deneysel olarak açıklamaktadır.



Şekil 2.3. Açık ve kapalı çentiklere bağlı olarak meydana gelen ikincil ve kanat çatlakların görünümü.

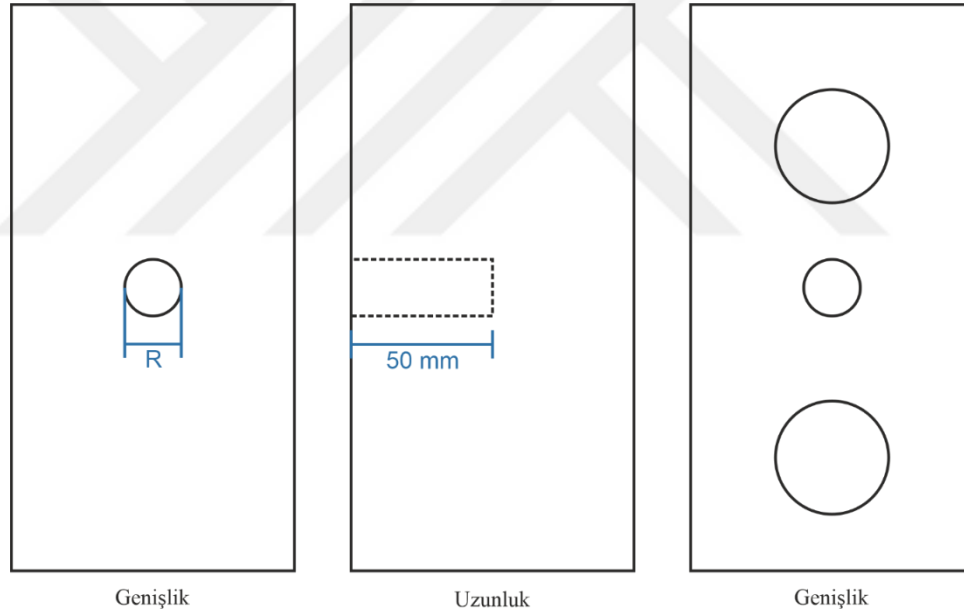
Yang vd. (2012) kumtaşlarından elde edilen 80 x 160 x 3000 mm boyutlarındaki dikdörtgenler prizması üzerindeki örnekler üzerine jet su püskürtmesi yöntemi ile 2,5 mm genişliğinde 3 adet fisür oluşturmuş ve bu örnekleri üzerinde tek eksenli sıkışma deneyi gerçekleştirerek fisürlerden kaynaklı olan çatlak birleşimine yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Araştırmacılar çatlak birleşmesine yönelik değerlendirmeler için aynı yönelim ve farklı uzanım açılarında örnekler hazırlayarak yükleme sırasında meydana gelen davranışları ise fotografik görüntüleme yöntemi kullanarak takip etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda fisür içeren örneklerin sağlam kayaya göre daha düşük dayanıma sahip olduğu, yönelim açısının ise 75° ve 90° olduğu durumlarda ise en düşük dayanımın gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Yang ve Huang (2013) yeraltı açıklıkları ve tünellerin ağırlıklı olarak kayalar içerisine inşa edilmesinden dolayı bu tür yapılarda meydana gelebilecek olan tavan çökmelere yönelik olarak Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünü temel alarak dikdörtgen şekilli yapılar için iki ve üç boyutlu olan parametrik analiz yöntemleri kullanarak değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar çöken tavan bloğunun boyutlarının çekme dayanımı ve malzeme sabiti ile arttığını ancak pozitif skaler katsayısı ve destek basıncı ile azaldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte iki boyutlu analizlerde üç boyutlu analizlere göre çöken tavan bloğunun boyutlarını daha az olabileceğine yönelik sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Baud vd. (2014) yapmış oldukları çalışma ile kumtaşı, kireçtaşı ve tüften oluşan üç farklı kaya grubundan alınan örnekleri üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma deneylerinden ve önceki araştırmacıların yapmış oldukları deneylerden elde ettikleri verileri kullanarak porozite ve çatlak yoğunluğunun sıkışma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacıların kullandığı ve farklı lokasyonlardan alınan kumtaşı örneklerinin porozite değerleri %4 ile %28, tane boyları ise 0,01 ile 0,46 mm arasında değişmekte olup deneylerde 40 x 20 mm boyutlarında örnekler kullanılmıştır. Araştırmacıların karşılaştırma amacıyla kullandığı diğer kaya türlerine ait örneklerin ise porozite değerleri %0,2 ile 23, tane boyları ise 0,005 ile 2 mm arasında değişmektedir. Bu çalışmada dayanım üzerinde porozite etkisi porozlu yapının küresel olduğu, çatlak yoğunluğunun etkisi ise mevcut çatlakların bulunduğu bölgelerde çekme gerilmesinin yoğunlaştığı kabul edilerek incelenmiştir. Beklendiği üzere porozitenin artmasının dayanımı düşürdüğünü ifade eden araştırmacılar bu önerinin özellikle tüflerin mikro yapısal özellikleri nedeniyle tüf türü volkanik kayalar için uygulanabilir olmadığını belirtmişlerdir.

Zhao vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada tek eksenli yükleme koşulları altında bir ucu açık olan diğer ucu kaya malzemesinin içinde sonlanan bir ve birden fazla dairesel açıklıklar içeren kırılğan kaya malzemesindeki çatlak oluşumu ve gelişimi hem fiziksel modeller hem de akustik emisyon tekniği kullanılarak incelenmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma doğrultusunda granitlerden örnekleme yaparak 100 x 100 x 200 mm boyutlarında fiziksel modeller oluşturmuş ve bu modeller üzerine yapay olarak 20, 28 ve 38 mm çaplarında dairesel açıklıklar oluşturarak örnekleri gruplandırmışlardır (Şekil 2.4). Oluşturulan tüm örnekler aynı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olan granitlerden elde edilmiş olup, deneyler 20 kN/dk ve 0,05 mm/dk yükleme hızında teste tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler dairesel açıklığın çapına bağlı olarak akustik emisyon verileri sırayla (20, 28 ve 38 mm) muhtemel çekme gerilmesinin yoğunlaşacağı dairesel açıklığın merkezinden

örneğin tavan kısmına doğru, gerilimin 35 MPa kritik seviyesini aşması durumunda açıklığın çevresinde ve makro çatlakların oluşumuna bağlı olarak örneğin büyük bir bölümünde gözlenmiştir. Kaya malzemesinin içinde birden fazla dairesel açıklığın bulunduğu durumlarda ise yüklemeye bağlı olarak meydana gelen çatlakların örneğin tavan ve taban kısmına yakın olan dairesel açıklıkların çevresinde oluştuğu ve oluşan çatlakların düşey değil yatay olduğunu belirten araştırmacılar birden fazla dairesel açıklığın bulunduğu durumların, bir açıklığın bulunduğu durumlara göre çok daha kompleks ve karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada doğrudan elde edilen veriler kullanılması nedeniyle özellikle dairesel açıklık içeren kaya malzemelerindeki çatlak oluşumu ve ilerlemesinin incelenmesi açısından önemlidir.



Şekil 2.4. Oluşturulan modellerin şematik gösterimi.

Deng vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada gaz depolama alanları gibi geniş yeraltı açıklıklarının duraylılık özelliklerine yönelik bir çalışma yapılarak deformasyon destek teorisi önerilmiştir. Araştırmacılar tarafından deneysel çalışma için farklı boyutlarda olan küçük bloklar kullanılarak 140 x 1500 mm boyutlarında model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model içerisinde farklı koşullarda açıklıklar etrafından meydana gelen çatlak oluşumuna yönelik olarak detaylı değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Laboratuvar verileri aracılığı ile temel nümerik modeller de oluşturularak elde sonuçlar birbirleri ile de karşılaştırılmıştır.

Turichshev ve Hadjigeorgiou (2016) tarafından Şili’de bulunan El Teniente madeninden alınan damarlı andezit örnekleri üzerinde 2 ile 60 MPa arasında değişen yanal basınç değerlerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılarak damarlardan kaynaklı olarak meydana gelen mekanik davranış çözümlenmeye çalışılmıştır. Araştırmacılar deneyler sırasında akustik emisyon değerlerini de kaydederek damarlardan kaynaklı olarak oluşan çatlaklara ilişkin verileri toplamışlardır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada damar içermeyen sağlam kaya ile damar içeren arasında farklı bir davranış olduğu, damarlı yapının çatlak oluşumunu arttırdığı, yanal basıncın 30 MPa ve üzeri olduğu koşullarda ise kaya malzemesinin çok daha zayıf bir davranış gösterdiği belirtilmiştir.

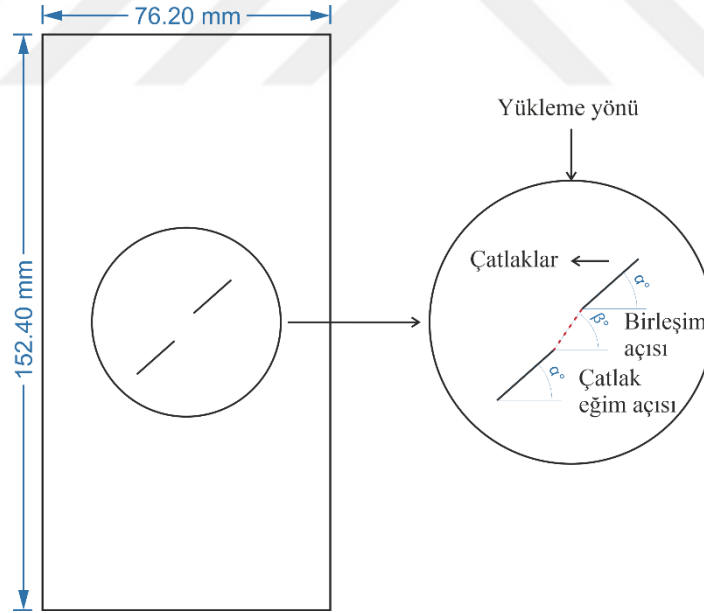
Bubeck vd. (2017) tarafından yapılan çalışmalar boşluk geometrisini kaya malzemesinin dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik yöntemler aracılığı ile araştırılmıştır. Araştırmacılar tarafından arazi çalışmaları ile farklı yönelimlere sahip boşlukları barındıran kaya malzemeleri örneklenmiş ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinin yanı sıra araştırmacılar iki boyutlu nümerik modeller aracılığı ile de boşluk geometrisini etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonunda aynı porozite değeri olması durumunda boşlukların farklı geometriye sahip olması durumunda kaya malzemesinin dayanımında 10 kata varan farklılıklar olduğu araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar nümerik veriler ile de doğrulanmıştır.

Zhong vd. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada doğal çatlaklar içeren sert ve kırılğan riyolit örnekleri üzerinde iki eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılarak çatlak mekaniğinin anlaşılmasına yönelik olarak detaylı bir değerlendirme yapılmıştır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada 120 x 120 x 60 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde geometriye sahip örnekler kullanılmıştır. Hazırlanan bu örnekler üzerinde boşluksuz, 20 mm çaplı dairesel ve 40 mm çaplı U şekilli açıklıklar oluşturulmuş ve çatlak mekaniği farklı koşullar içinde değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında yapılan fotoğraf çekimleri ile de yüklemeye bağlı olarak meydana gelen çatlak oluşumları da kayıt altına alınmıştır.

2.2. Deneysel ve Nümerik Yöntemler Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

Shen (1995) iki adet açık veya kapalı çatlak içeren jipslerde çatlak birleşmesinin meydana gelme mekanizmasının araştırılmasına yönelik olarak yapmış olduğu çalışmada hem deneysel hem de nümerik yöntemleri kullanmıştır. 152 x 76 x 30 mm boyutlarında örneklerin kullanıldığı ve örnekleme sırasında aralarında 12,7 mm mesafe bulunan iki adet 12.7 mm uzunluğunda çatlak

oluşturulmuştur (Şekil 2.5). Araştırmacı tek eksenli sıkışma deneyleri sonucunda iki çatlakın birleşmesinin arasındaki açıya bağlı olarak, açının $45-60^\circ$ olduğu durumlarda makaslama yenilmesi, $75-90^\circ$ hem makaslama hem de çekme yenilmesi, $105-120^\circ$ olduğu durumlarda ise çekme yenilmesinin kontrolünde olduğunu belirtmiştir. Shen (1995) tek eksenli sıkışma deneylerinden elde ettiği sonuçları “*Displacement Discontinuity Method (DDM)*” yaklaşımını kullanarak nümerik çalışmalarda da deneysel çalışmalardan elde ettiği sonuçlar ile yaklaşık olarak benzer verileri elde etmiştir. Araştırmacı ayrıca tek eksenli sıkışma deneyleri sırasında ve sonrasında kullandığı video kamera ve mikroskop ile de çatlaklara ilişkin detay analizler gerçekleştirmiştir. Shen (1995) tarafından yapılan çalışma porozlu bir yapıya sahip olan tek bir kaya türü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacının yapmış olduğu bu çalışmadan elde edilen sonuçların daha düşük poroziteye sahip olan ve farklı yapıdaki kaya türleri için geçerli olup olmadığının denetlenmesi yeni çalışmaların yapılması gerekmektedir.

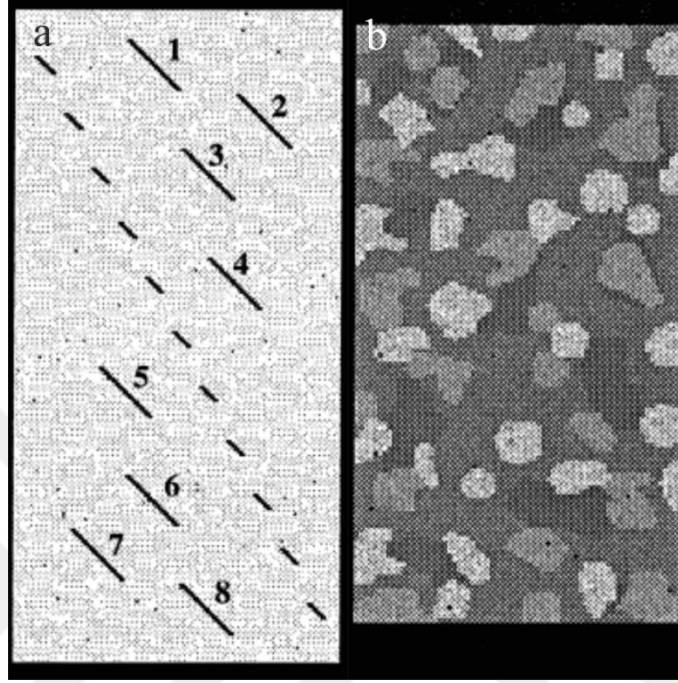


Şekil 2.5. Çatlak içeren jips örneklerinin şematik gösterimi.

Dzik (1996) çatlak oluşumu ve ilerlemesinin özellikle maden kazılarında neden olduğu büyük hasarlar nedeniyle farklı çaplara sahip olan açıklıklarda sıkışmaya bağlı olarak oluşan çatlak sistemlerini hem laboratuvar deneyleri ile hem de nümerik yöntemler kullanarak incelemiştir. Araştırmacının yapmış olduğu laboratuvar deneylerinde tane boyu 0,5 ile 20 mm arasında değişen

oligoklas, mikroklin, kuvars ve biyotit minerallerinden oluşan granit örnekleri kullanılmıştır. Kullanılan granitler açıklığın çapı ile orantılı olacak şekilde 376 x 108 x 70 mm ile 740 x 508 x 105 mm arasında değişen boyutlarda kesilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda birincil, bağımsız çatlaklar ve kavlaklanmaların hem açıklığın çapı ile doğrudan ilişkili olduğu, hem de bu yapıların oluşmasına neden olan yük miktarlarının da farklı olduğu belirlenmiştir. Açıklığın çapının 10 mm olduğu durumda 110 MPa yük altında görülen bağımsız çatlaklar, açıklığın 50 mm olduğu durumda ise 80 MPa yük altında oluşmaya başlamıştır. Dolayısıyla araştırmacının yapmış olduğu çalışma ile ölçek etkisi de incelenmiştir. Aynı zamanda araştırmacı yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarından elde ettiği sonuçları geliştirdiği yazılım ile de nümerik olarak modellemiş deneysel yollarla elde ettiği sonuçlar ile yine benzer sonuçları elde etmiştir.

Tang ve Kou (1998) tarafından farklı gerilme koşulları altında kırılğan malzemelerin sahip oldukları çatlakların ilerlemesi, birbirleri ile olan etkileşimleri ve yönelik olarak “*Rock Failure Process Analysis Code (RFPA2^D)*” yaklaşımı kullanarak nümerik analizler yapılmıştır. Araştırmacılar tarafından 200 x 100 mm boyutlarında, 8,6 mm uzunluğunda 11 küçük çatlak ve 28,8 mm uzunluğunda 8 büyük çatlaktan oluşan bir model ile malzeme heterojenitesinin etkisini de belirleyebilmek amacıyla rasgele atanmış özelliklere sahip olan iki model kullanmışlardır (Şekil 2.6). Yüklemeyle ilgili olarak ilk olarak büyük çatlaklardan kaynaklı olarak yeni çatlakların oluştuğu ve ilerleyen aşamalarda diğer çatlaklarla birleşmenin meydana gelmesi ile yenilme davranışının sergilendiğinin belirtildiği araştırmada, düşey yükün 8 MPa sınırını aştıktan sonra çatlak ilerlemesinin başladığı ve bunun yükleme yönünde olduğu belirtilmiştir. Malzeme heterojenitesine yönelik yapılan değerlendirmelerde ise özellikle çatlakların ağırlıklı olarak zayıf zonlarda bulunan farklı yapıdaki tanelerin etrafında oluşmaya başladığı ve yenilmenin de yine bu bölgelerde meydana gelen deformasyon kaynaklı olarak geliştiği belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan bu çalışmada modellenen malzemelerin mekanik özelliklerine ilişkin olarak herhangi bir bilgi verilmemektedir. Bu nedenle oluşturulan modellerin diğer araştırmacılar tarafından doğrulanması mümkün değildir. Yapılan çalışmada bulunan bu tür kısıtlara rağmen verilen çatlak sistemlerinin kaya malzemesi üzerinde oluşturulması, elde edilen sonuçların karşılaştırılarak yenilme davranışı üzerinde çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesinin etkisinin değerlendirilmesi kısmen de olsa mümkündür.

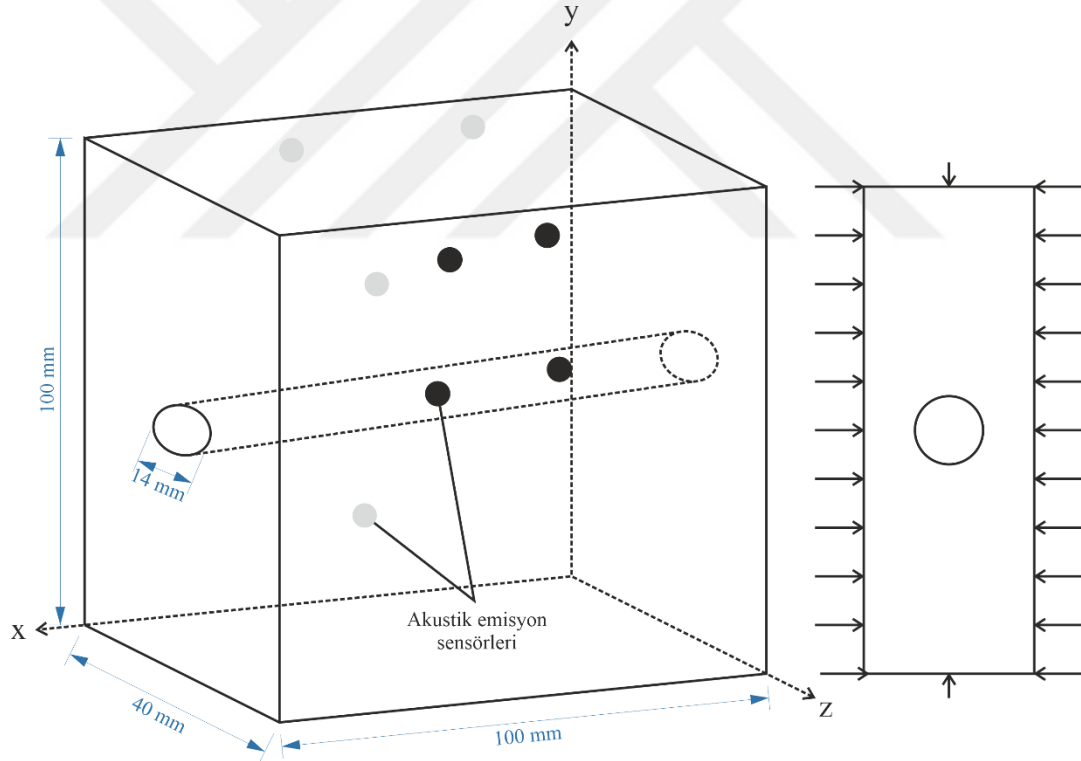


Şekil 2.6. (a) Küçük çentikler ile birlikte büyük çentikler içeren sayısal model, (b) Rasgele dağıtılmış heterojen yapıları içeren sayısal model.

Bobet (2000), prizmatik alçıtaşı örnekleri kullanarak iki adet derin ve yüzeysel çentiklerin bulunduğu örnekler üzerindeki iki boyutlu olarak ikincil çatlakların (kanat ve makaslama) oluşum mekanizmalarına yönelik olarak tek ve iki yönlü sıkışma deneyleri gerçekleştirerek değerlendirmelerde bulunmuş ve ikincil çatlakların oluşumlarına yönelik yeni bir yaklaşım önermiştir. Araştırmacı tarafından hazırlanan örnekler 152 x 76 x 26 mm boyutlarında olup, farklı yönelime sahip olan 12,7 mm uzunluğunda çentikler bulunmaktadır. Deneyler sırasında meydana gelen kanat çatlakları yönelim yönü ile yükleme yönünün aynı olduğu durumlarda çatlak birleşmesi kanat çatlakları üzerinden, tersi durumlarda ise diğer ikincil çatlaklar üzerinden gerçekleştirmektedir. Bobet (2000) deney sonuçlarından elde ettiği veriler ve gözlemlere dayanarak iki boyutlu nümerik modelleme yöntemlerinden birisi olan yer değiştirme süreksizliği modelini (DDM) kullanmıştır. Yapılan çalışmada iki boyutlu değerlendirme yöntemleri kullanılmış olup, deney sonuçlarına göre çatlak birleşmesinin çentik türüne bağlı olmaksızın yükleme yönünde kanat çatlaklarının kontrolünde olduğu belirtilmiştir.

Fakhimi vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada Berea kumtaşlarından alınan kullanılarak oluşturulan 14 mm çapında dairesel açıklık içeren 100 x 100 x 40 mm boyutlarında model üzerinde

7,5 MPa yanal basınç altında gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma deneyleri dayanım ve deformasyon parametrelerini belirleyerek, “*Particle Flow Code in 2 Dimension (PFC2D)*” yazılımı kullanılarak oluşturulan nümerik modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yenilme davranışına yönelik değerlendirme yapmışlardır (Şekil 2.7). Araştırmacıların yapmış olduğu çalışma sonucunda deneysel ve nümerik olarak elde edilen sonuçlar yüksek oranda uyum göstermektedir. Yapılan çalışmada kullanılan kumtaşı örneğinin yapay olarak açılan dairesel açıklık dışında herhangi bir fisür, çatlak vb. yapısal kusur içermemesi nedeniyle nümerik olarak modellenmesinin daha kolay olmasına rağmen laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin nümerik olarak modellenmesine ilişkin iyi bir örnektir.



Şekil 2.7. Çalışmada kullanılan modelin yükleme sisteminin, dairesel açıklığı ve akustik emisyon sensörlerinin şematik gösterimi.

Tang vd. (2007) doğrudan çekme deneyinin özellikle silindirik şekilli karot örnekleri üzerinde yapılmasındaki zorluklar nedeniyle, çekme yenilmesi mekanizmasının tam olarak anlaşılmadığını belirterek bu amaç doğrultusunda nümerik olarak modeller oluşturarak çalışmalarda bulunmuşlardır. Araştırmacılar tarafından çekme yenilmesine yönelik olarak nümerik çalışmalarda

kullanılmak üzere sonlu elemanlar yöntemini temel alan bir yaklaşımla iki boyutlu modeller kullanmışlardır. Çalışma kapsamında 130 x 130 mm boyutlarında olan ve 16900 parçacık içeren modeller kullanılmış olup, çekme deneyi 0,0002 mm/step (step; yazılım içinde her iterasyon hesabının yapıldığı aşama) hızında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından oluşturulan modeller özellikle heterojenite etkisinin de yansıtılabilmesi amacıyla farklı homojenite indeksi (1,5, 2, 3 ve 5) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda oluşturulan tüm modellerin çekmeye bağlı ilk aşamalarında farklı homojenite indeksi değerlerine rağmen benzer bir deformasyon davranışı belirlenmiş olup sonraki aşamalarda ise homojenite indeksi değerinin yüksek olduğu modellerin dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Nümerik çalışmalardan elde edilen bir diğer sonuç ise akustik emisyon verilerinin %80'inin en yüksek dayanım değerinin %75'ine ulaşmada meydana geldiği belirlenmiştir. Yenilme davranışının üç farklı bölümde değerlendirilebileceğini belirtilen çalışmada ilk aşamada belirli bölgelerde birbirinden bağımsız olan çatlakların oluştuğu, sonraki aşamada ise meydana gelen bu çatlakların birleşerek yenilme ile sonuçlanacak derecede ilerlediği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada modeller iki boyutlu olarak oluşturulduğu ve malzemelerin her ne kadar homojenite indeksi değerleri farklı olsa dahi, heterojenik yapının bir nevi eş olarak dağıtılmasından ötürü ve laboratuvarında yapılan doğrudan deneyler ile elde edilen sonuçlar denetirilmediği için verilerin doğrulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte çekme deneyinin nümerik olan iki boyutlu modeller üzerinde uygulanabilirliğine yönelik olarak yapılan bir çalışma olması nedeniyle elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla kullanılabileceği düşünülmektedir.

Schöpfer vd. (2009), tane boyu dağılımı, porozite ve çatlak yoğunluğunun kohezyonlu granüler malzemelerin elastisite, dayanım ve içsel sürtünme açısı üzerindeki araştırmak amacıyla ayrık elemanlar yöntemi ile PFC3D (Particle Flow Code) yazılımını kullanarak oluşturulan üç boyutlu modeller aracılığı ile araştırmışlardır. Araştırmacılar porozitesi %23 ile 37 arasında değişen modeller oluşturarak 0,1 ile 40 MPa arasında değişen yanal basınç değerleri altında deneyleri nümerik olarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları nümerik analizlerden elde etmiş oldukları gerilme-deformasyon verilerine göre malzemenin sergilemiş olduğu yenilme davranışının yüksek ve düşük poroziteli örneklerde farklı olduğunu, özellikle düşük poroziteye sahip örneklerin gerilme-deformasyon eğrilerinin yüksek poroziteye sahip örneklerle göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Porozite ile birlikte malzeme dayanımı üzerinde etkisi bulunan çatlak yoğunluğunun bu çalışma ile dayanım üzerinde ne derece etkili olduğu ortaya konulamamıştır. Buna karşın

araştırmacılar önceki çalışmalarda gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ve nümerik analiz sonuçlarına göre çatlak yoğunluğunun artmasının doğrudan malzemenin dayanımında bir azalmaya sebep olduğunu ve bu azalmanın ise çekme dayanımında çok daha fazla olduğunu ortaya koymuşlardır. Tane boyu dağılımından bağımsız olarak porozitenin artmasının sıkışma ve çekme dayanımında doğrudan bir düşmeye neden olduğunun belirtildiği çalışmada sıkışma dayanımının çekme dayanımına göre artan porozite ile birlikte çok daha hızlı bir düşüş olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Schöpfer vd (2009) tarafından yapılan çalışma nümerik uygulama açısından son derece başarılı olmasına karşın doğrudan laboratuvar deneyleri ile desteklenmediği için karşılaştırma ve nümerik modellerin başarısı hakkında bir fikir vermemektedir. Porozitedeki değişimin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki beklenen etkileri bu çalışmada nümerik olarak ortaya konulmuştur. Ancak kaya malzemesinin doğal koşullarının yansıtacak şekilde daha spesifik ve kompleks modeller oluşturulmaması çalışmanın eksik yanı olarak öne çıkmaktadır.

Cheng (2011) yeraltı kazılarında ciddi hasarların meydana gelmesine sebep olan kaya patlamalarında kaya malzemesinin homojenitesinin etkisini gerçekçi yenilme analizi yöntemini (RFPA) kullanarak nümerik olarak yaptığı çalışma ile araştırmıştır. Literatürde yer alan deney sonuçlarının kullanıldığı çalışmada oluşturulan modellerin homojenite indeksi değerleri 1,1, 5 ve 10 alınmış, bununla birlikte akustik emisyon ölçümü de nümerik olarak yapılmıştır. Araştırmacı yapmış olduğu çalışma sonucunda kaya malzemesinin homojenite indeksinin yüksek olduğu durumda kaya patlamasının meydana gelme olasılığının daha yüksek olduğu ve akustik emisyon verilerinin hızlı bir şekilde alındığını belirtip söz konusu bu enerji boşalımının heterojen malzemelerde daha düşük olduğunu belirtmiştir. Yapılan çalışma doğrudan boşluk geometrisi ile ilgili olmamasına rağmen özellikle malzemenin homojenliği ile ilişkili ve kaya patlamasının da malzeme yenilmesinin bir diğer türü olması nedeniyle boşluk geometrisi ile ilgili çalışmalarda kullanılabilir.

Wang vd. (2012) kayaların homojenite indeksi (m) ve yanal basınç değişiminin dairesel şekilde inşa edilen tünellerdeki yenilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Berea kumtaşından örnekleme yapılarak 40 x 100 mm boyutlarında oluşturulan model deney sistemlerini kullanarak araştırmışlardır. 1,1 ile 10 arasında değişen homojenite indeksi ve 3 ile 11 MPa arasında değişen yanal basınç değerleri arasında yapılan laboratuvar deneylerinin yine aynı şekilde PFC2D (Particle Flow Code) ve RFPA2D (Rock Failure Process Analysis Code) yazılımları kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kayanın heterojen bir yapıda olmasının yenilmenin gerçekleşebilmesi için uygulanması gereken yükü artmasına neden olduğunu ve bu tür

malzemelerdeki yenilme davranışının daha kompleks bir yapıda olduklarını belirtilmiş olup, düşük yanal basınç değerlerinde yenilme davranışının çekme çatlaklarının, yüksek yanal basınç değerlerinde ise makaslama çatlaklarının kontrolünde olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada sadece bir örnek üzerinde deney yapılması ve farklı boyutlardaki açıklıkların etkisi üzerinde yoğunlaşılması nedeniyle genel değerlendirilmelerde kullanılması uygun olmamaktadır.

Wang vd. (2013) daha önceden yapılmış olan laboratuvar deneyler sonuçlarından faydalanarak statik koşullar altında farklı gerilme alanı katsayısı değerleri (0, 0,19 ve 0,24) ile dinamik koşullar altındaki koşulları içeren nümerik modeller oluşturmuşlardır. Araştırmacılar bu modelleri kullanarak bir ve birden fazla sayıdaki boşluk kaynaklı olarak meydana gelen kırık oluşumuna ve gelişimine yönelik olarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Statik koşullar altında gerçekleştirilen deneylerde 500 x 500 mm boyutlarında, 40000 parçacık içerecek şekilde hazırlanan 4 farklı modelin merkezinde 80 mm çapında bir ve 0°, 30°, 60°, 90° açı dağılımına uyacak şekilde birden fazla açıklıklar oluşturulmuş ve deneyler nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik koşullar altındaki deneyler ise 500 x 1000 mm boyutlarında, 80000 parçacık içerecek şekilde hazırlanan 2 farklı model üzerinde aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Araştırmacıların yapmış olduğu nümerik analizler sonucunda tek açıklığın bulunduğu statik yükleme koşullarında ilk olarak birincil çatlak açıklıklarının tavan kısmında oluştuğu belirtilmiştir. Birincil çatlaklarının oluşumunun sonrasında ise bağımsız çatlakların, en son olarak ise makaslama çatlaklarının sıkışma gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerde oluştuğu gözlenmiştir. Bununla birlikte yatay gerilim katsayısının düşük olduğu durumlarda çekme çatlaklarının, yüksek olduğu durumlarda ise makaslama çatlaklarının daha yoğun bir şekilde meydana geldiği belirtilmiştir. Araştırmacılar oluşturdukları modellerde sadece 80 mm çapındaki bir ve birden fazla açıklıktan kaynaklı olarak meydana gelen çatlak oluşumuna ilişkin değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Yapılan bu çalışmada farklı çaptaki açıklıklara ilişkin olarak herhangi bir değerlendirme yapılmaması çatlak oluşumundaki ölçek etkisinin yansıtılamamasına neden olmuştur. Buna rağmen yapılan nümerik analizler çalışmada elde edilen laboratuvar verilerinin sonuçlarının nümerik yöntemler ile de elde edilebilmesi açısından önemlidir.

Wang vd. (2014) kaya malzemesinin doğal olarak içerdiği çatlakların, çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesi üzerindeki etkisini üç boyutlu model oluşturarak nümerik olarak incelemiştir. Araştırmacı nümerik yaklaşımla elde ettiği sonuçları doğrulamak için diğer araştırmacıların yapmış laboratuvar deneylerinden elde ettikleri verileri kullanmıştır. Araştırmacılar nümerik çalışmalar için sağlam kayayı, farklı açılarda çatlak içeren modeller olmak üzere 50 x 100 mm boyutlarında ve

homojenite indeksi 0,6 ile 5,0 arasında değişen üç farklı temel model oluşturarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca nümerik analizler sonucunda sağlam kaya malzemesinde beklendiği üzere yenilmenin makaslama yenilmesinin kontrolünde, tek eksenli sıkışma dayanımının ise çatlak açısının 45° olduğu durumda en yüksek ve homojenite indeksinin artması ile birlikte malzeme dayanımının arttığı belirtilmiştir. Çalışmada çatlak ilerlemesi ve birleşmesinin çatlak yönelimi, kalınlığı, derinliği, sürtünme ve kayma parametreleri ve malzemesinin heterojen olup olmaması ile doğrudan ilgili olduğu da ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların doğrudan yapmış olduğu laboratuvar deneyleri ile benzer sonuçlar vermiş olup özellikle çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşimine yönelik olarak üç boyutlu nümerik çalışmalar içermesi nedeniyle önemlidir.

Yang vd. (2014), ayırık elemanlar yöntemini ve PFC2D (Particle Flow Code) yazılımını kullanarak birbirine paralel olmayan iki fisür içeren, porozitesi %8,8 olan kumtaşı örneklerinin tek eksenli yükleme koşullarında nükleer atıkların depolanması ve derin yeraltı yapılarının tasarımında kullanılabilmesi amacıyla çatlak birleşimi üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma için sağlam kaya malzemesinden elde ettikleri deney sonuçlarını kullanarak nümerik analizlerde kullanılmak üzere 26243 dairesel tanecikten, 68684 dairesel tanecikler arası temas noktasından, 52435 paralel bağdan oluşan ve tane boyu 0,30 mm ile 0,45 mm arasında değişen, 80 x 160 mm boyutlarında 2400 kg/m^3 yoğunluğa sahip olan model oluşturmuşlardır. Kumtaşı içinde yer alan iki fisürden tavan bloğuna yakın olanının açısı sabit tutulup, diğerinin açısının 0° ile 180° arasında değiştirildiği çalışmada deneysel (Yang vd., 2013) ve nümerik sonuçlar birbirleri ile detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Nümerik çalışmalar ile elde edilen verilere göre fisür açısının 90° olduğu durumda en yüksek dayanım değeri elde edilmiştir. Fisüre bağlı çatlak oluşumunun, yönelimi ve birleşimin doğrudan fisür açısı ile ilişkili olduğu belirterek tüm testlerde çatlak oluşumunun en yüksek dayanım değerine ulaşıldığında meydana geldiği belirten araştırmacılar çekme çatlaklarının ise buna bağlı olarak katlanarak arttığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışma, bağlı parçacık modelinin laboratuvar sonuçlarından elde edilen verileri nümerik olarak modellenebilmesi ve sonuçların doğrulanabilmesine yönelik önemli bir çalışmadır.

Chen ve Liu (2015) tarafından iki adet çentik barındıran kaya malzemelerinde bu çentiklere bağlı olarak gelişen çatlak yönelimi ve birleşimi tek eksenli sıkışma koşullarında nümerik olarak araştırılmışlardır. Araştırmacılar çatlak mekanizmasına yönelik farklı yönelim açılarında farklı modeller oluşturarak nümerik çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Tüm modeller eş homojenite

değerlerinde, 10 mm çentik uzunluğunda oluşturmıştır. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda araştırmacılar tarafından çentik yöneliminin 30° 60° olduğu durumlarda ikincil çatlaklar nispeten daha az, 0° , 15° , 75° ve 90° olduğu durumlarda ise daha fazla meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte tek eksenli sıkışma koşullarında çekme gerilmelerinin genellikle çentiklerin uç kısımlarında yoğunlaştığı ve çatlak yöneliminin de yükleme yönüne doğru devam ettiği de Chen ve Liu (2015) tarafından belirtilmiştir.

Karampinos vd. (2015) maden çalışmalarında açılan yeraltı galerilerinde yüksek miktardaki gerilme nedeniyle zaman zaman meydana gelen, büyük miktarda can ve mal kaybına neden olan yapraksı dokunun görüldüğü metamorfik ve ince tabakalı sedimanter kayalarda meydana gelen kavlaklanma mekanizmasını ayırık elemanlar yöntemini temel alarak nümerik olarak iki boyutlu modeller aracılığı ile araştırmışlardır. Araştırmacılar arazi koşullarında meydana gelen kavlaklanma davranışını ilgili kaya birimlerinin mikro mekanik parametrelerini de kullanarak nümerik olarak modelleyerek benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Özellikle tabakalı ve yapraksı yapıdaki jeolojik birimlerden kaynaklı olan kavlaklanma davranışının nümerik olarak ayırık elemanlar metodu ile en iyi şekilde modellenilebileceğini belirten araştırmacılar bu yöntemin tünel destek sistemlerinin seçiminde de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Yang vd. (2015) tarafından yapısal fisür ve boşluk içeren kırılğan kaya malzemelerinin yenilme davranışları üzerinde bu yapısal kusurların etkisinin nümerik olarak değerlendirilebilmesi amacıyla yedi farklı açıdaki fisürlere ve iki adet fisür açısına sahip örnekler üzerinde diğer araştırmacıların (Shen, 1995; Wang vd, 2012; Yang vd, 2012; Yang vd, 2014) yapmış olduğu çalışmalardaki deney sonuçlarını da kullanarak nümerik yöntemlerle 80×160 mm boyutlarında iki boyutlu örnekler oluşturularak, $0,0032$ mm/step hızında ve 0 ile 30 MPa arasında değişen hücre basınçlarında düşey yönde yükleme yaparak elde edilen sonuçları kullanarak incelemişlerdir.

Zhou ve Bi (2016) tarafından genel tanecik dinamiği adı verilen nümerik bir yöntem aracılığı ile kaya benzeri malzemelerde yapısal kusurların oluşumu ve gelişimi ile ilgili olan bir çalışma yapılmıştır. Oluşturulan modellerde üzerinde bulunan çentiklerden kaynaklı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında yeni çentiklerin ve çatlakların oluşumu araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametre dışında örnek boyutu, çentikler arası uzaklık ve çentik türü bir takım parametrelerin etkisi de ayrıca değerlendirilmiştir. Araştırmacılar tarafından oluşturulan modellerde tek eksenli sıkışma dayanımına etki eden en önemli parametre olarak çentikler arası

mesafe öne çıkmıştır. Oluşturulan modellerde çentikler arasındaki mesafenin en uzak olduğu durumda dayanım değeri en yüksek elde edilmiştir.

Zhu (2017) tarafından yapılan çalışmada mekanik ve termodinamik yasalarını temel alan üç aşamalı bir mikro-mekanik model geliştirilmiştir. Bu modelde kaya üç aşamalı kompozit bir yapı olarak değerlendirilmiş ve poroziteye sahip olmayan bir kaya malzemesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kaya malzemesine boşluklar ve çatlaklar açılarak tek ve üç eksenli yükleme koşullarında deneyler gerçekleştirilerek elde edilen veriler laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacı tarafından önerilen model kullanılarak oluşturulan ve kaya malzemesini temsil eden model üzerinde yapılan deneylerden elde edilen verilerin laboratuvar verileri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Zhu vd. (2018), kayaların iç yapılarının belirlenmesi ve tanımlanmasındaki zorluktan hareket ederek yenilme sırasında meydana gelen kırılma ve çatlak oluşumuna yönelik olarak 3D modelleme ve yazıcı teknolojilerinden de faydalanarak bir araştırma yapmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda volkanik kayalardan örnekleme yaparak iki ve üç boyutlu tarama teknikleri ile görseller ve üç boyutlu yazıcılar aracılığı ile de yapısal unsurları benzer kaya türü malzemeler üretmişlerdir. Çalışmanın sonraki aşamasında ise doğal örnekler, modeller ve üç boyutlu yazıcılar ile üretilen modeller üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı ve Brazillian çekme deneyleri yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucu laboratuvar deneyleri ve nümerik deneylerden elde edilen verilerin uyumlu olduğunu, üç boyutlu yazıcı ile üretilen modellerden de elde sonuçların güvenilirliğinin kanıtlandığını belirtmişlerdir.

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI ve ÖRNEKLEME ALANLARININ TANITILMASI

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan blok boyutundaki örneklerin doğal olarak oluşmuş boşluklar içermesine ve bu boşlukların dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi amacıyla geometrik özellikleri ile birlikte yoğunluklarının farklı olmasına dikkat edilmiştir. Tez çalışmasının amacı ile uyumlu olması ve değerlendirme aşamasında kontrol parametrelerinin de azaltılabilmesi ve daha sağlıklı yorumların yapılabilmesi amacıyla da farklı boşluk geometrisi ve yoğunluğu gösteren blokların aynı birimlerden alınmasına da ayrıca özen gösterilmiştir. Bu sayede boşluk geometrisi ve yoğunluğu ile ilgili olarak geçişin ve değişimin gözlemlendiği kaya birimlerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin daha doğru bir yaklaşımla değerlendirilmesine çalışılmıştır. Arazi ve örnekleme çalışmaları gerçekleştirilmeden önce boşluklu yapının yoğun olarak görüldüğü sedimanter ve magmatik birimlerin Türkiye genelinde yüzeylendiği bölgeler incelenerek, literatürde yer alan bilgiler de göz önüne alınarak Kütahya, Manisa ve Van'da 4 farklı örnekleme lokasyonundan 12 adet blok boyutunda örnek alınmıştır (Şekil 3.1). Alınan blok boyutundaki örneklerin boşluk özelliklerinin tez çalışmasının ana amaçlarından olmasından dolayı ayrı bir şekilde detaylı olarak tanımlanmasına karar verilmiştir. Blokların ve bloklardan çıkarılan karot örneklerle ilişkin detaylı tanımlamalar Bölüm 4'te, arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlara ilişkin bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlar.

Çizelge 3.1. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlar.

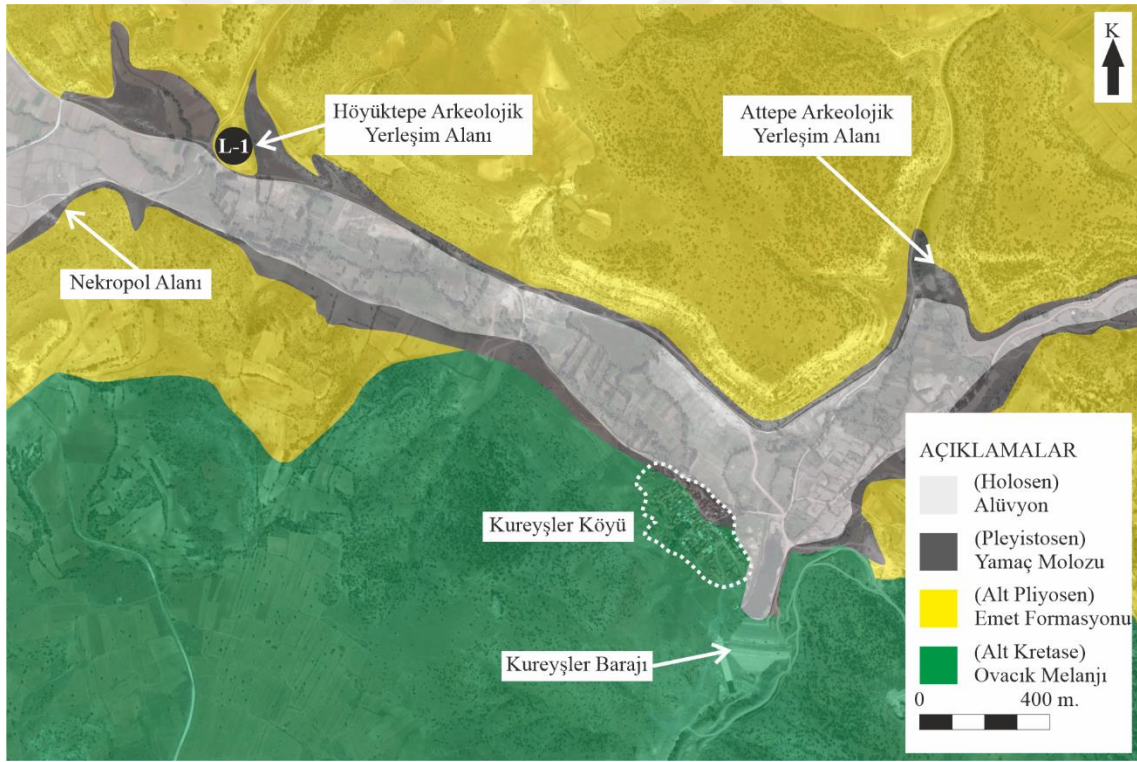
Lokasyon	Lokasyon Adı	Blok Sayısı
L-1	Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları (Kütahya)	2
L-2	Kula Volkanik Jeoparkı (Manisa)	4
L-3	Köşk bölgesi (Van)	2
L-4	Naşa bölgesi (Kütahya)	4

Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonlara ait coğrafik ve jeolojik özellikler alt başlıklar halinde ayrı olarak verilmiştir. Lokasyonlara ait coğrafik ve jeolojik özellikler verilirken bu bölgelerde daha önce gerçekleştirilmiş araştırma ve projelere ilişkin raporlar, tez çalışmaları, konferans ve sempozyum bildirileri ile birlikte makaleler incelenmiş ve bu kaynaklardan elde edilen bilgiler arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında doğrulanmıştır. Bununla birlikte özellikle arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği lokasyonların genel olarak jeolojik yapılarının karmaşık bir yapıda olması, bu tez çalışmasının amacının lokasyonların jeolojik özelliklerinin ortaya konulması olmaması nedeniyle sadeleştirilmiş bir şekilde genel hatlarıyla birlikte verilmiştir. Alınan blok örneklerin tanımlamalarının tam olarak yapılabilmesi ve kaya türlerine karar verilebilmesi için ise her blok örneğine ait olacak şekilde mineralojik ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiş olup bunların sonuçları ise detaylı olarak Bölüm 5’te verilmiştir.

3.1. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanlarının (Kütahya) Jeolojisi

Kütahya şehir merkezinin yaklaşık olarak 18 km güneybatısında bulunan Kureyşler köyü’nün yakınına inşa edilen Kütahya Aslanapa Kureyşler Barajı ve Sulaması Projesi nedeniyle sular altında kalan Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanlarının olduğu bölgelerde gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları ile boşluk özellikleri değişkenlik gösteren 2 adet blok boyutunda örnek alınmıştır (Şekil 3.2). Arazi ve örnekleme çalışmaları bu alan sınırları içinde bulunan Höyüktepe olarak adlandırılan eski yerleşim bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Kütahya, Ege Bölgesinin İç Batı Anadolu Bölümü’nde yer alan ve yakın çevresinde Paleozoyik (542.0 my - 251.0 my), Mesozoyik (251.0 my - 65.5 my) ve Senozoyik (65.5 my - günümüz) jeolojik dönemlerine ait kaya birimlerinin bulunduğu bir yerleşim bölgesidir. Bölge genelinde taban kayaları oluşturan ve en yaşlı birimler olan şist ve mermerler özellikle Yellice Dağı ile birlikte örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları’nın bulunduğu bölgede de geniş bir yayılım göstermektedir. Şist ve mermerlerden oluşan bu taban kayaları ise tektonik dokanakla uyumsuz olarak ofiyolitik birimler üzerlemektedir. Bu ofiyolitik birimlerin üzerinde ise göl ve akarsu ürünleri olarak

tanımlanan ve volkanik malzeme ve birimler ile girintili bir şekilde bulunan, kırıntılı ve karbonatlı kalın bir örtü tabakası yer almaktadır (Özburan, 2009). Bölgede gözlenen en genç birim ise alüvyon çökelleri olup bölgedeki akarsuların yataklarında yer almaktadır. Kütahya yerleşim alanı ve çevresindeki jeolojik birimler yer yer kuzeydoğu-güneybatı ve kuzeydoğu-güneydoğu şeklinde iki farklı doğrultuda ve devamlılığı olan faylar tarafından kesilmiştir. Bölgede yer alan ve Kütahya Fay Zonu (KFZ) olarak adlandırılan fay sistemleri özellikle Miyosen (23.0 - 25.0 my) ve Kuvaterner (1.80 my - günümüz) yaşlarında havzaların oluşum mekanizmalarını kontrol eden başlıca etkenlerdir (Özburan, 2009). Arazi ve örnekleme çalışmaları ile bu bölgeden alınan bloklarda çapı 1 cm'den küçük olan erime boşlukları yaygın olarak görülmektedir. Bu küçük erime boşluklarının yanı sıra kanal veya çentik şeklinde olan boşluk türü yapısal unsurlar da kısmen de olsa gözlenmektedir.

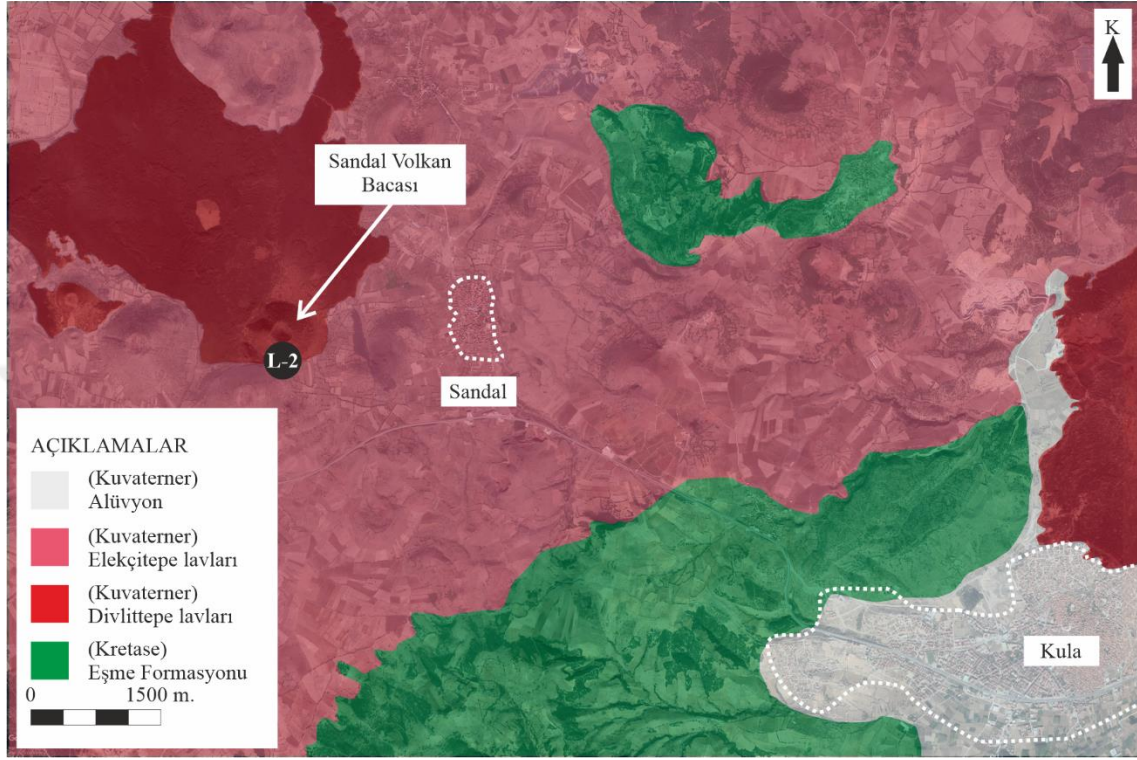


Şekil 3.2. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları'na (Merkez-Kütahya) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Ergüler vd., 2015'ten sadeleştirilmiştir).

3.2. Kula Volkanik Jeoparkı'nın (Manisa) Jeolojisi

Manisa'nın Kula ilçesinde bulunan Kula Volkanik Jeoparkı ve çevresinde gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları ile boşluk özellikleri bakımından farklı özellikler gösteren 4 adet blok

boyutunda örnek alınmıştır (Şekil 3.3). Arazi ve örnekleme alanı ise Kula ilçe merkezinin kuzeybatısı ile kuzeyi arasında geniş bir yayılım gösteren volkan bacalarından ilçe merkezinin yaklaşık olarak 8-10 km kuzeybatısında yayılım gösteren Sandal volkan bacası ve yakın çevresinde gerçekleştirilmiştir. Kula, Afyonkarahisar-İzmir karayolu üzerinde bulunan ve Manisa'ya bağlı olan ve yoğun volkanik birimlerin gözlendiği bir yerleşim bölgesidir. Kula ve yakın çevresi hem yoğun tektonik aktivite hem de bu yoğun tektonik aktiviteye bağlı olarak meydana gelen volkanizmanın da etkisiyle çok zengin ve karmaşık bir jeolojik yapıya sahiptir. Geçmişten beri bölgede yoğun bir şekilde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda bölgede birçok birim adlandırılmış ve yine bölgedeki volkanizmanın birden fazla defa gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Ercan ve Öztunalı (1982) tarafından yapılan çalışmada bölgede farklı zamanlara ait aralıklı olarak üç ayrı evrede volkanizmanın aktif olduğu belirtilmiştir. Kula ve çevresindeki jeolojik birimlerinin tabanını oluşturan en yaşlı birimler Menderes Masifi'ne ait olan metamorfik (şist ve gnays) ve bunlara bağlı olarak türeyen granitik kayalardır. Bu kayalar bölgede de geniş bir şekilde yayılım gösteren Eşme ve Güneyköyü formasyonuna aittir (Broan vd, 1982). Taban kayaları oluşturan bu metamorfik ve granitik kayalar ise Mezosoyik yaşlı olan kireçtaşı ve mermer türü birimler tarafından üzerlenmektedir. Bölgedeki en genç birimleri ise volkanizma ürünleri ile birlikte alüvyonlar oluşturmaktadır. Bölgedeki volkanizmanın farklı zamanlarda gerçekleşmesi nedeniyle bazı volkanik ürünler günce alüvyal birimler tarafından ince bir tabaka halinde üzerlenmiştir. Alüvyal birimler tarafından üzerlenen bu bölgelerde de yoğun bir şekilde tarım alanları oluşturulmuş ya da yoğun bir bitki örtüsü gözlenmektedir. Arazi ve örnekleme çalışmaları ise bu güncel volkanizma ürünlerinden herhangi bir alüvyal birim tarafından üzerlenmemiş olanlarından blok boyutunda örnekler alınarak gerçekleştirilmiştir. Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan 4 blokta gözlenen yapısal özelliklerinin mümkün olduğunca birbirinden farklı olmasına dikkat edilmiştir.

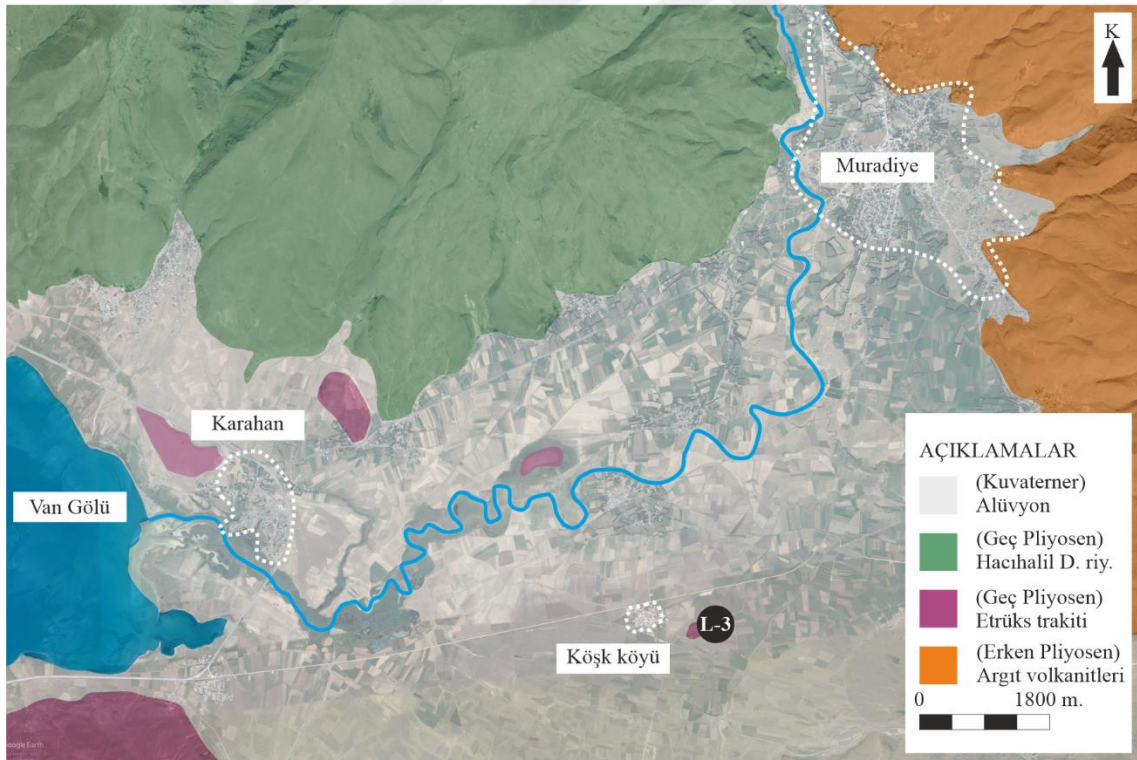


Şekil 3.3. Kula Volkanik Jeoparkı'na (Kula-Manisa) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Broan vd., 1983'den sadeleştirilmiştir).

3.3. Köşk Bölgesinin (Van) Jeolojisi

Van'ın Muradiye ilçesinin 7 km güneybatısında bulunan Köşk Mahallesi çevresinde gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları ile boşluk özellikleri kendi içinde benzerlik gösteren 2 adet blok boyutunda örnek alınmıştır (Şekil 3.4). Arazi ve örnekleme çalışmaları Köşk Mahallesi'nin hemen doğusunda yer alan bölge halkı tarafından "Kıre" olarak isimlendirilen tepede bulunan volkanik kayalarda gerçekleştirilmiştir. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği birimler bölgede gözlenen volkanik birimlerin kökenini oluşturan Etrüks volkanı ve çevresi son derece karmaşık bir jeolojik yapıya sahiptir. Köşk Mahallesi ve çevresinde farklı yaşlarda volkanizma ürünleri ile birlikte alüvyal birimlerde geniş bir şekilde yayılım göstermektedir. Şekil 3.4.'te verilen örnekleme ve jeoloji haritasında bölgenin doğu ve kuzeydoğu bölgesi boyunca yayılım gösteren Argıt volkanitleri, Ağırkaya İgnimbiriti olarak adlandırılan ve geç Miyosen yaşlı (5.52 my) ignimbirit ve pomzalardan oluşmaktadır. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği ve Köşk Mahallesi'nin güneybatı bölgesinde geniş bir yayılım gösteren Etrüks volkanitlerine ait olan, trakit

ağırlıklı kayalardan oluşan, Ağırkaya İgnimbiritlerini örten Etrüks trakiti Erken Pliyosen (4.26 - 4.21 my) yaşlı birimlerden oluşmaktadır. Etrüks volkanının güneydoğu yamacı boyunca yüzeylenen Hacıhalil dağı riyliti ise Erken Pliyosen (3.60 my) yaşlı olup örnekleme alanı içinde alüvyal birimler hariç en genç birimdir (Oyan, 2011). Tanımlaması yapılan üç farklı volkanik birimi Muradiye ilçesinin kuzeyinden gelen Köşk bölgesinin de bulunduğu ovaya alüvyal malzeme taşıyarak ve Van gölüne dökülerek diğer birimlerin uyumsuz olarak yüzeylenmesine neden olan Bendimahi çayının getirdiği güncel malzemeler oluşturmaktadır. Köşk bölgesi ve çevresinde gerçekleştirilen arazi çalışmaları sırasında alınan bloklardan boşluk özellikleri açısından birbirinden tamamen farklı özellikler göstermektedir. Bununla birlikte her iki blokta da mikro olarak tanımlanabilecek çapı 0.1-0.2 mm'den küçük boşluklar çok yoğun olarak bulunmaktadır.

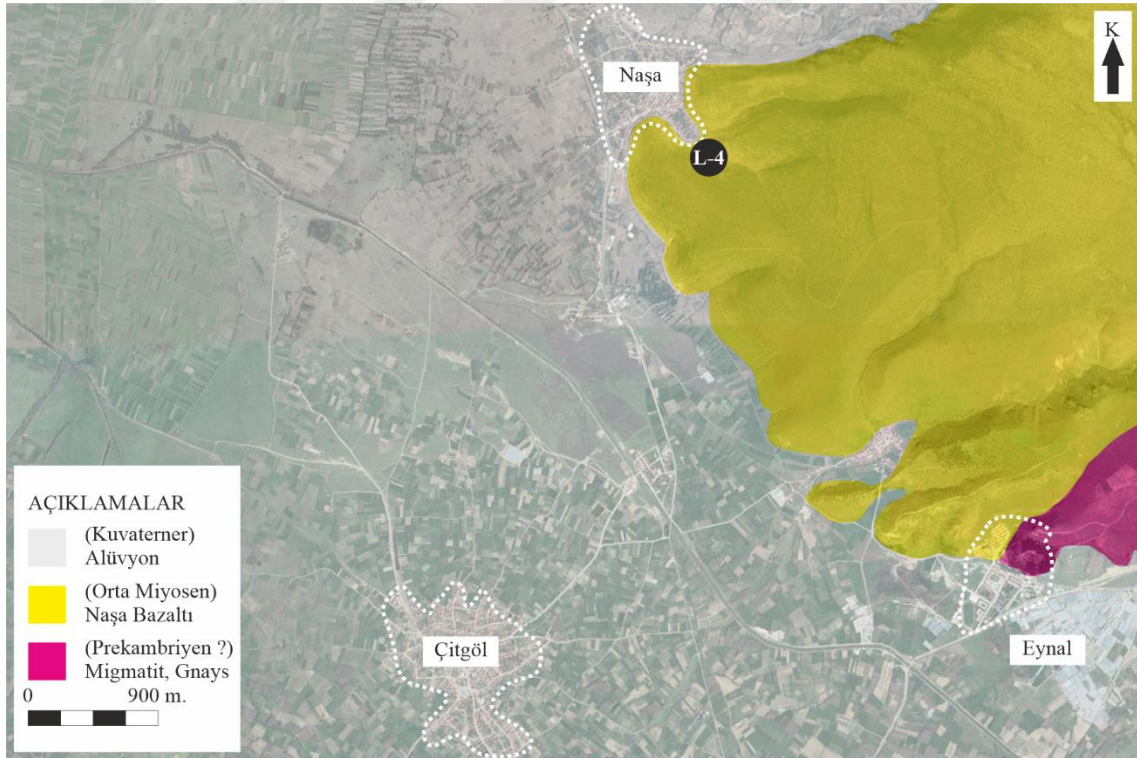


Şekil 3.4. Köşk bölgesine (Muradiye-Van) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Oyan, 2011'den sadeleştirilmiştir).

3.4. Naşa Bölgesinin (Kütahya) Jeolojisi

Kütahya'nın Simav ilçesinin yaklaşık olarak 9 km kuzeyinde bulunan Naşa bölgesi ve çevresinde gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmalarında boşluk özellikleri birbiri ile farklı olan,

boşluksuz yapıdan boşluklu yapıya geçişin gözlemlendiği 4 farklı blok alınmıştır (Şekil 3.5). Arazi ve örnekleme çalışmaları Naşa bölgesinin güneybatısında bulunan ve literatürde de Naşa bazaltı olarak bilinen jeolojik birimlerin yüzeylendiği bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Naşa bölgesi ve çevresi Akşehir-Simav Fay Sistemi denetiminde gelişmiş olan Simav Grabeni içinde bulunmaktadır. Simav Grabeni'nin kuzey ucu ise arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği Naşa bölgesi ve çevresinde gözlenen Naşa Fay Zonu tarafından sınırlandırılmıştır. Bölgedeki en yaşlı birimler ise Prekambriyen yaşlı olan ve Menderes Masifi'nin çekirdeğini oluşturan gnays ve migmatitlerden oluşmaktadır. Bölgedeki en genç volkanik ürünler olan ve Orta Miyosen yaşlı Naşa bazaltlarıdır. Arazi ve örnekleme çalışmalarının gerçekleştirildiği tüm birimler ise güncel alüvyal çökeller tarafından uyumsuz olarak üzerlenmektedir. Naşa bazaltlarında oluşum koşullarına bağlı olarak yoğun gaz boşlukları görülmektedir (Akdeniz ve Konak, 1979; Konak, 1982; Karakuş vd., 2017). Bu nedenle, arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan blok boyutundaki örneklerde farklı boşluk özellikleri elde edilebilmiştir.



Şekil 3.5. Naşa bölgesine (Simav-Kütahya) ait örnekleme noktası ve bölgenin jeolojisi (Akdeniz ve Konak, 1979; Konak, 1982; Karakuş vd., 2017'den sadeleştirilmiştir).

4. ÖRNEKLERİN BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN TANIMLANMASI

Tez çalışmasının amacının boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması olması dikkate alınarak her blok ve karot örnek için boşluk özelliklerinin tanımlanmasına ilişkin olarak yapılan çalışmaların ayrı bir bölüm halinde sunulmasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan ve farklı yapıda olan bloklar her lokasyon için ayrı ayrı numaralandırılmış ve karot alma işlemleri de bu sistematığe uygun olarak yapılmıştır. Bu amaca uygun olarak gruplandırılan bloklar ve bu bloklardan çıkarılan karot örneklerle ilişkin bilgiler detaylı olarak Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Çizelge 4.1.'de boşluk geometrisi ve yoğunluğu bakımından farklı özellikler gösteren bloklar ve yine bu bloklardan alınan karot örneklerin her biri blok numarası ile uyumlu olacak şekilde isimlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. Arazi ve örnekleme çalışmaları ile alınan bloklar ve karot örneklerle ilişkin bilgiler.

Lokasyon	Blok Numarası	Örnek Numarası	Yapılan Deney
L-1	1. Blok	H-1, H-2, H-3	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		H-11, H-12, H-13	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	2. Blok	H-23, H-25, H-26	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		H-31, H-32, H-33	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
L-2	1. Blok	K-1, K-3	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		K-7, K-8, K-9	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	2. Blok	K-20, K-21, K-22	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		K-25, K-26	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	3. Blok	K-30, K-31, K-32	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		K-47	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
	4. Blok	K-42, K-43, K-44, K-49	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
L-3	1. Blok	BE-1, BE-2, BE-3, BE-4, BE-5	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		BE-10, BE-11, BE-12	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	2. Blok	BE-20, BE-21, BE-22, BE-23, BE-24	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		BE-25, BE-26, BE-27	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
L-4	1. Blok	N-1, N-2, N-3, N-4, N-5	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		N-6, N-7, N-8	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	2. Blok	N-20, N-21, N-22, N-23, N-24	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		N-25, N-26, N-27	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	3. Blok	N-30, N-31, N-32	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		N-33, N-34, N-35	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı
	4. Blok	N-40	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
		N-42, N-43, N-44	Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı

Boşluklu kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde boşluk özelliklerinin etkisinin tam olarak ortaya konulabilmesi için bilgisayarlı tomografi tarama (Computed tomography scan / CT-Scan), görünür gözeneklilik deneyi, karot yüzeyi tarama yöntemi ve görgül boşluk hacmi yaklaşımı olmak üzere 4 farklı yöntem kullanılmıştır. Arazi ve örnekleme çalışmaları

sırasında alınan bloklardan karot örneklerin çıkarılması ve örneklerin deney standartlarına uygun hale getirilmesi ile birlikte fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarına ilişkin bilgiler ise Bölüm-5’te verilmiştir.

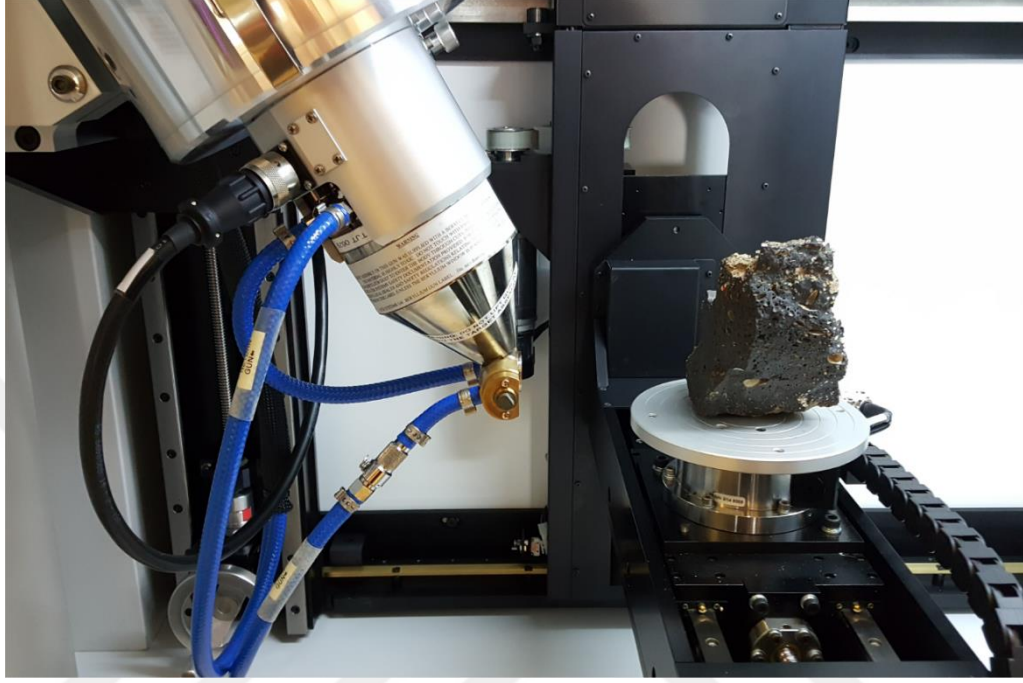
4.1. Bilgisayarlı Tomografi Tarama (CT-Scan)

Boşluklu kaya malzemeleri doğal özelliklerinin bir gereği hem bağlantılı hem de bağlantısız boşluklar içerebilirler. Bu nedenle laboratuvar çalışmaları sırasında bloklardan çıkarılan karot örneklerin içinde gözle görülmesi mümkün olmayan boşluklar bulunabilir. Boşluklu kaya malzemelerinin karmaşık boşluklu yapıları dikkate alındığında, örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde boşluk özelliklerinin etkisi ile ilgili olarak yapılan değerlendirmelerde kaya malzemesinin gözle görülemeyen bölümlerindeki boşlukların dikkate alınmaması veya boşlukların tam olarak belirlenmemesi değerlendirme sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karotların boşluk özelliklerinin tam olarak ortaya konulabilmesi için başta tıp olmak üzere birçok disiplinde malzeme özelliklerinin tanımlanması amacıyla faydalanılan bilgisayarlı tomografi tarama (Computed tomography scan - CT-Scan) yönteminin kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla İstanbul merkezli bir firma ile irtibat kurularak Lokasyon-3’ten (Muradiye-Van) alınan blok örneklerin taze ve bozunmamış yüzeylerine ait olan bir adet makro örneğin tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemi sırasında Nikon XT H 225 model tarama cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.1). Nikon XT G 225 model tarama cihaz, 225 kV gücünde X-ray kaynağı ve 360° hareket kabiliyetine sahip olan robotik hareket düzeni kullanılarak örneğin tamamının taranması sağlanmıştır (Şekil 4.2). Makro örnek üzerinde yapılan ve yaklaşık 60 dakika süren tarama işlemi sonucunda, elde edilen veriler kullanılarak örneğin katı modeli (voksel) oluşturulmuş, “*Volume Graphics*” yazılımı ile analiz ve raporlama işlemleri yapılmış, farklı eksenlere ait alan resimleri ve bu alanlara ilişkin istatistiksel veriler üretilmiştir (Şekil 4.3). Makro örnek üzerinde yapılan tarama işlemleri sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi aşamasında boşluk çapı 0,1 mm’den küçük olan boşlukların ihmal edilmesi ve bunların doğal gözenekler olarak kabul edilmesi uygun görülmüştür. Makro örnekte çapı 0,1 mm’den büyük olan 49600 adet, 1 mm’den büyük olan ise 8645 adet boşluk belirlenmiştir (Şekil 4.4). Bilgisayarlı tomografi tarama (CT-Scan) yönteminin gelişmiş teknolojik altyapısı, ileri tarama ve görüntüleme kabiliyetleri sayesinde makro örneğin içermiş olduğu boşlukların özellikleri tam olarak eksiksiz bir şekilde belirlenmiştir (Şekil 4.5). Bilgisayarlı tomografi tarama (CT-Scan) yöntemi, tüm teknolojik üstünlüklerine rağmen yüksek maliyetli ve elde edilen verilerin

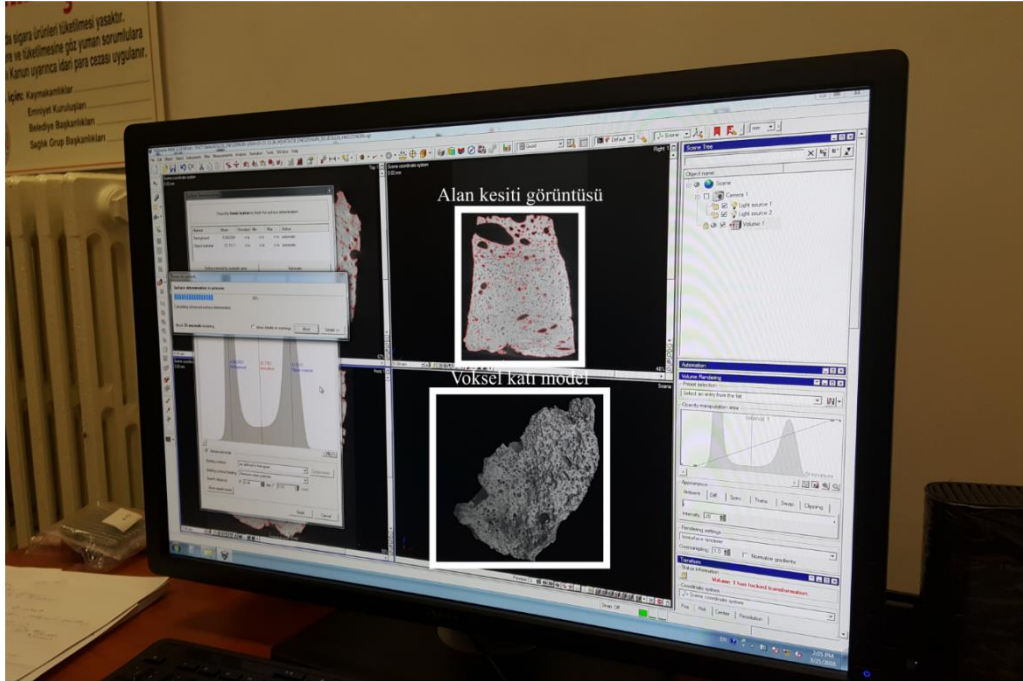
değerlendirilebilmesi için ayrı bir yazılıma ihtiyaç duyulan bir yöntemdir. Bununla birlikte tarama işlemi sonucunda elde edilen boşlukların özellikle nümerik çalışmalar sırasında oluşturulan modellere aktarılabilmesi de boşlukların sayısı ve çapları nedeniyle teknik olarak mümkün değildir. Taraması yapılan makro örnekte çapı 1 mm den büyük olan boşlukların nümerik modellere aktarılabilmesi için nümerik modeller oluşturulurken kullanılan ve kaya malzemesini temsil eden diskler (2 boyutlu) ve taneciklerin (3 boyutlu) çaplarının çok düşük değerlere indirilmesi gerekmektedir. Bu işlem de modelin kalibrasyonu için yapılması gereken iterasyon sayısının arttırarak toplam sürenin artmasına neden olmakta, yazılım ve bilgisayar donanımlarının stabil olarak çalışması imkansız hale getirmektedir. Tez çalışması kapsamında çok sayıda örnek üzerinde tarama işlemlerinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulması, açıklanan teknik kısıtlamalar, ek yazılım ihtiyacı ve bu yöntemin kullanılmasına yönelik olarak ayrılacak bir bütçenin olmaması nedeniyle karot örnekler üzerinde bu yöntem uygulanmamıştır. Bununla birlikte, bu yöntem tek bir örnek üzerinde uygulanmış olmasına rağmen kaya malzemelerinin boşluk özelliklerinin anlaşılması ve boşlukların son derece karmaşık yapılarının olabileceği ortaya konulmuştur.



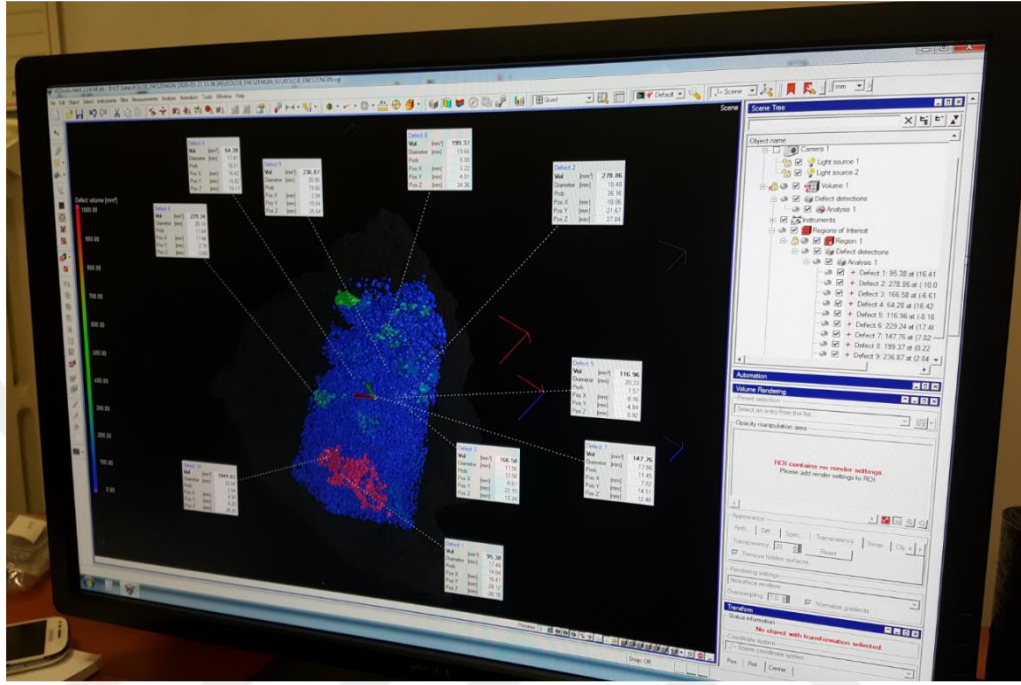
Şekil 4.1. Bilgisayarlı tomografi tarama (CT-Scan) işlemi sırasında kullanılan Nikon XT H 225 cihazının genel görünümü.



Şekil 4.2. Tarama işlemi sırasında kullanılan X-ray kaynağı ve makro örnek.



Şekil 4.3. “Volume Graphics” yazılımı kullanılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi.



Şekil 4.4. Tarama işlemi sonucunda makro örnekte belirlenen boşluklar ve bu boşluklara ilişkin sayısal bilgiler.



Şekil 4.5. Taraması yapılan makro örnek ve örneğin oluşturulan katı modeli (Voksel).

4.2. Görünür Gözeneklilik Deneyi

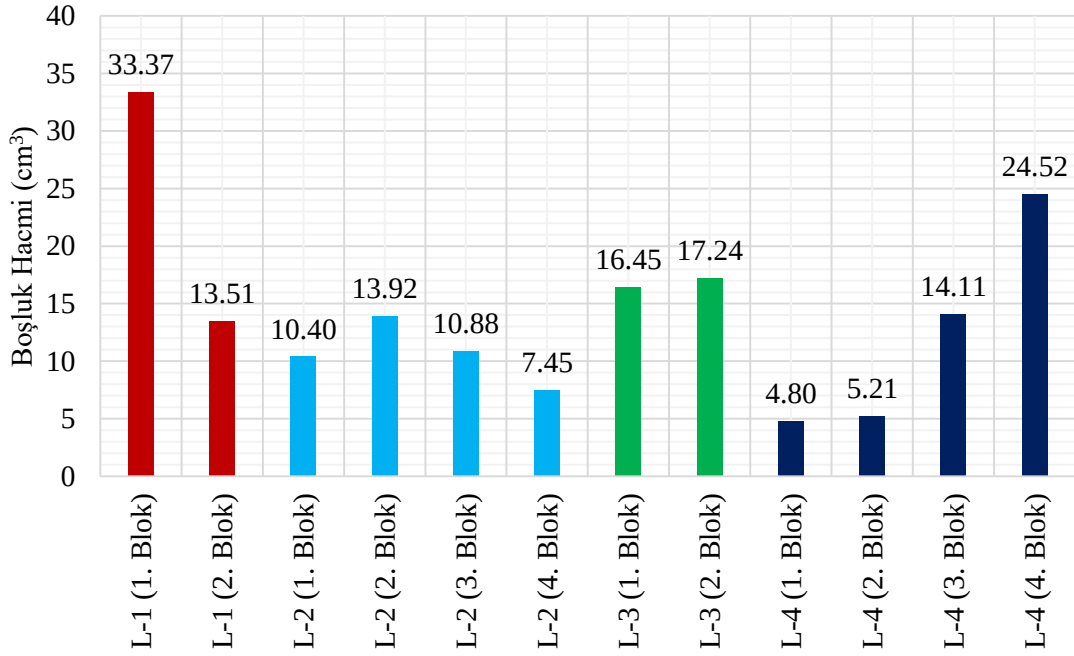
Görünür gözeneklilik deneyi, düzenli bir geometriye sahip olan kaya malzemelerinin gözenekliliğin belirlenmesi amacıyla ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem dikkate alınarak yapılmıştır. Bu yöntem şişebilen ve ıslanma-kuruma çevrimleri sonucunda dağılabilen kayalarda uygulanmamaktadır. Karot örneklerin görünür gözeneklilik değerleri belirlenmiş ve sonuçları Çizelge 4.2.'de, karot örneklerin hesaplanan boşluk hacmi değerlerinden elde edilen blokların ortalama hacim değerlerine ilişkin veriler ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Görünür gözeneklilik deneyinde karot örnekleri 24 saat saf suda bekletilerek suyun bağlantılı gözenekler ve boşluk boyunca iletilmesi sağlanmaktadır. Ancak, özellikle büyük boşluklar içerenler karot örneklerde su boşluklarda kalamayarak karot yüzeyi boyunca ortamda uzaklaşmaktadır. Bununla birlikte suyun iletimine olanak sağlayacak şekilde uygun çaptaki boşluklar bulunmasına rağmen, bu boşlukların birbirleriyle bağlantılı olmadığı durumlarda da suyun iletimi karot örneğin tamamı boyunca gerçekleşmemektedir. Bu iki durumun söz konusu olduğu karot örneklerin hesaplanan görünür gözeneklilik değerleri karot örneklerin gerçek gözeneklilik değerlerini yansıtmamaktadır.

Çizelge 4.2. Örneklerin görünür gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri.

Örnek Lokasyonu	Örnek Numarası ve Yapılan Deney	Boşluk Hacmi (cm ³)		Görünür Gözeneklilik, n (%)		Boşluk Oranı, e	
		Karot Değeri	Blok Ortalaması	Karot Değeri	Blok Ortalaması	Karot Değeri	Blok Ortalaması
L-1 (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları)	H-1 (Tek eksenli)	31,19		9,60		0,11	
	H-2 (Tek eksenli)	31,92	33,37	10,07		0,11	
	H-3 (Tek eksenli)	36,99		11,55	10,37	0,13	0,12
	H-11 (Üç eksenli)	22,42		8,88		0,10	
	H-12 (Üç eksenli)	25,76	26,39	10,08		0,11	
	H-13 (Üç eksenli)	30,99		12,06		0,14	
	H-23 (Tek eksenli)	14,04		4,40		0,05	
	H-25 (Tek eksenli)	15,61	13,51	4,86		0,05	
	H-26 (Tek eksenli)	10,89		3,42	4,33	0,04	0,05
	H-31 (Üç eksenli)	15,82		6,16		0,07	
	H-32 (Üç eksenli)	10,11	11,28	4,02		0,04	
	H-33 (Üç eksenli)	7,90		3,12		0,03	
L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı)	K-1 (Tek eksenli)	8,37	10,40	3,01		0,03	
	K-3 (Tek eksenli)	12,43		4,50		0,05	
	K-7 (Üç eksenli)	12,86		5,60	4,78	0,06	0,05
	K-8 (Üç eksenli)	10,45	12,55	4,56		0,05	
	K-9 (Üç eksenli)	14,33		6,25		0,07	
	K-20 (Tek eksenli)	14,55	13,92	5,16		0,05	
	K-21 (Tek eksenli)	15,11		5,31		0,06	
	K-22 (Tek eksenli)	12,09		4,27	4,88	0,04	0,05
	K-25 (Üç eksenli)	10,41	11,40	4,39		0,05	
	K-26 (Üç eksenli)	12,38		5,26		0,06	

Çizelge 4.2. (Devam) Örneklerin görünür gözeneklilik ve boşluk oranı değerleri.

L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı)	K-30 (Tek eksenli)	12,39		4,41		0,05	
	K-31 (Tek eksenli)	9,47	10,88	3,40	3,90	0,04	0,04
	K-32 (Tek eksenli)	10,79		3,88		0,04	
	K-42 (Üç eksenli)	9,58	7,86	4,09		0,04	
	K-43 (Üç eksenli)	6,31		2,79		0,03	
	K-44 (Üç eksenli)	7,68		3,37	3,19	0,03	0,03
	K-47 (Tek eksenli)	8,46	7,45	2,96		0,03	
L-3 (Köşk bölgesi)	K-49 (Tek eksenli)	6,44		2,75		0,03	
	BE-1 (Tek eksenli)	16,94		5,93		0,06	
	BE-2 (Tek eksenli)	15,50		5,41		0,06	
	BE-3 (Tek eksenli)	15,17	16,45	5,31		0,06	
	BE-4 (Tek eksenli)	17,59		6,15	5,43	0,07	0,06
	BE-5 (Tek eksenli)	17,04		6,02		0,06	
	BE-10 (Üç eksenli)	11,26		4,79		0,05	
	BE-11 (Üç eksenli)	12,11	11,49	5,07		0,05	
	BE-12 (Üç eksenli)	11,10		4,75		0,05	
	BE-20 (Tek eksenli)	17,40		6,10		0,06	
	BE-21 (Tek eksenli)	18,43		6,43		0,07	
	BE-22 (Tek eksenli)	17,61	17,24	6,18		0,07	
	BE-23 (Tek eksenli)	16,22		5,69	5,91	0,06	0,06
	BE-24 (Tek eksenli)	16,53		5,79		0,06	
	BE-25 (Üç eksenli)	12,91		5,48		0,06	
L-4 (Naşa bölgesi)	BE-26 (Üç eksenli)	13,88	13,43	5,88		0,06	
	BE-27 (Üç eksenli)	13,51		5,74		0,06	
	N-1 (Tek eksenli)	4,88		1,79		0,02	
	N-2 (Tek eksenli)	4,12		1,53		0,02	
	N-3 (Tek eksenli)	4,45	4,80	1,65		0,02	
	N-4 (Tek eksenli)	5,25		1,90	1,75	0,02	0,02
	N-5 (Tek eksenli)	5,30		1,94		0,02	
	N-6 (Üç eksenli)	3,73		1,63		0,02	
	N-7 (Üç eksenli)	3,60	3,95	1,64		0,02	
	N-8 (Üç eksenli)	4,51		1,95		0,02	
	N-20 (Tek eksenli)	6,66		2,39		0,02	
	N-21 (Tek eksenli)	4,64		1,68		0,02	
	N-22 (Tek eksenli)	5,33	5,21	1,91		0,02	
	N-23 (Tek eksenli)	4,72		1,68	1,84	0,02	0,02
	N-24 (Tek eksenli)	4,72		1,69		0,02	
	N-25 (Üç eksenli)	4,23		1,81		0,02	
	N-26 (Üç eksenli)	4,05	4,18	1,76		0,02	
	N-27 (Üç eksenli)	4,27		1,81		0,02	
	N-30 (Tek eksenli)	12,85		4,68		0,05	
	N-31 (Tek eksenli)	15,23	14,11	5,46		0,06	
	N-32 (Tek eksenli)	14,26		5,13	4,84	0,05	0,05
	N-33 (Üç eksenli)	11,00		4,66		0,05	
	N-34 (Üç eksenli)	11,01	10,73	4,75		0,05	
	N-35 (Üç eksenli)	10,19		4,36		0,05	
	N-40 (Tek eksenli)	24,52	1,75	9,10		0,10	
	N-42 (Üç eksenli)	21,49		9,25	8,17	0,10	0,09
	N-43 (Üç eksenli)	14,61	18,24	6,27		0,07	
	N-44 (Üç eksenli)	18,62		8,06		0,09	



Şekil 4.6. Karot örneklerin boşluk hacmi değerlerinden hesaplanan ortalama blok boşluk hacmi değerleri.

4.3. Karot Yüzeyi Tarama Yöntemi

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karot örnekler ait oldukları blokların özelliklerini yansıtmaktadır. Ancak jeolojik malzemelerin heterojen bir yapıda olmaları nedeniyle çok küçük ölçekte dahi yapısal unsurlarda farklılıklar gözlenebilmektedir. Bu nedenle boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisinin tam anlamıyla anlaşılabilmesi amacıyla ve mevcut deneysel yöntemlerin de bu ihtiyacı tam olarak karşılayamaması nedeniyle her karot örneği için ayrı ayrı boşluk özelliklerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, görünür gözeneklilik deneyinin yanı sıra karot yüzeyi tarama yönteminin de uygulanmasının yararlı olacağı düşünülmüştür.

Bu yöntem kapsamında laboratuvar deneylerinde kullanılan her örneğin dış yüzeyinin tamamı tarayıcı kullanılarak taranmıştır (Şekil 4.7). Tarama çalışmaları sonucunda elde edilen karot örneklerin dış yüzey görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılarak örnek boyutları ile uygun olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 4.8). Bilgisayar ortamına aktarılan yüzey görüntüleri üzerinde ArcMap 10.6.1. yazılımı aracılığı ile boşluklar ve boşluk olmayan yüzeylerin her biri için ayrı ayrı 25'er adet

olmak üzere toplam 50 farklı noktada yüzey tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.9). Yüzey tanımlaması yapılan noktalar daha sonra boşluklu ve boşluksuz olacak şekilde “*Image Classification → Training Sample Manager*” yöntemi kullanılarak gruplandırılmıştır (Şekil 4.10). Bu gruplandırma ile tanımlanan ve her yüzey tarama alanındaki renk kodlarını kaydeden ve “Signature File” olarak yazılıma kaydedilen bilgiler kullanılarak “*Image Classification → Maximum Likelihood Classification*” yöntemi ile karot yüzeyinde bulunan boşluklu ve boşluksuz yüzeylerin piksel olarak kapladıkları alanlar ayrı ayrı belirlenmiştir (Şekil 4.11). Karot örneklerin yüzey porozite oranları ise Eşitlik 4.1. kullanılarak hesaplanmıştır. Örneklerin bu yaklaşım kullanılarak hesaplanan yüzey boşluk oranı değerleri ise Çizelge 4.3.’te verilmiştir.

Karot yüzeyi tarama yöntemi boşluklu ve boşluksuz yüzeylerin renk kodlarının kapladığı alanların piksel bazında gruplandırılmasına dayanmaktadır. Ancak boşluklu ve boşluksuz yüzeylerin renk kodların çok yakın olması nedeniyle ortaya çıkması muhtemel hesaplama hatalarının önüne geçilebilmesi, renk kodlarının gruplandırma işleminin daha sağlıklı yapılabilmesi için ilk aşamada 50 olarak planlanan yüzey tanımlama alanlarının sayısı 100 adede kadar çıkarılmıştır. Bu yaklaşım ile meydana gelmesi muhtemel hesaplama ve analiz hataları en aza indirgenmiştir.

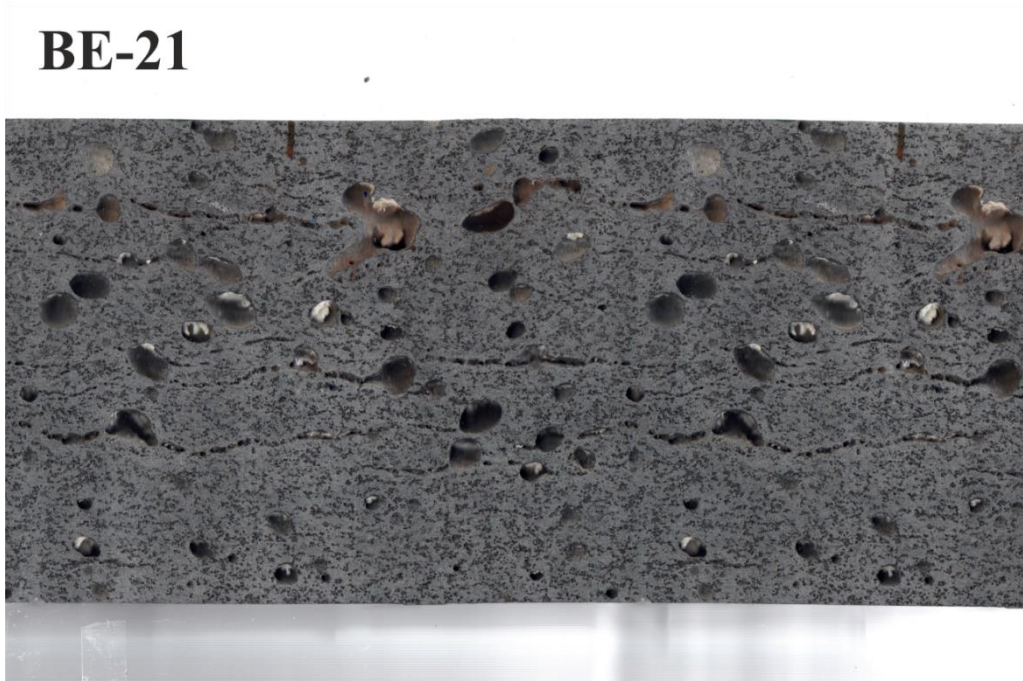
$$S = \frac{A_v}{A_v + A_m} \quad (4.1)$$

Burada;

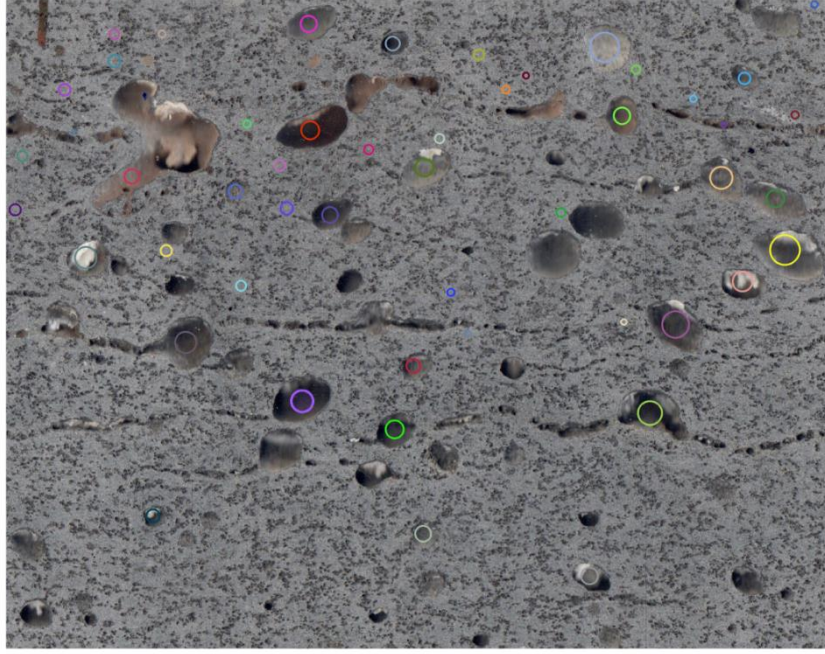
- S : Yüzey porozite oranı (birimsiz)
- A_v : Boşlukların kapladığı alan (piksel)
- A_m : Boşluklu olmayan alanlar (piksel)



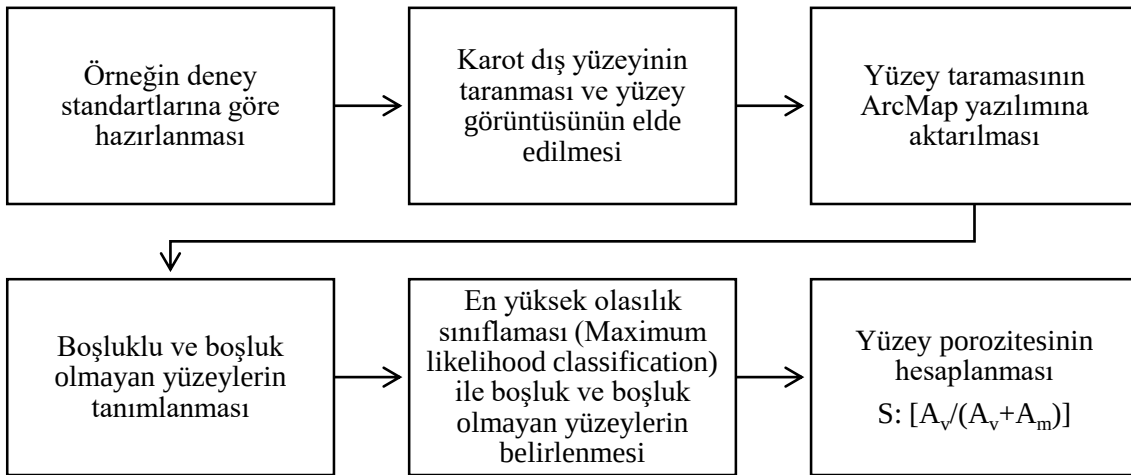
Şekil 4.7. Karot yüzeyi tarama yöntemi uygulanan BE-21 örneğinin görünümü.



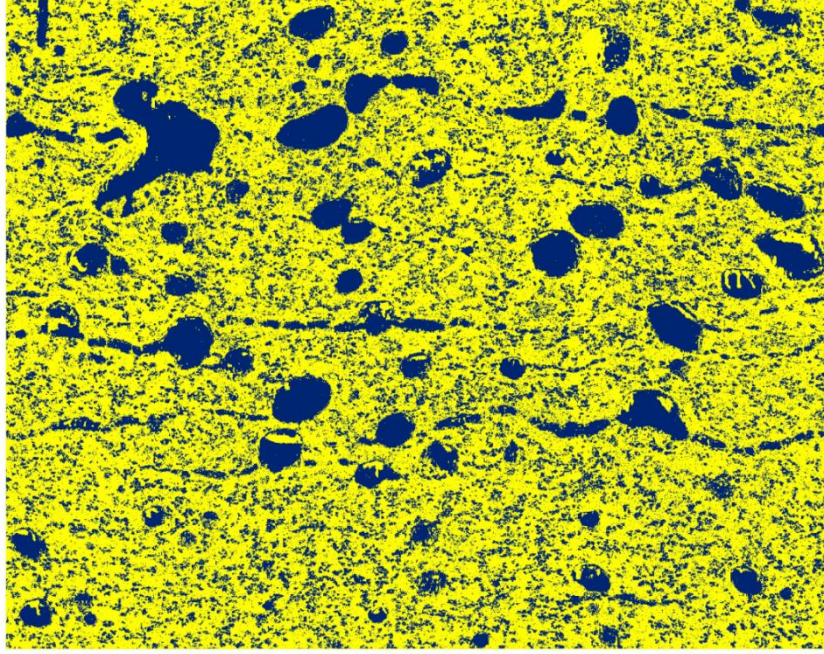
Şekil 4.8. Karot yüzeyi tarama yöntemi sonrası elde edilen BE-21 örneğinin yüzey görüntüsü.



Şekil 4.9. Karot yüzeyinde boşluklu ve boşluksuz yüzeylerin ArcMap yazılımında tanımlanması.



Şekil 4.10. Örneklerin yüzey boşluk oranlarının belirlenmesi için takip edilen akış şeması.



Şekil 4.11. Karot yüzeyinde “Image Classification” yaklaşımı ile belirlenen boşluklu ve boşluksuz alanların dağılımı.

Çizelge 4.3. Karot yüzeyi tarama yöntemi ile belirlenen yüzey boşluk oranı değerleri.

Örnek Numarası ve Yapılan Deneyi	Boşluk Olmayan Yüzey Alanı (Piksel)	Boşluk Alanı Toplamı (Piksel)	Toplam Yüzey Alanı (Piksel)	Yüzey Porozitesi S (%)
H-11 (Üç eksenli)	2464745	78711	2543456	3
H-12 (Üç eksenli)	2287003	256453	2543456	10
H-13 (Üç eksenli)	1995895	547561	2543456	22
H-31 (Üç eksenli)	2110214	433242	2543456	17
H-32 (Üç eksenli)	2344693	198763	2543456	8
H-33 (Üç eksenli)	2271377	272079	2543456	11
K-7 (Üç eksenli)	1851031	683969	2535000	27
K-8 (Üç eksenli)	2043141	491859	2535000	19
K-9 (Üç eksenli)	1856879	678121	2535000	27
K-25 (Üç eksenli)	1839062	695938	2535000	27
K-26 (Üç eksenli)	1660318	874682	2535000	35
K-42 (Üç eksenli)	2196365	338635	2535000	13
K-43 (Üç eksenli)	2024977	510023	2535000	20
K-44 (Üç eksenli)	2084903	450097	2535000	18
K-49 (Üç eksenli)	1858787	676213	2535000	27
BE-1 (Tek eksenli)	2303967	693183	2997150	23
BE-2 (Tek eksenli)	1967077	1030073	2997150	34
BE-3 (Tek eksenli)	2083321	918829	3002150	31
BE-4 (Tek eksenli)	2340474	656676	2997150	22
BE-5 (Tek eksenli)	2115397	881753	2997150	29

Çizelge 4.3. (Devam) Karot yüzeyi tarama yöntemi ile belirlenen yüzey boşluk oranı değerleri.

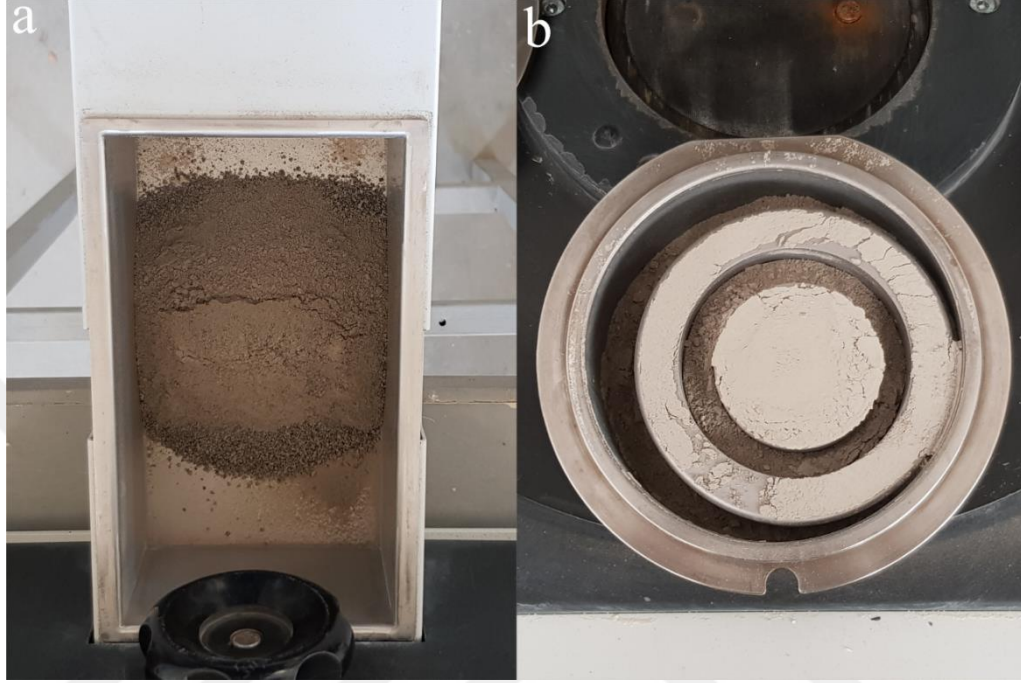
BE-10 (Üç eksenli)	1845223	689777	2535000	27
BE-11 (Üç eksenli)	1755590	779410	2535000	31
BE-12 (Üç eksenli)	1898409	636591	2535000	25
BE-20 (Tek eksenli)	2127115	870035	2997150	29
BE-21 (Tek eksenli)	2010158	986992	2997150	33
BE-22 (Tek eksenli)	1831399	1165751	2997150	39
BE-23 (Tek eksenli)	2036471	960679	2997150	32
BE-24 (Tek eksenli)	1948411	1048739	2997150	35
BE-25 (Üç eksenli)	1831023	703977	2535000	28
BE-26 (Üç eksenli)	1416091	1118909	2535000	44
BE-27 (Üç eksenli)	1667515	867485	2535000	34
N-1 (Tek eksenli)	2892978	104172	2997150	3
N-2 (Tek eksenli)	2879490	117660	2997150	4
N-3 (Tek eksenli)	2820112	177038	2997150	6
N-4 (Tek eksenli)	2782641	214509	2997150	7
N-5 (Tek eksenli)	2853079	144071	2997150	5
N-6 (Üç eksenli)	2402943	132057	2535000	5
N-7 (Üç eksenli)	2367875	167125	2535000	7
N-8 (Üç eksenli)	2391177	143823	2535000	6
N-20 (Tek eksenli)	2587010	410140	2997150	14
N-21 (Tek eksenli)	2517336	479814	2997150	16
N-22 (Tek eksenli)	2675506	321644	2997150	11
N-23 (Tek eksenli)	2638955	358195	2997150	12
N-24 (Tek eksenli)	2673462	323688	2997150	11
N-25 (Üç eksenli)	2265169	269831	2535000	11
N-26 (Üç eksenli)	2293879	241121	2535000	10
N-27 (Üç eksenli)	2287219	247781	2535000	10
N-30 (Tek eksenli)	2159843	837307	2997150	28
N-31 (Tek eksenli)	2156572	840578	2997150	28
N-32 (Tek eksenli)	2203933	793217	2997150	26
N-33 (Üç eksenli)	1791854	743146	2535000	29
N-34 (Üç eksenli)	1832888	702112	2535000	28
N-40 (Tek eksenli)	1790118	1207032	2997150	40
N-42 (Üç eksenli)	1532231	1002769	2535000	40
N-43 (Üç eksenli)	1375030	1159970	2535000	46
N-44 (Üç eksenli)	1599567	935433	2535000	37

4.4. Görgül Boşluk Hacmi Yaklaşımı

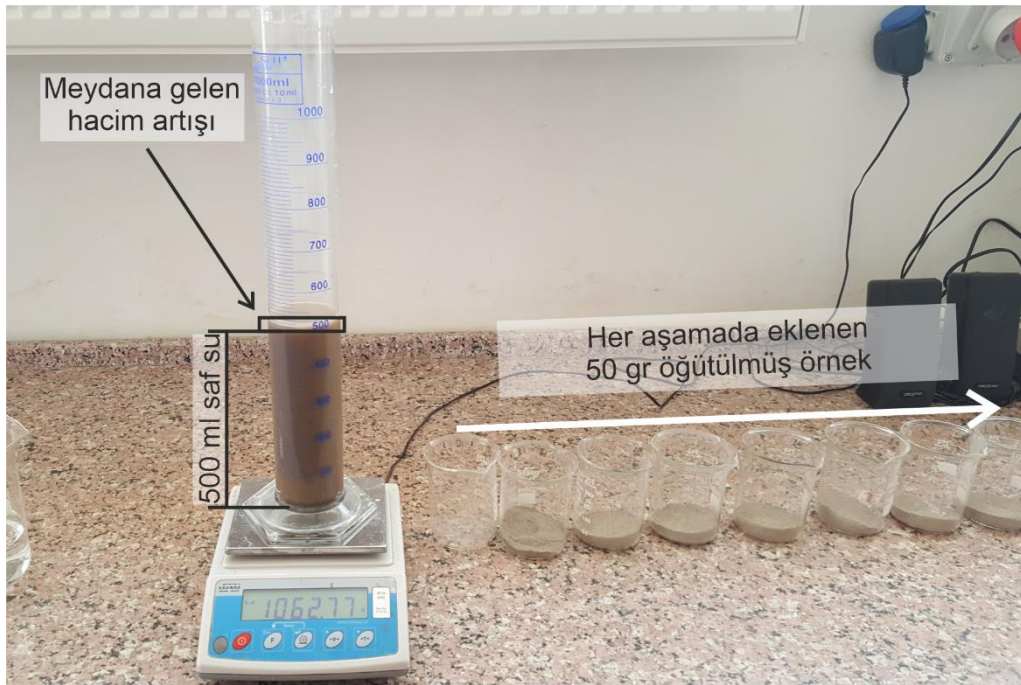
Özellikle bağlantılı boşluklar içermeyen kaya malzemelerinde bulunan toplam boşluk hacminin tam olarak belirlenmesi için mevcut deney yöntemleri ve yaklaşımlar tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Görünür gözeneklilik deneyi ile örnekte sadece belirli bir çapta olan ve su tutma özelliği gösterecek çapta olan, karot yüzeyi tarama yöntemi ile ise örneğin dış yüzeyindeki boşlukları temsil eden sayısal değerlere ulaşılabilmektedir. Elde edilen bu sonuçların örneklerin boşluk özelliklerinin tamamını yansıtmaması nedeniyle farklı bir yaklaşımın daha uygulanmasının gerekli olduğu düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda alınan her karot örneğinin büyük oranda çıkarıldığı bloğun özelliğini yansıtmaması nedeniyle “Görgül Boşluk Hacmi Yaklaşımı” uygulanmıştır.

Bu yaklaşım ile tamamen kaya malzemesinden oluşan öğütülmüş örneğin belirli bir kütlesine karşılık gelen hacim miktarı hesaplanarak karot örneklerin hacim ve kütle miktarlarından sahip oldukları boşluk hacimleri hesaplanmıştır. Görgül boşluk hacmi yaklaşımı ile arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan her bloğu ve içerdikleri boşluk miktarlarını temsil eden eşitlikler üretilmiştir. Bu yaklaşım kapsamında ilk aşamada her bloğun bozunmamış ve taze olan yüzeylerinden meydana gelmesi muhtemel örnek kayıplarının da telafi edilebilmesi amacıyla 1000 gr örnek alınmış, Retsch BB-51 model çeneli kırıcı kullanılarak 0,1 mm tane çapına inene kadar öğütülmüştür. Tane çapı 0,1 mm'ye indirilen örnekler sonraki aşamada ise Retsch RS200 model diskli öğütücü kullanılarak 1500 devir/dk hızda öğütülerek 20 μ m ve altı tane çapına indirilmiştir (Şekil 4.12).

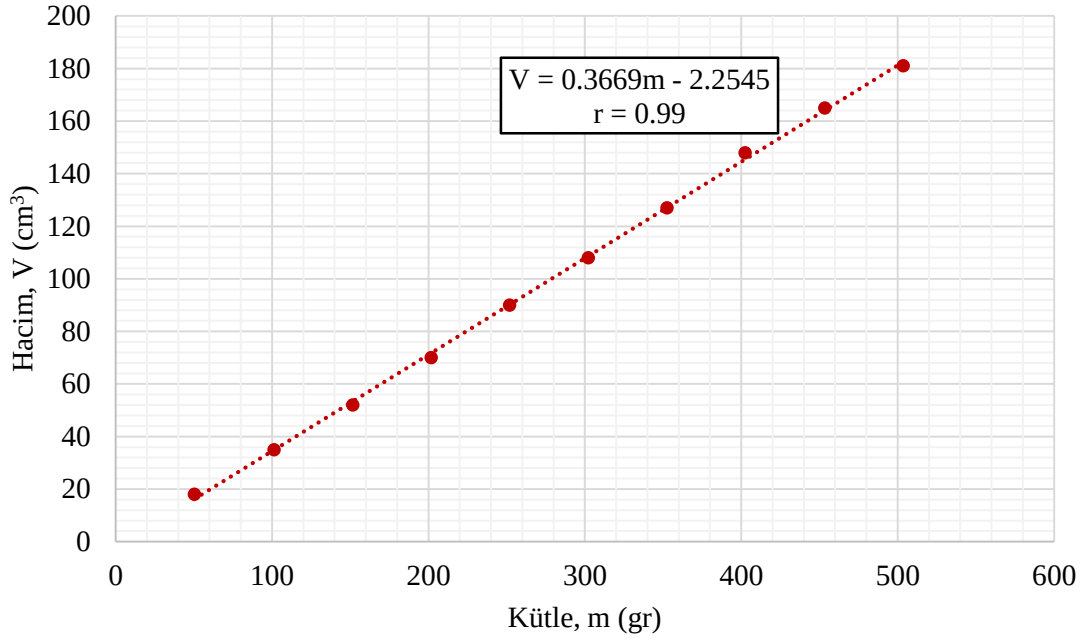
Öğütülerek 20 μ m ve altı tane çapına indirilen örnekler herhangi bir boşluk içermemekte ve tamamen kaya malzemesinden oluşmaktadır. Öğütme işlemi sonucunda elde edilen 1000 gr öğütülmüş örneğin 500 gr kadarı 1000 ml kapasiteli mezürde bulunan 500 ml saf suya her aşamada 50 gr olacak şekilde toplam 10 aşamada eklenmiştir (Şekil 4.13). Örneklerin tane çaplarının çok küçük (<20 μ m) olması nedeniyle her ekleme aşamasında meydana gelmesi muhtemel örnek kayıplarının yaşanmaması için dikkat edilmiştir. Her ekleme aşamasında saf suda meydana gelen hacim artışı mezür üzerinden okunarak kaydedilmiş ve bu işlem 10 aşama olarak gerçekleştirildikten sonra 500 gr örneğin alındığı bloğa ait olacak şekilde her blok için ayrı ayrı hacim-kütle grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.14 - 4.25). Her bloğa ait olan eşitlikler kullanılarak hacim ve kütle değerleri bilinen örneklerin boşluk hacimleri de her karot örneği için ayrı ayrı hesaplanarak bulunmuştur. Bu yaklaşım kullanılarak hesaplanan boşluk hacimleri de Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Görgül boşluk hacmi yaklaşımı temel aldığı yöntem nedeniyle karot örneklerin boşluk hacimlerinin belirlenmesi için kullanılan tüm yaklaşım ve yöntemlere göre daha sağlıklı sonuçlar vermiştir.



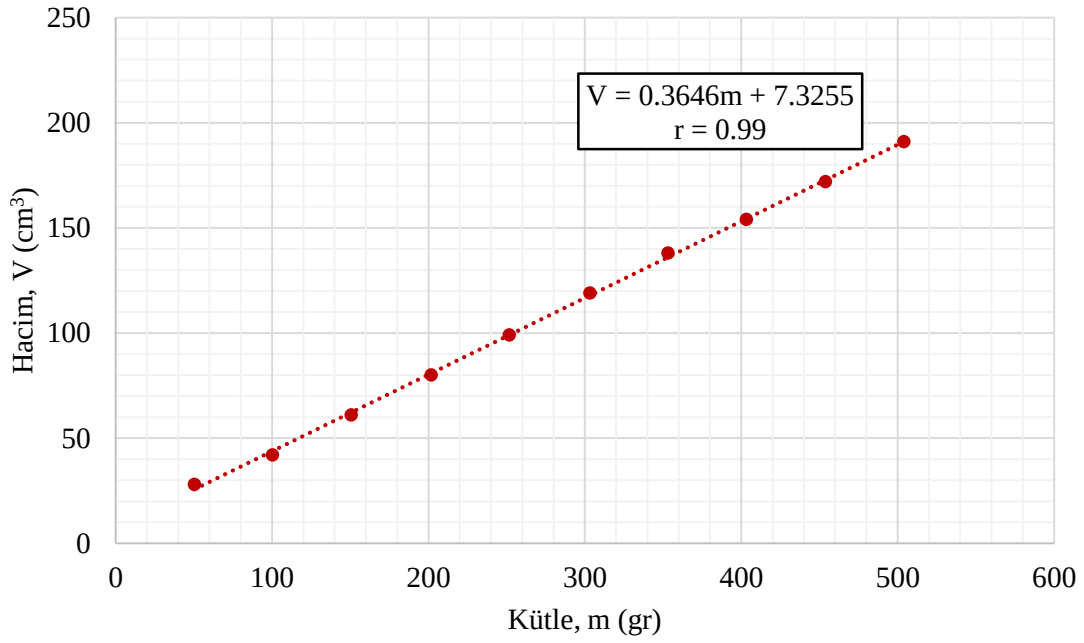
Şekil 4.12. (a) Retsch BB-51 ve (b) Retsch RS200 kullanılarak örneklerin öğütülmesi.



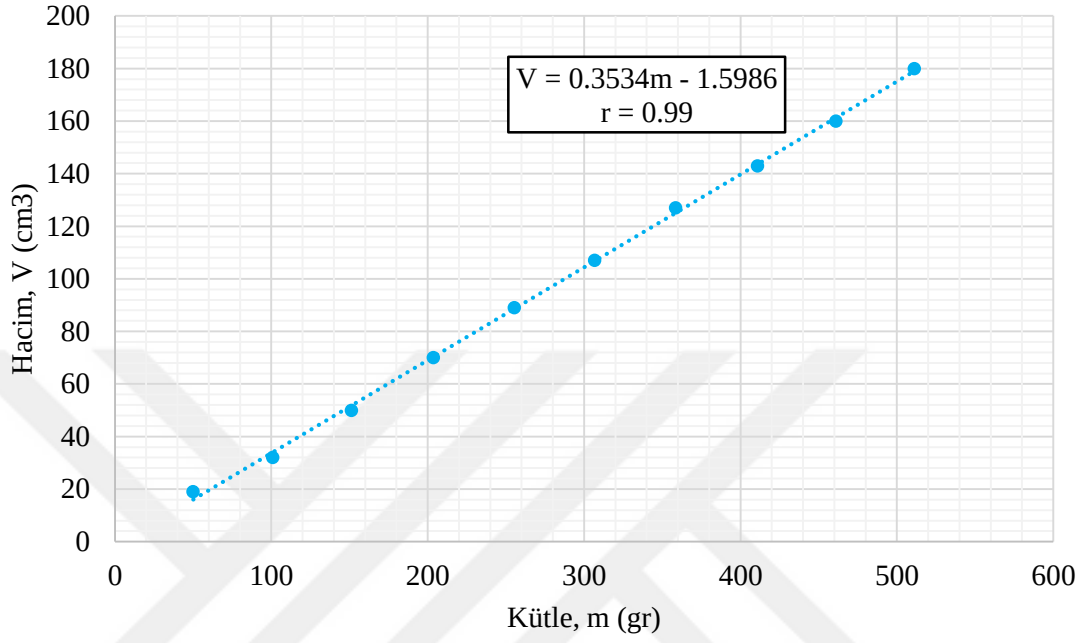
Şekil 4.13. Öğütülmüş 50 gr örneğin eklenmesi ile saf suda meydana gelen hacim artışının belirlenmesi.



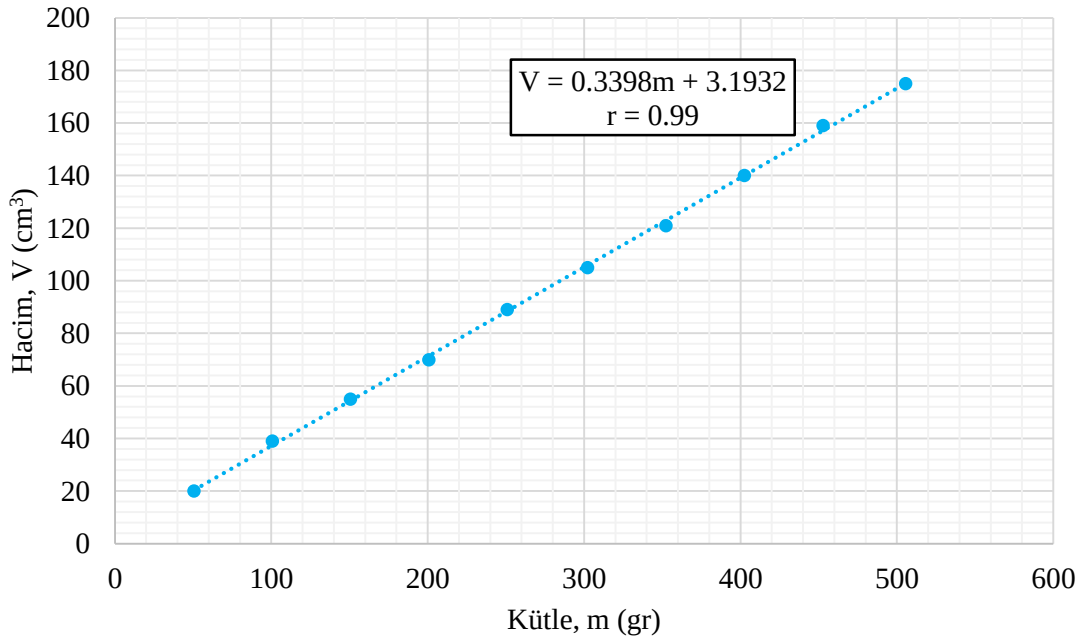
Şekil 4.14. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları'ndan (L-1) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



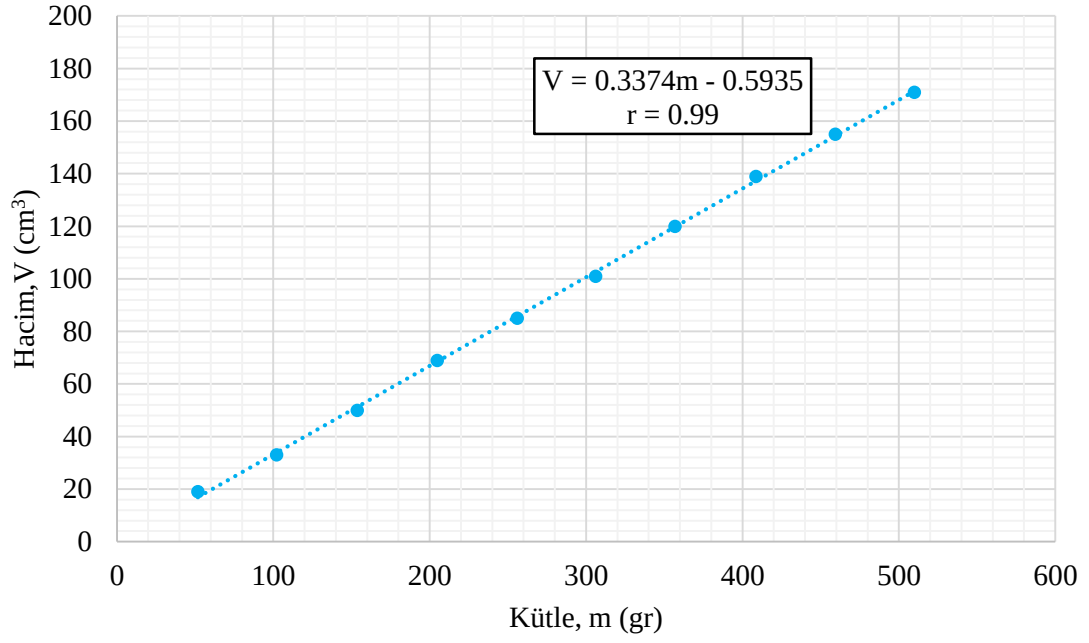
Şekil 4.15. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları'ndan (L-1) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



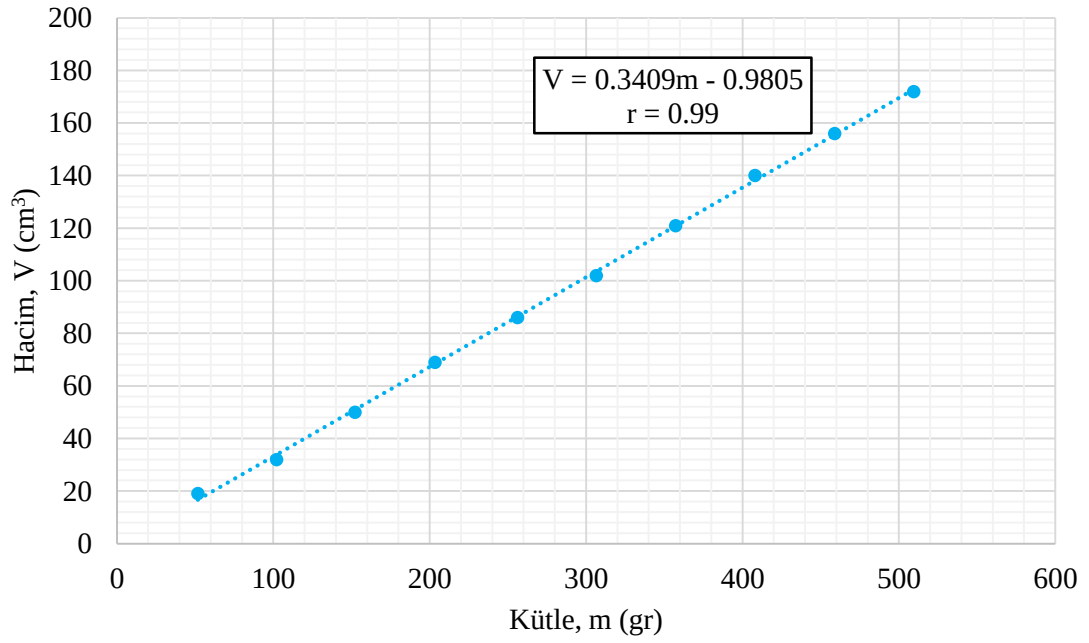
Şekil 4.16. Kula Volkanik Jeoparkı'ndan (L-2) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



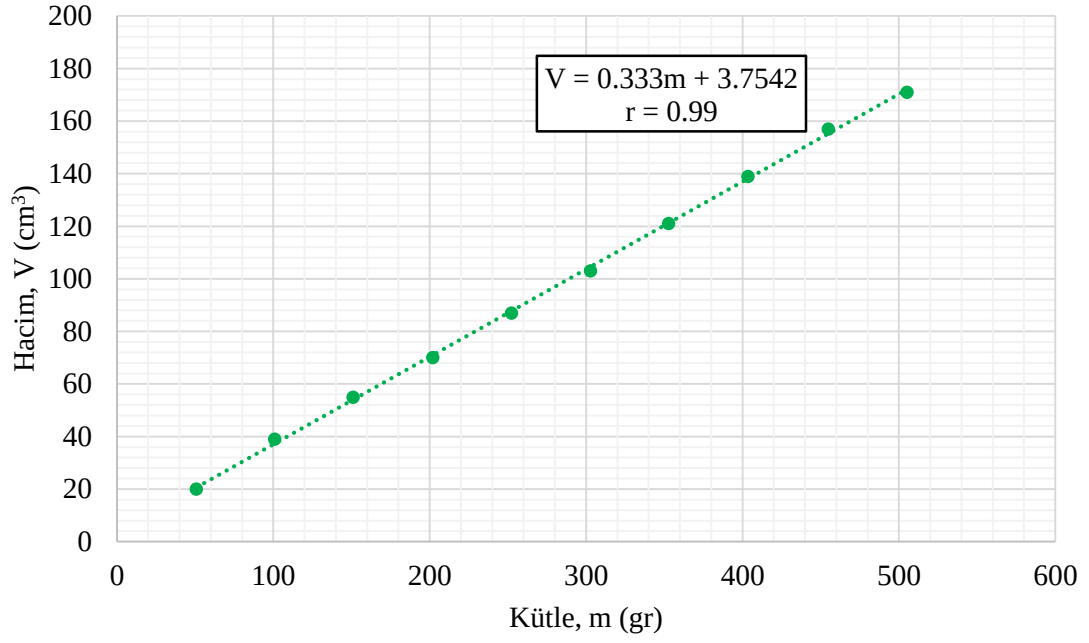
Şekil 4.17. Kula Volkanik Jeoparkı'ndan (L-2) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



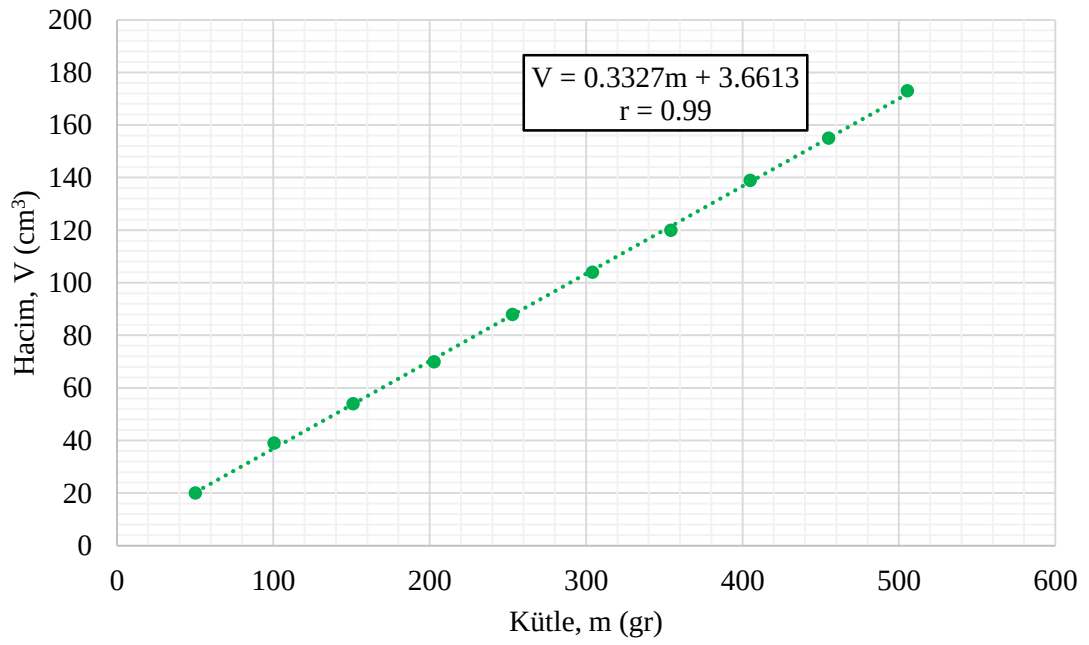
Şekil 4.18. Kula Volkanik Jeoparkı'ndan (L-2) alınan 3. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



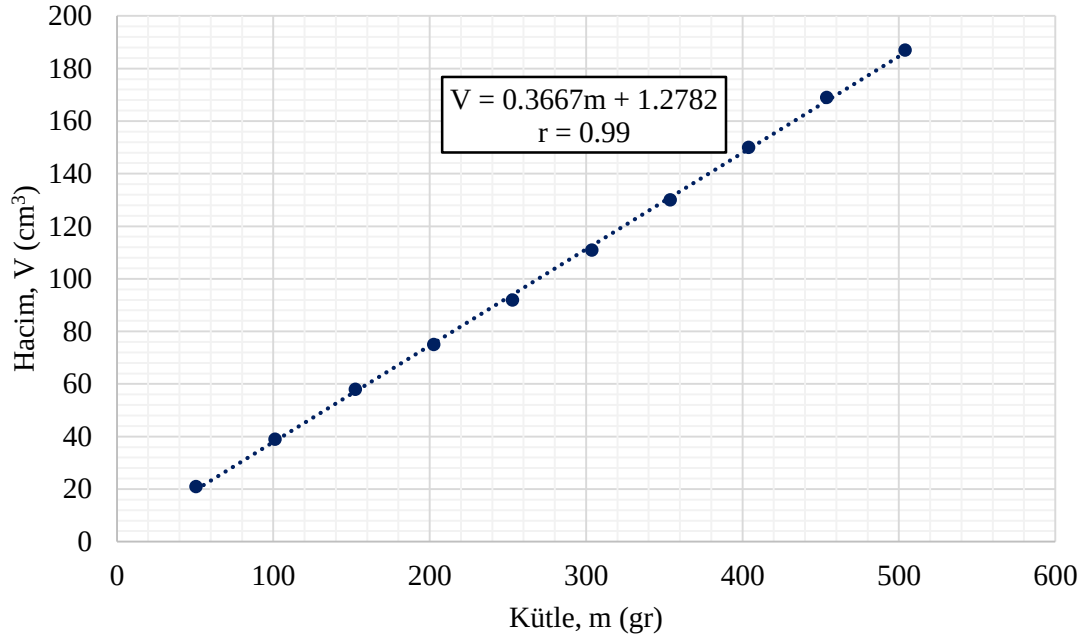
Şekil 4.19. Kula Volkanik Jeoparkı'ndan (L-2) alınan 4. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



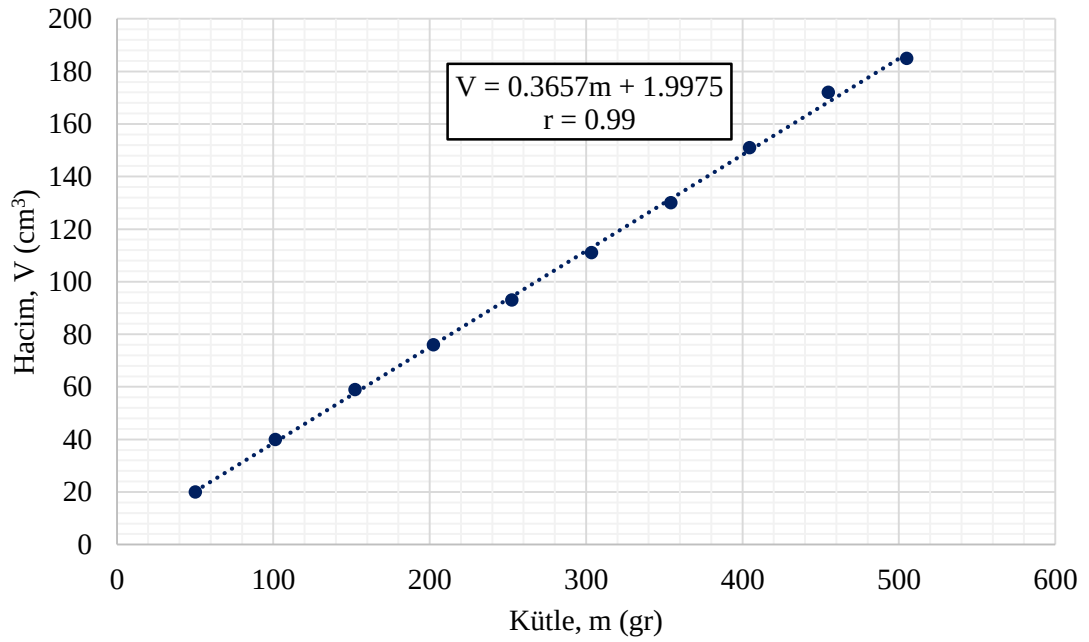
Şekil 4.20. Köşk bölgesinden (L-3) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



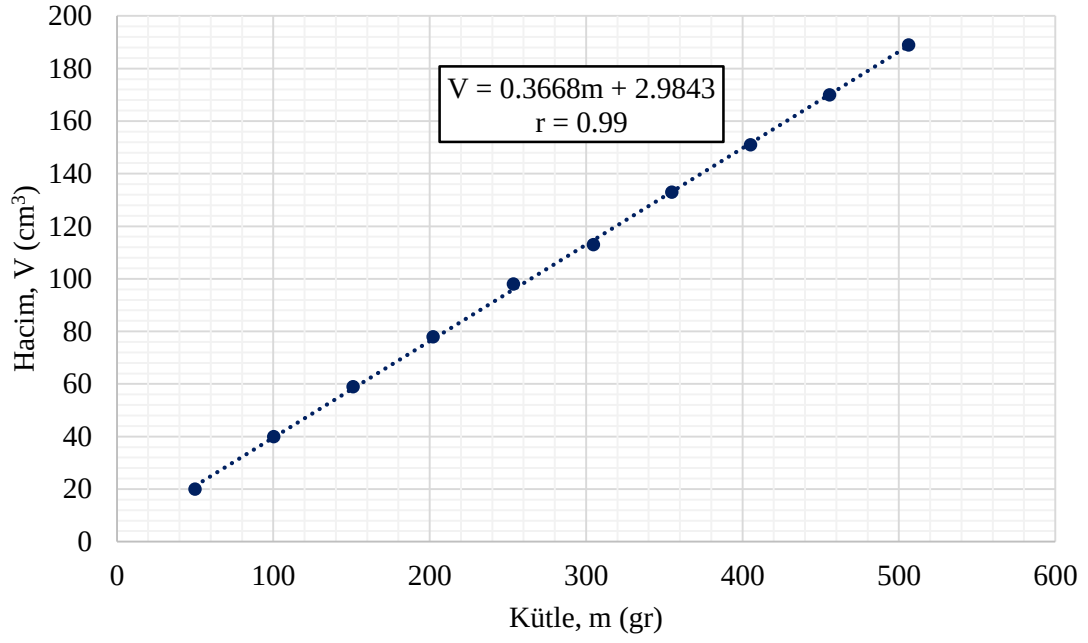
Şekil 4.21. Köşk bölgesinden (L-3) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



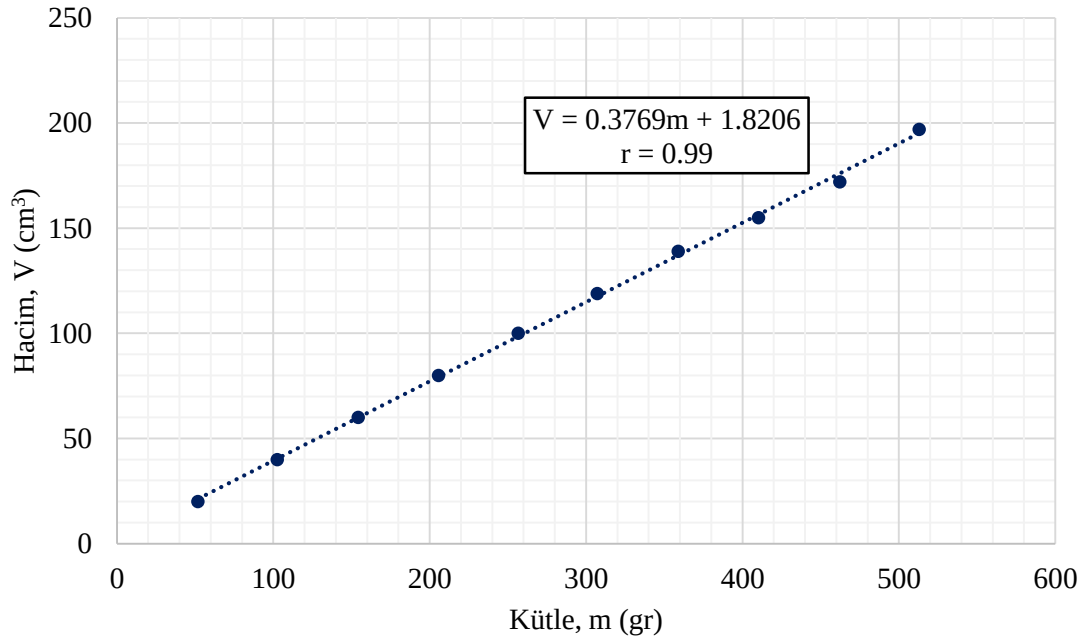
Şekil 4.22. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 1. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



Şekil 4.23. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 2. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



Şekil 4.24. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 3. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.



Şekil 4.25. Naşa bölgesinden (L-4) alınan 4. bloğa ait olan hacim-kütle grafiği.

Çizelge 4.4. Görgül boşluk hacmi yaklaşımı kullanılarak hesaplanan boşluk hacmi değerleri.

Örnek Numarası ve Yapılan Deneyi	Blok Formülü	Hacim (cm ³)	Gerçek Porozite (%)	Boşluk Oranı
H-1 (Tek eksenli)	V = 0,3669m - 2,2545	324,96	21,33	0,07
H-2 (Tek eksenli)		316,84	19,67	0,06
H-3 (Tek eksenli)		320,15	20,59	0,06
H-11 (Üç eksenli)		324,96	21,33	0,07
H-12 (Üç eksenli)		316,84	19,67	0,06
H-13 (Üç eksenli)		320,15	20,59	0,06
H-23 (Tek eksenli)	V = 0,3646m + 7,3255	319,00	10,85	0,03
H-25 (Tek eksenli)		321,21	12,02	0,04
H-26 (Tek eksenli)		318,72	9,53	0,03
H-31 (Üç eksenli)		319,00	10,85	0,03
H-32 (Üç eksenli)		321,21	12,02	0,04
H-33 (Üç eksenli)		318,72	9,53	0,03
K-1 (Tek eksenli)	V = 0,3534m - 1,5986	319,00	10,85	0,03
K-3 (Tek eksenli)		321,21	12,02	0,04
K-7 (Üç eksenli)	V = 0,3534m - 1,5986	229,78	14,72	0,06
K-8 (Üç eksenli)		229,42	13,73	0,06
K-9 (Üç eksenli)		229,46	15,06	0,07
K-25 (Üç eksenli)	V = 0,3398m + 3,1932	237,38	13,58	0,06
K-26 (Üç eksenli)		235,36	17,75	0,08
K-42 (Üç eksenli)	V = 0,3374m - 0,5935	234,06	16,02	0,07
K-43 (Üç eksenli)		226,46	14,50	0,06
K-44 (Üç eksenli)		227,61	13,45	0,06
K-49 (Üç eksenli)		233,77	13,83	0,06
BE-1 (Tek eksenli)	V = 0,333m + 3,7542	285,49	15,31	0,05
BE-2 (Tek eksenli)		286,60	14,80	0,05
BE-3 (Tek eksenli)		285,66	15,83	0,06
BE-4 (Tek eksenli)		286,13	15,50	0,05
BE-5 (Tek eksenli)		283,13	15,39	0,05
BE-10 (Üç eksenli)	V = 0,333m + 3,7542	235,06	15,16	0,06
BE-11 (Üç eksenli)		238,93	15,78	0,07
BE-12 (Üç eksenli)		233,86	14,37	0,06
BE-20 (Tek eksenli)	V = 0,3327m + 3,6613	285,20	21,20	0,07
BE-21 (Tek eksenli)		286,67	20,64	0,07
BE-22 (Tek eksenli)		284,94	21,51	0,08
BE-23 (Tek eksenli)		285,25	22,64	0,08
BE-24 (Tek eksenli)		285,74	21,28	0,07
BE-25 (Üç eksenli)		235,40	20,00	0,08
BE-26 (Üç eksenli)	V = 0,3327m + 3,6613	236,06	19,72	0,08
BE-27 (Üç eksenli)		235,27	23,63	0,10
N-1 (Tek eksenli)	V = 0,3667m + 1,2782	272,57	3,35	0,01
N-2 (Tek eksenli)		269,18	2,76	0,01
N-3 (Tek eksenli)		269,67	3,01	0,01
N-4 (Tek eksenli)		276,09	3,98	0,01
N-5 (Tek eksenli)		273,26	3,45	0,01
N-6 (Üç eksenli)	V = 0,3667m + 1,2782	229,52	2,42	0,01
N-7 (Üç eksenli)		219,82	3,45	0,02
N-8 (Üç eksenli)		231,87	3,43	0,01
N-20 (Tek eksenli)	V = 0,3657m + 1,9975	278,08	6,52	0,02
N-21 (Tek eksenli)		275,69	6,73	0,02
N-22 (Tek eksenli)		278,54	7,17	0,03
N-23 (Tek eksenli)		280,53	6,80	0,02

Çizelge 4.4. (Devam) Görgül boşluk hacmi yaklaşımı kullanılarak hesaplanan boşluk hacmi değerleri.

N-24 (Tek eksenli)		278,47	6,89	0,02
N-25 (Üç eksenli)		233,42	6,39	0,03
N-26 (Üç eksenli)	V = 0,3657m + 1,9975	230,46	6,25	0,03
N-27 (Üç eksenli)		235,37	6,90	0,03
N-30 (Tek eksenli)		274,68	19,68	0,07
N-31 (Tek eksenli)	V = 0,3668m + 2,9843	278,05	20,31	0,07
N-32 (Tek eksenli)		278,73	20,89	0,07
N-33 (Üç eksenli)	V = 0,3668m + 2,9843	235,81	21,91	0,09
N-34 (Üç eksenli)		232,01	18,73	0,08
N-40 (Tek eksenli)	V = 0,3769m + 1,8206	269,49	35,11	0,13
N-42 (Üç eksenli)		232,43	33,71	0,15
N-43 (Üç eksenli)	V = 0,3769m + 1,8206	232,91	31,47	0,14
N-44 (Üç eksenli)		230,97	29,11	0,13

4.5. Kullanılan Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Örneklerin boşluk özelliklerinin temsil edici bir şekilde değerlendirmelerde kullanılabilmesi için tercih edilen görünür gözeneklilik, karot yüzeyi tarama ve görgül boşluk hacmi yaklaşımı ile elde edilen değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Kullanılan yöntemlerden olan karot yüzeyi tarama yaklaşımında elde edilen değerler görünür gözeneklilik ve görgül boşluk hacmi yaklaşımlarına göre ortalama olarak 4 kata varan değerlerde olan sonuçlar elde edilmiştir. Bu farklılığın en önemli nedeni karot yüzeyi tarama yönteminin analizin yapıldığı yüzeyin renk kodlarını baz alarak boşluk ve hamur malzemesini ayırt etmesidir. Bu yöntemde boşluk ve hamur malzemesinin renk tonunun birbirine yakın olduğu durumlarda boşluklar hamur malzemesi ve hamur malzemesi ise boşluk olarak tanımlanabilmektedir. Görünür gözeneklilik yönteminden elde edilen değerler ise görgül boşluk hacmin yaklaşımından elde edilen değerlere göre %17'ye varan oradan daha azdır. İki yöntem arasındaki bu farkında da görünür gözeneklilik yaklaşımında suyun bağlantısız (kapalı boşluk) ve küçük çaplı boşluklara iletilememesidir. Kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında görgül boşluk hacmi yaklaşımı ile elde edilen değerlerin örneklerin boşluk özelliklerini yansıması bakımından en güvenilir olanı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.5. Kullanılan yöntemler ile elde edilen porozite değerleri (%).

Lokasyon	Porozite (Görünür Gözeneklilik)	Yüzey Porozitesi (Karot Yüzeyi Tarama)	Gerçek Porozite (Görgül Boşluk Hacmi)
L-1 (1. Blok)	10,41	10,01	20,53
L-1 (2. Blok)	4,23	10,62	8,37
L-2 (1. Blok)	3,76	19,50	12,42
L-2 (2. Blok)	4,91	23,59	16,96

Çizelge 4.5. (Devam) Kullanılan yöntemler ile elde edilen porozite değerleri (%).

L-2 (3. Blok)	3,90	14,09	14,78
L-2 (4. Blok)	2,96	18,26	12,94
L-3 (1. Blok)	5,76	21,65	15,37
L-3 (2. Blok)	6,04	25,42	21,46
L-4 (1. Blok)	1,76	5,09	3,31
L-4 (2. Blok)	1,87	10,59	6,82
L-4 (3. Blok)	5,09	21,75	20,93
L-4 (4. Blok)	9,10	28,91	37,05

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Örnek Hazırlama Çalışmaları ve Karşılaşılan Sorunlar

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında 4 farklı lokasyondan alınan blok örneklerden karot alma işlemleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği ve Jeoloji Mühendisliği Bölümleri (Şekil 5.1) ile Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları'nda (Şekil 5.2) gerçekleştirilmiştir. Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları (Lokasyon-1), Kula Volkanik Jeoparkı (Lokasyon-2) ve Naşa bölgesinden (Lokasyon-4) alınan örneklerin karot alma işlemleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji ve Maden Mühendisliği Laboratuvarları'nda, Köşk bölgesinden (Lokasyon-3) alınan örneklerin karot alma işlemleri ise Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nda tamamlanmıştır. Her iki laboratuvarda da bulunan karot alma cihazlarının ilerleme hızı kullanıcı tarafından kontrol edilebilen özelliğe sahiptir. Karot alma çalışmaları sırasında kaya bloklarının sertlik derecelerine uygun olacak özelliklere sahip olan NX (54.7 mm) çaplı karotiyerler kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji ve Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları'nda karot alma çalışmaları.



Şekil 5.2. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda karot alma çalışmaları.

Özellikle boşluk miktarı fazla olan bloklardan karot alınırken blokların tam olarak sabitlenememesi, karotiyer ilerleme yönünün bloğun konulduğu yüzeye paralel yönde ilerlemesi ve yer çekimi etkisine maruz kalması, karotiyer ilerleme hızının sabit olmaması ve kullanıcı kaynaklı olarak karot işlemi süresince değişmesi, karot alma cihazlarının otomatik olmaması ve blokların içinde önceden görülmesi mümkün olmayan çatlakların bulunması nedeniyle bazı karotlarda kırılma, karot ekseninde kayma ve bloklarda parçalanma meydana gelmiştir. Söz konusu bu sorunlar, blokların sabitlenmesi için fazladan metal ve ahşap plakalar kullanılarak ve karotiyerin ilerleme hızı düşürülerek ve sabit tutularak çözülmüştür. Blokların boşluklu yapısından dolayı karotiyerin bloğa giriş ve çıkış noktalarında meydana gelen parçalanma sorununun karotların boy/çap oranlarında sorun yaratmaması için en uzun karot boyunun alınabileceği eksenlerin seçilmesine de ayrıca dikkat edilmiştir. Karot alma işlemleri sonucunda 4 farklı lokasyondan alınan toplam 12 adet bloktan tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri için ISRM (1981)'e uygun boy-çap oranına sahip olacak şekilde örnekler alınmıştır. Alınabilecek karot sayısı en fazla sayıda tutulmaya çalışılarak hem tez çalışması hem de gelecekte yapılması muhtemel çalışmalar için yeterli sayıda karot örneğinin elde edilmesi sağlanmıştır. Karot alma işlemleri sırasında yaşanan sorunların aşılabilmesi amacıyla

gelecekte benzer konularda çalışacak araştırmacıların ayarlanabilir hız ve ilerleme seçeneğine sahip olan ve karotiyer ilerleme yönü bloğun konulduğu veya yerleştirildiği yüzeye dikey yönde ilerleyen otomatik cihazları tercih etmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Belirtilen özelliklere sahip olan karot alma cihazlarının kullanılması ile özellikle sert ve masif yapıda olan kaya bloklarından bir adet karot alma işleminin 60-90 dakika kadar sürmesi nedeniyle meydana gelen ve yukarıda detaylı olarak açıklanan sorunların önüne geçilmesi de mümkün olacaktır. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde alınan karot örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin kesilmesi ve planlanan deneylerin yapılacağı Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboartuvarı'na taşınması sırasında herhangi bir kırılma ve parçalanmanın oluşmaması için her biri ayrı ayrı balonlu naylon malzeme ile korumaya alınarak gönderilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nda alınan karotların taşıma sırasında kırılma ve parçalanmaya karşı korumaya alınması.

Kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen tek ve üç eksenli laboratuvar deneylerinde kullanılan örneklerin ISRM (2007) standartlarına uygun boy/çap oranında ve karotların alt ve üst yüzeylerinin karot eksenine dik olması yapılan deneyler sırasında yüklemenin örneğe tam olarak aktarılabilmesi ve alınan verilerin sağlıklı

olabilmesi için son derecede önemlidir. 4 farklı lokasyondan alınan 12 bloktan çıkarılan karotların ISRM (2007) tarafından önerilen deney standartlarına uygun olacak şekilde boy/çap oranlarında kesilmesi, karotların alt ve üst yüzeylerinin standartlara uygun olacak şekilde paralel ve karot eksenine dik hale getirilmesi işlemleri ise Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi'nde (KDPÜ İLTEM) yapılmıştır. Bloklardan çıkarılan karot örneklerin deney standartlarına uygun olacak şekilde kesilmesi işlemleri sırasında Metkon Servocut 301AA model otomatik hassas kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.4). Karotların kesilmesi işlemine başlamadan önce her bir karot örneği iki farklı noktadan cihazdan bulunan metal mengeneler kullanılarak sabitlenmiştir. Bu sabitleme işlemi ile karotların kesim sırasında kesme bıçağının uyguladığı kuvvet nedeniyle yer değiştirmesi ve bıçağın kesme ekseninin kayması gibi yaşanması muhtemel sorunlarında önüne geçilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.5). Karot kesme işlemleri sırasında yaşanan bir diğer önemli sorun ise kesme bıçağının kesim işlemini tamamlamasına az bir süre kala karotun kesilen kısmının uç noktasından kırılmasıdır. Bu durumda düz bir karot yüzeyi elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle karot kesme işlemleri sırasında kullanılan cihazın bıçak dönüş hızı 2850 rpm ve ilerleme hızı 100 micron/sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Bıçak dönüş ve ilerleme hızının sabit olması, karotların içinde bulunan sert mineraller nedeniyle hızda herhangi bir değişim meydana gelmemesi nedeniyle her karot örneği aynı işlem uygulanarak kesilmiş ve karot uçlarında herhangi bir kırılma, kopma ya da parçalanma sorunu yaşanmamıştır. Belirlenen hız parametrelerine uygun olarak her karotun alt ve üst yüzeylerinin kesim işlemleri yaklaşık olarak 20 dakika sürmüştür. Karotların alt ve üst yüzeylerinin kesilmesinin ardından bu yüzeylerin karot eksenine dikliklerinin kontrol edilmesi, standartlara uygun olmayanlar üzerinde tekrar kesme veya aşındırma işlemlerinin yapılması için bilgisayar kontrollü olan ve anlık olarak veri alınabilen deformasyon ölçerler kullanılmıştır (Şekil 5.6). Karotların her birinin alt ve yüzeylerinin karot eksenine dikliklerinin ölçülebilmesi için alt ve üst yüzeylerden 4 farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda karot örneğin çapına olan oranı 0,005'in (ISRM, 2007) altında olan örnekler deney standartlarına uygun olarak kabul edilmiştir.

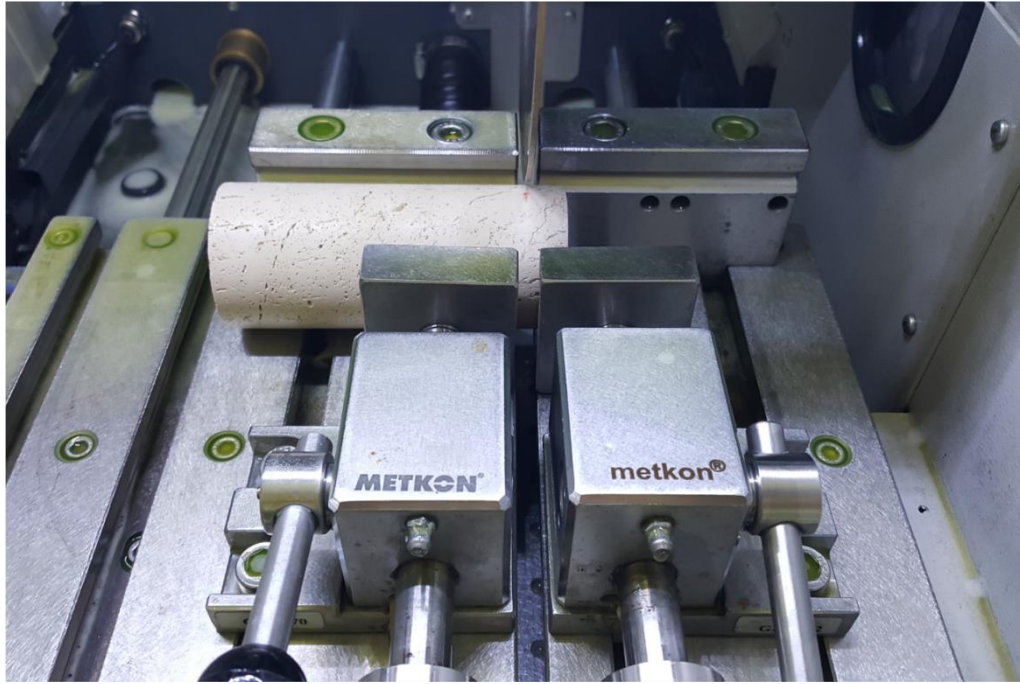
$$\frac{\Delta}{D} \text{ ve } \frac{\Delta'}{D} \leq 0.005 \quad (5.1)$$

Burada;

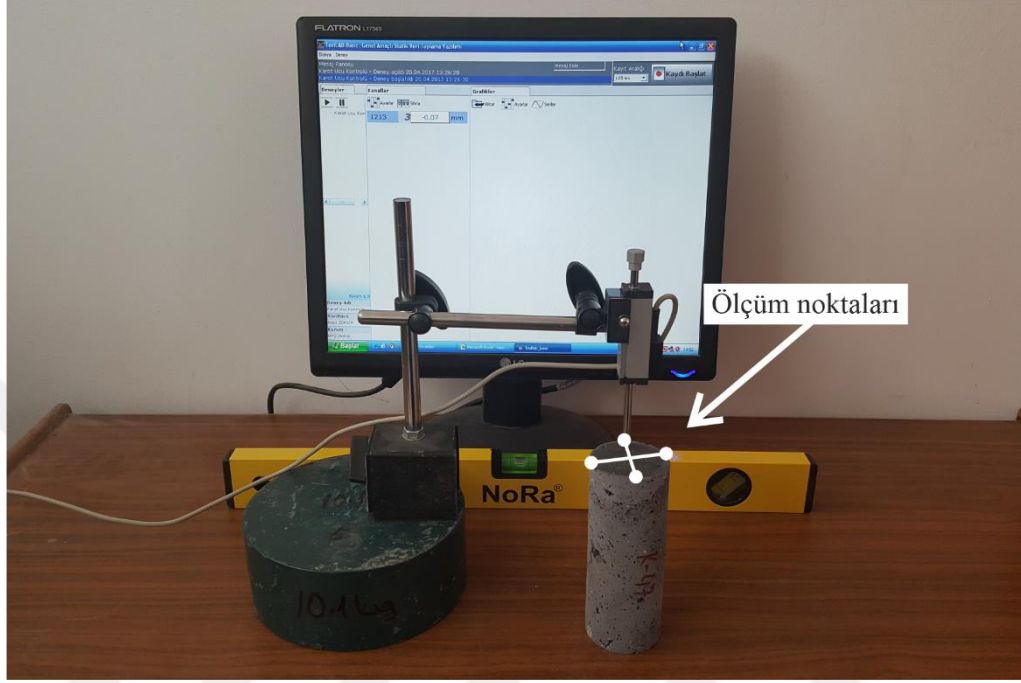
- Δ : Karot örneğin üst yüzeyinden alınan ölçümlerin ortalaması (mm)
- Δ' : Karot örneğin alt yüzeyinden alınan ölçümlerin ortalaması (mm)
- D : Karot örneğin çapı (mm)



Şekil 5.4. Karotların kesilmesi için kullanılan Metkon Servocut 301AA cihazının genel görünümü.



Şekil 5.5. Karotların kesim işlemi öncesinde metal mengenerler ile sabitlenmesi.

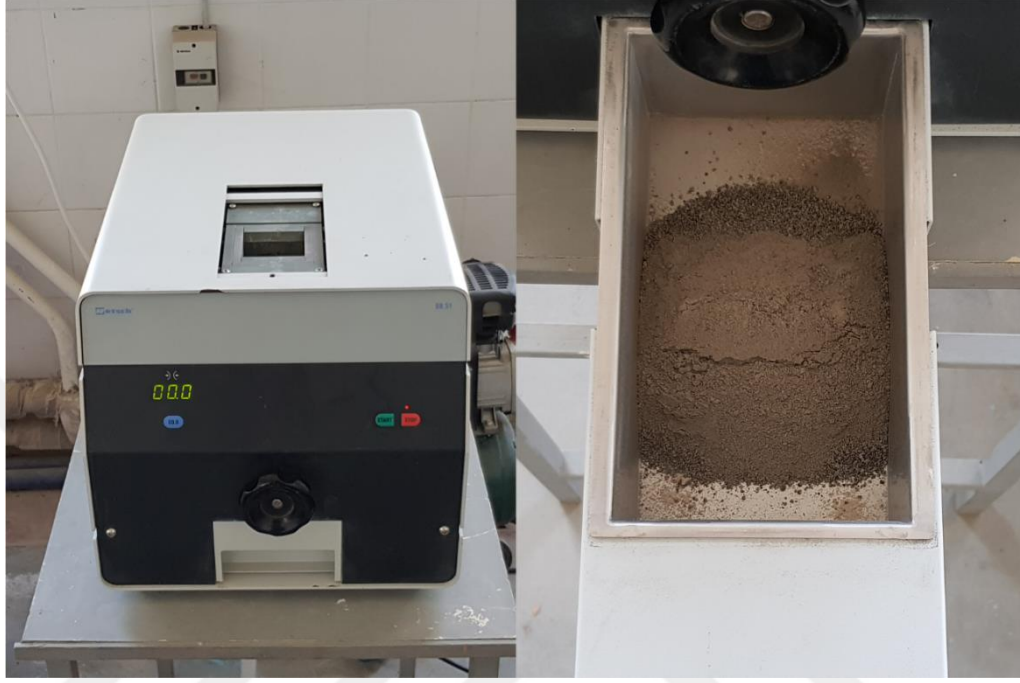


Şekil 5.6. Karotların alt ve üst yüzeylerinin örnek eksenine dikliğinin ölçülmesi.

5.2. Kaya Türlerinin Tanımlanması İçin Yapılan Çalışmalar

5.2.1. Örnek hazırlama

Kayaların hem sınıflandırılabilmesi hem de tek ve üç eksenli yükleme koşulları altında karot örneklerde meydana gelen çatlaklar ve yenilme davranışının kayaların içerdikleri mineraller ile ilişkisinin irdelenebilmesi için tanımlama analizleri yapılmıştır. Kaya türlerinin tanımlanabilmesi amacıyla her bloğun bozunmamış taze yüzeylerinden alınan parçalar Retsch BB-51 model çeneli kırıcı kullanılarak 0,1 mm tane çapına inene kadar öğütülmüştür (Şekil 5.7). Öğütülen bu örnekler ise daha sonra Retsch RS200 model diskli öğütücü kullanılarak 1500 devir/dk hızda öğütülerek 20 μm ve altı tane çapına indirilmiştir (Şekil 5.8). Her bloğun taze yüzeylerinden alınan örneklerin öğütülerek 20 μm ve altı tane çapına indirilmesinin ardından X-Işını Difraktometresi (XRD), X-Işını Flüoresans (XRF) ve ateşte kayıp analizleri için 10'ar gram örnek hazırlanmıştır.



Şekil 5.7. Retsch BB-51 model çeneli kırıcı kullanılarak öğütülen örnek.



Şekil 5.8. Retsch RS200 model diskli öğütücü kullanılarak öğütülen örnek.

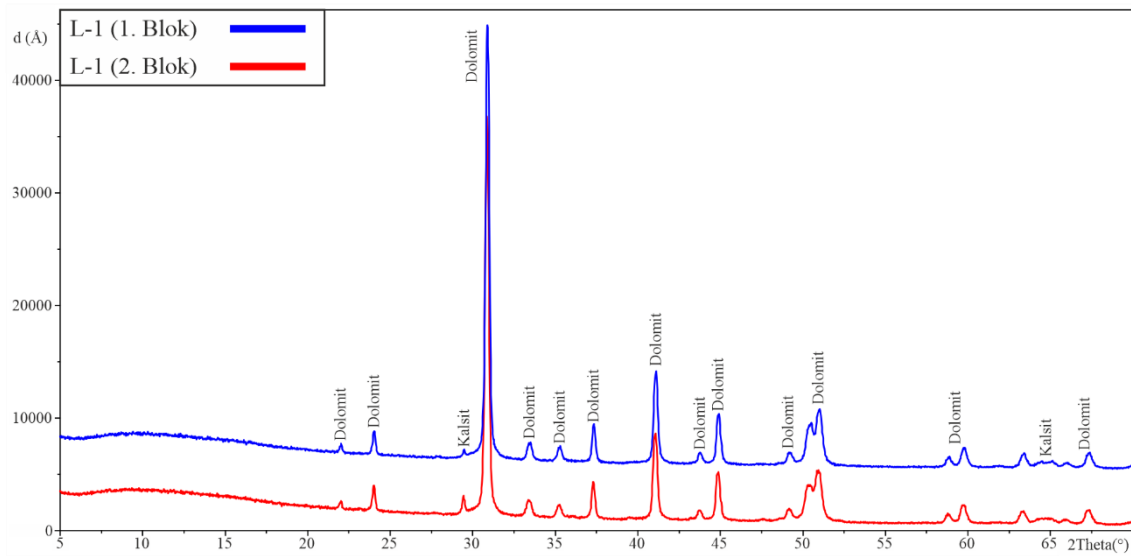
5.2.2. X-Işını Difraktometresi (XRD), X-Işını Flüoresans (XRF) ve Ateşte Kayıp Analizleri

Seçilen kayaların mineralojik ve kimyasal bileşimlerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan X-Işını Difraktometresi (XRD) ve X-Işını Flüoresans (XRF) analizleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi'nde yapılmıştır. XRD analizleri Malvern PANalytical Empyrean model cihazda 2° - 70° kırılma açısı aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9). XRD analizleri sonucunda her bloğa ait olan örneklerden elde edilen pikler Malvern HighScore yazılımı ile mineral fazları kalitatif olarak bilinen malzemenin fazlarının kantitatif olarak belirlenebilmesi için kullanılan bir hesaplama yöntemi olan Rietveld metoduna göre değerlendirilmiştir. Her bloğa ait olan XRD sonuçları birlikte incelenerek blok örnekler arasındaki mineralojik farklılıklar da detaylı olarak incelenmiştir (Şekil 5.10-13). XRD analizleri sonucunda yarı kantitatif olarak örneklerin mineral dağılımları da Çizelge 5.1'de verilmiştir.

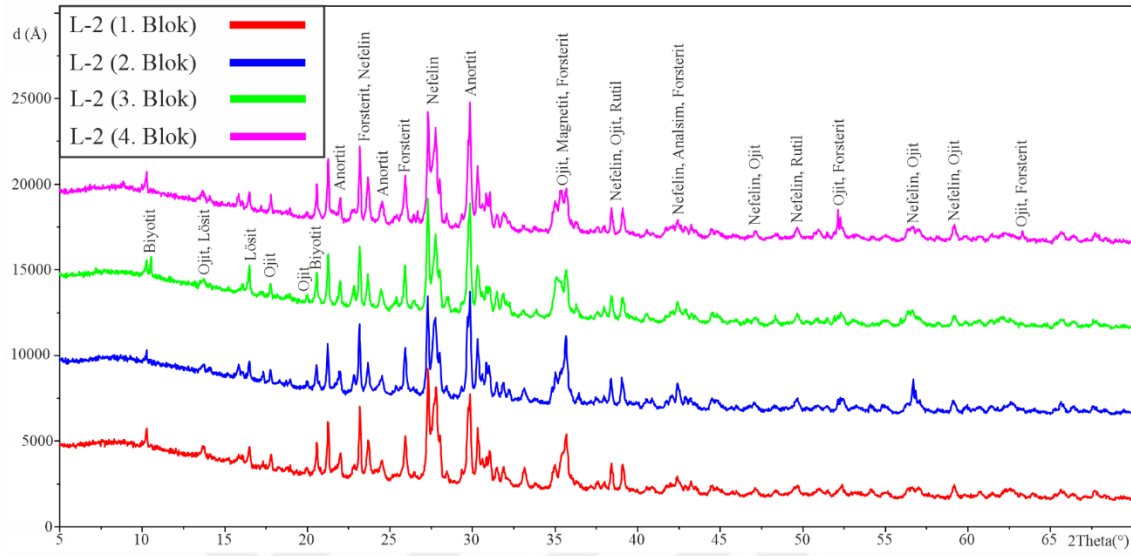
XRD analizleri ile birlikte örneklerdeki majör elementlerinin miktarlarının belirlenebilmesi ve kaya türlerinin tanımlanmasında kullanılabilmesi amacıyla XRF analizleri de gerçekleştirilmiştir. XRF analizlerinde kullanılan örnekler için her bloktan öğütülen örnekler %60 lityum tetraborat, %40 lityum metaborat katkılı x-ray akışkanı ve amonyum iyot tableti ile karıştırılarak eritilmiş (Şekil 5.14) ve sonrasında XRF analizleri Malvern PANalytical Axios mAX (Şekil 5.15), ateşte kayıp analizleri de Nabertherm marka fırın kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.16). XRF ve ateşte kayıp analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar ise Çizelge 5.2'de verilmiştir.



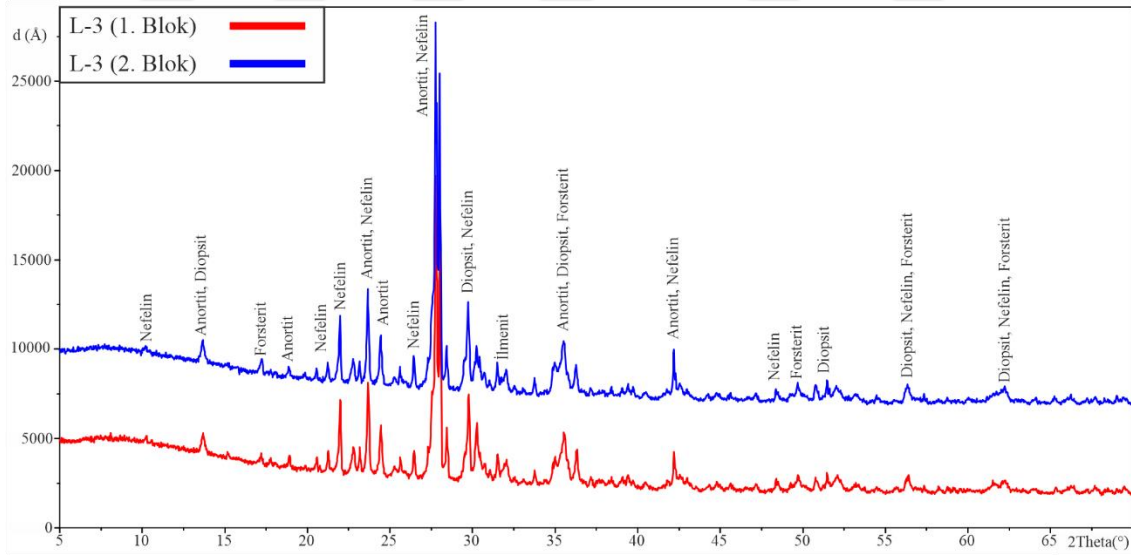
Şekil 5.9. XRD analizlerinde kullanılan Malvern PANaltical Empyrean model cihaz.



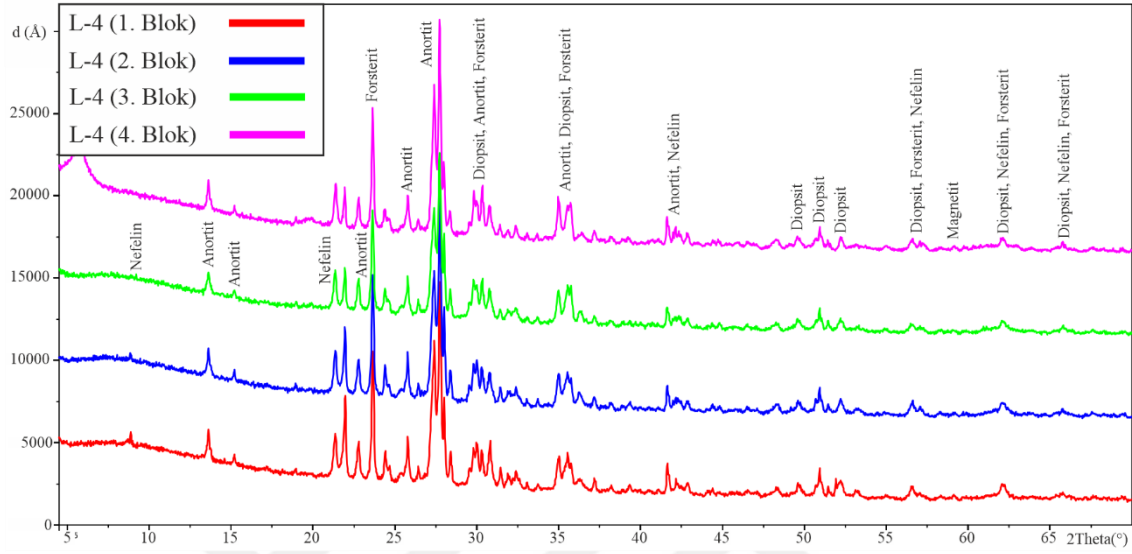
Şekil 5.10. L-1'den (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) alınan 2 bloğun XRD analizi sonuçları.



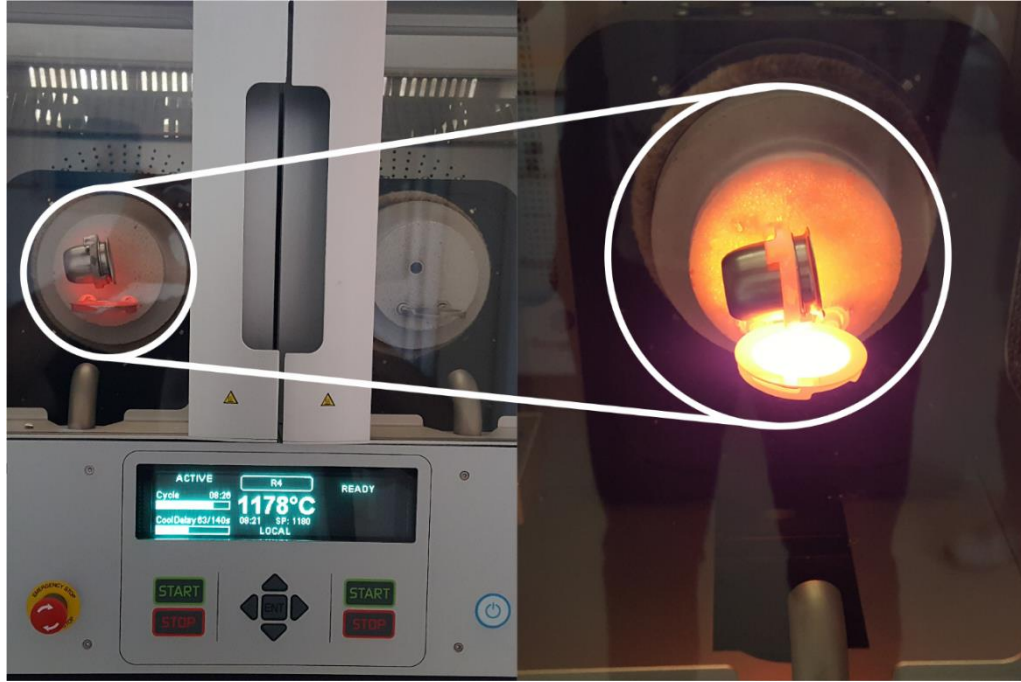
Şekil 5.11. L-2'den (Kula Volkanik Jeoparkı) alınan 4 bloğun XRD analizi sonuçları.



Şekil 5.12. L-3'ten (Köşk bölgesi) alınan 2 bloğun XRD analizi sonuçları.



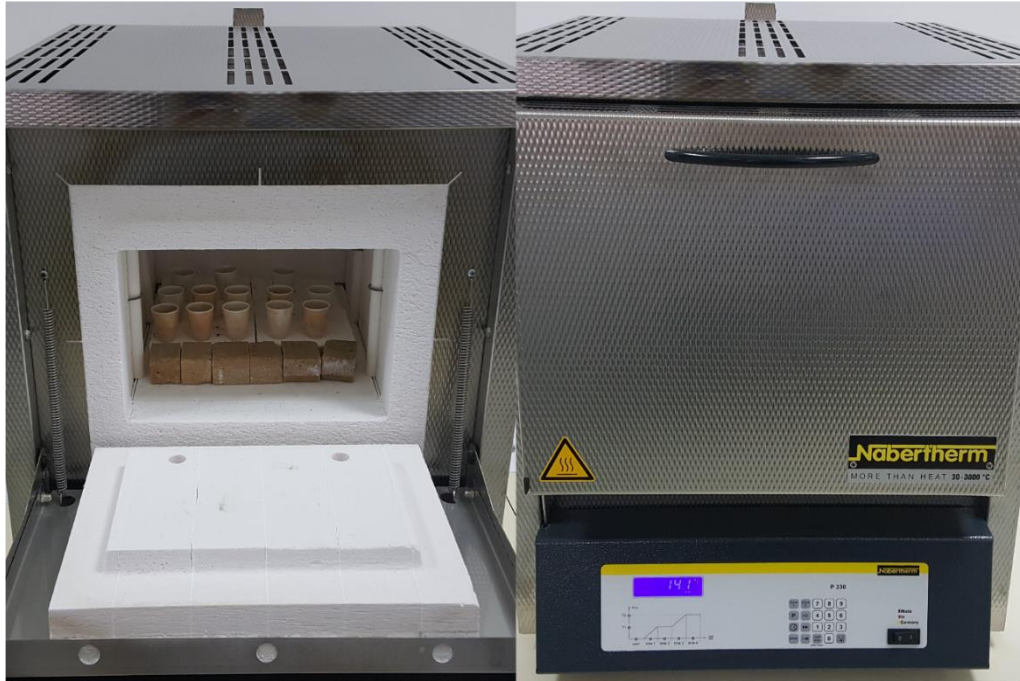
Şekil 5.13. L-4'den (Naşa bölgesi) alınan 4 bloğun XRD analizi sonuçları.



Şekil 5.14. Örneğin XRF analizleri için eritilmesi.



Şekil 5.15. XRF analizleri için kullanılan Malvern PANalytical Axios mAX model cihaz.



Şekil 5.16. Ateşte kayıp analizleri için kullanılan Nabertherm marka fırın.

Çizelge 5.1. Rietveld metoduna yarı-kantitatif analizler sonucunda belirlenen mineral yüzdeleri.

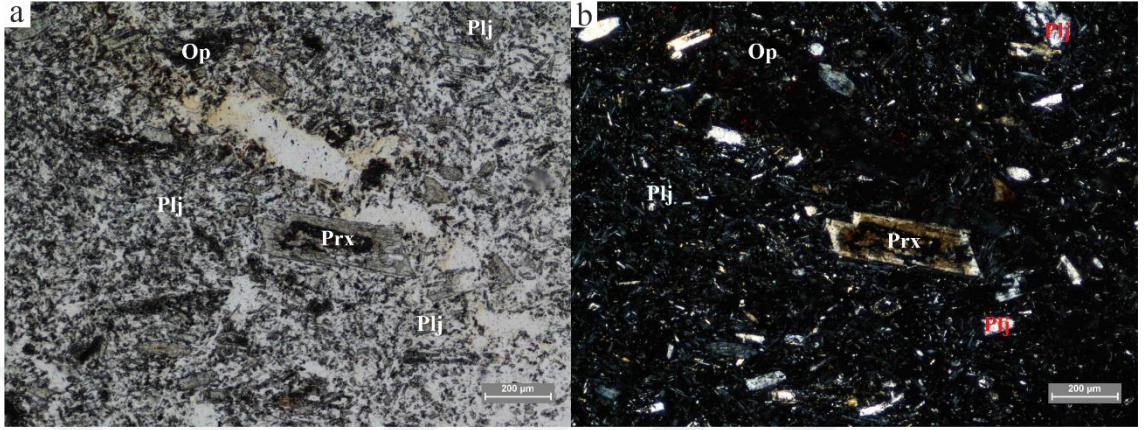
Lokasyon-1 (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları)					
Mineral Yüzdesi (%)	H-1	H-2			
	(1. Blok)	(2. Blok)			
Dolomit	98	99			
Kalsit	2	1			
Lokasyon-2 (Kula Volkanik Jeoparkı)					
Mineral Yüzdesi (%)	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5
	(1. Blok)	(2. Blok)	(3. Blok)	(4. Blok)	(5. Blok)
Analsim		12			
Anortit		22	30	39	17
Anortoklas					24
Apatit					6
Bitovnit	38				
Biyotit				3	
Forsterit		8			
Lösit	25				
Magnesihornblend	12				
Magnetit	2	2	2		5
Nefelin		24	24	38	14
Ojit	23	27	23	20	17
Olivin			1		6
Prenhit			20		
Rutil		5			
Titanit					10
Lokasyon-3 (Köşk bölgesi)					
Mineral Yüzdesi (%)	M-1	M-2			
	(1. Blok)	(2. Blok)			
Anortit	81	68			
Forsterit	5	4			
İlmenit	1				
Magnetit	4	9			
Nefelin	9	8			
Ojit		10			
Titanomagnetit		1			
Lokasyon-4 (Naşa bölgesi)					
Mineral Yüzdesi (%)	N-1	N-2	N-3	N-4	
	(1. Blok)	(2. Blok)	(3. Blok)	(4. Blok)	
Anortit	39	50	50	50	
Biyotit	5	3			
Hedenberjit	5	4			
Ojit	6	7	10	9	
Ortoklas	45	36	40	41	

Çizelge 5.2. XRF analizleri sonucunda belirlenen bileşik oranları (%).

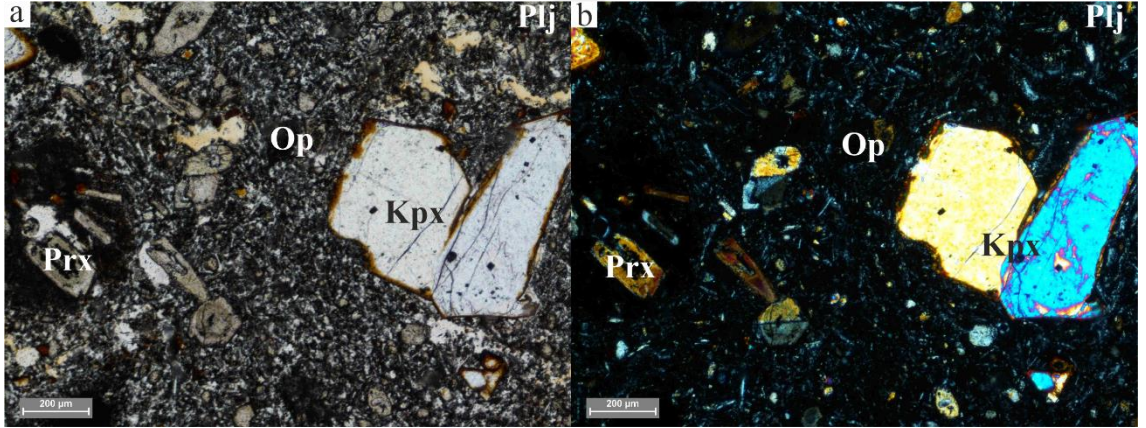
	CaO	MgO	SiO ₂	F ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SrO	K ₂ O	Cl	MnO	TiO ₂
L-1													
1. Blok	31,77	19,90	0,54	0,36	0,18	0,16	0,09	0,09	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04
L-1													
2. Blok	31,23	20,50	0,63	0,32	0,25	0,13	0,06	0,07	0,05	0,05		0,05	
L-2													
1. Blok	7,11	4,80	46,43	8,67	18,73	0,05	0,75	5,89	0,13	3,99	0,12	0,17	
L-2													
2. Blok	9,13	6,74	44,01	9,26	17,62	0,04	1,03	5,43	0,15	3,18	0,12	0,19	
L-2													
3. Blok	8,70	6,98	44,89	9,20	17,70	0,06	0,86	5,34	0,13	3,79	0,11	0,15	
L-2													
4. Blok	8,23	5,85	46,04	9,65	17,71	0,04	0,70	5,50		3,49	0,12	0,20	
L-2													
5. Blok	8,40	6,30	45,66	9,07	18,07	0,09	0,86	5,33	0,12	3,73	0,07	0,15	
L-3													
1. Blok	8,30	6,85	45,31	14,34	17,20	0,02	0,50	4,21		0,86	0,07	0,22	2,26
L-3													
2. Blok	8,17	6,87	45,25	14,48	16,92		0,50	4,13	0,07	0,89	0,06	0,18	2,32
L-4													
1. Blok	6,80	5,18	53,90	8,04	15,57	0,05	0,76	2,82	0,09	4,55	0,08	0,12	1,27
L-4													
2. Blok	6,61	5,04	53,70	8,10	15,79	0,03	0,82	2,78	0,09	4,44	0,10	0,13	1,31
L-4													
3. Blok	6,78	4,83	52,81	7,89	15,98	0,03	0,78	2,63		4,58	0,10	0,12	1,35
L-4													
4. Blok	7,09	4,06	51,56	7,84	15,94		0,74	2,72		4,16	0,07	0,13	1,21

5.2.3. İnce Kesit Çalışmaları

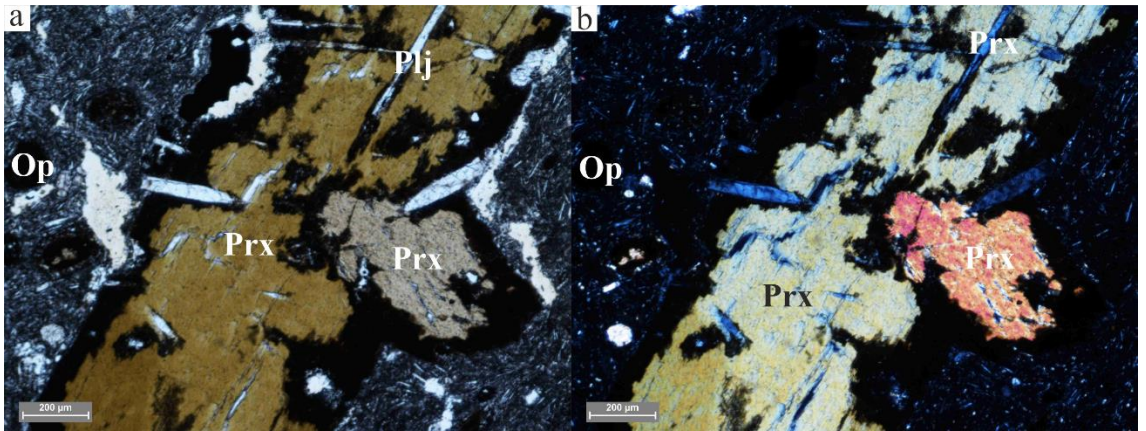
Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan blok örneklerin kayaç gruplarının tanımlanması için XRD, XRF ve ateşte kayıp analizlerinin yanı sıra yine her bloğun bozunmamış yüzeylerinden alınan örneklerden Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Struers Discoplan-TS marka cihaz kullanılarak ince kesit hazırlama çalışmalarında kullanılmak üzere çipler çıkarılmıştır. Her bloktan alınan bozunmamış yüzeylerden çıkarılan çiplerin ince kesit haline getirilmesi ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. 4 farklı lokasyondan alınan 12 blok örneğe ait olan ince kesitler Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Nikon Eclipse E200 LED marka alttan aydınlatmalı polarizan mikroskop kullanılarak incelenmiş, tek ve çift nikol altında mineral tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 5.17 - 5.26). L-2, L-3 ve L-4'den alınan tüm blokların volkanik kayaçlarda görülen doku özelliklerini gösterdiği ve mineralleri içerdiği ince kesit çalışmaları ile belirlenmiştir. Volkanik kayaçlarda gözlenen piroksen, klino-piroksen, plajiyoklas (zonlu, mikro) ve opak mineraller tüm kesitlerde net bir şekilde belirlenmiş ve tanımlanmıştır. L-1'den alınan bloklar üzerinde yapılan XRD ve XRF analizleri sonucunda bu örneklerdeki dolomit miktarının %98-99 oranında olması nedeniyle ve bu oranın tanımlama yapılabilmesi için yeterli olması nedeniyle ince kesit analizleri yapılmamıştır.



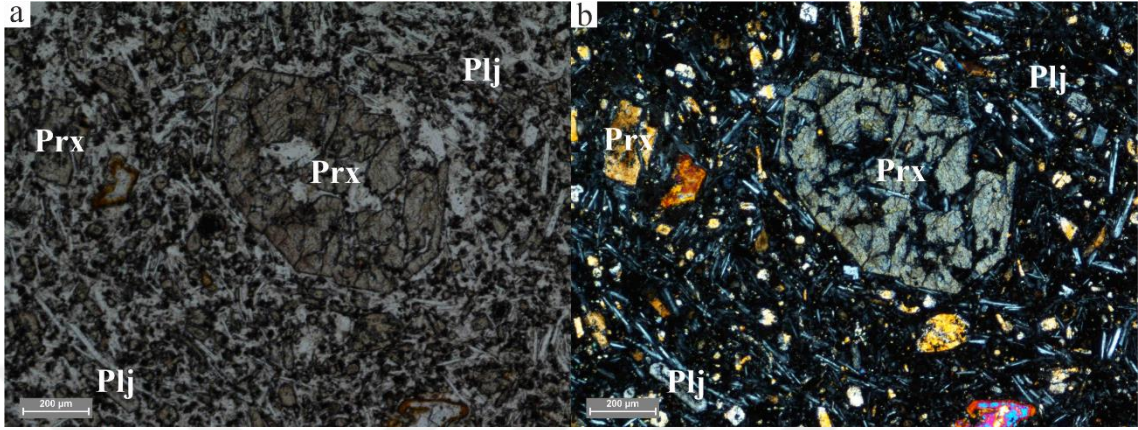
Şekil 5.17. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen, Op: Opak mineraller).



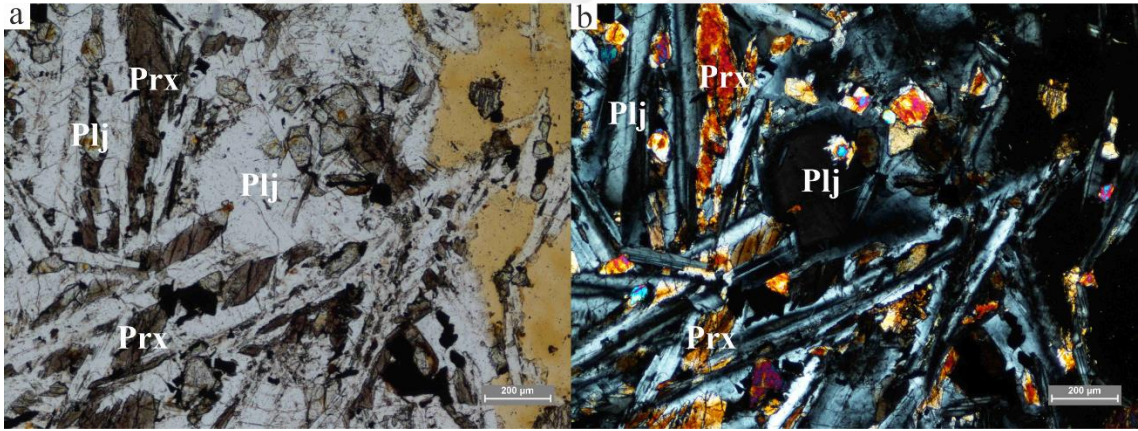
Şekil 5.18. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx Pirokse, Kpx: Klino-Piroksen, Op: Opak mineraller).



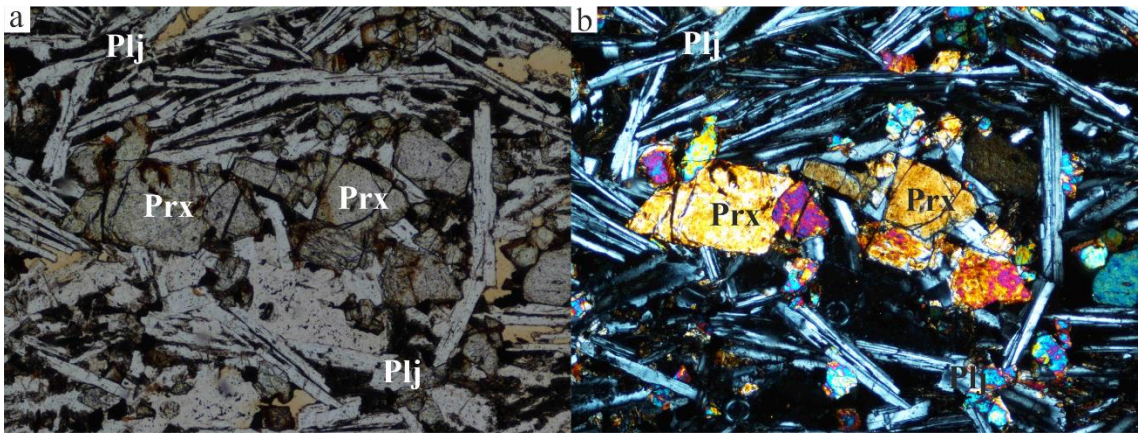
Şekil 5.19. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 3. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen, Op: Opak mineraller).



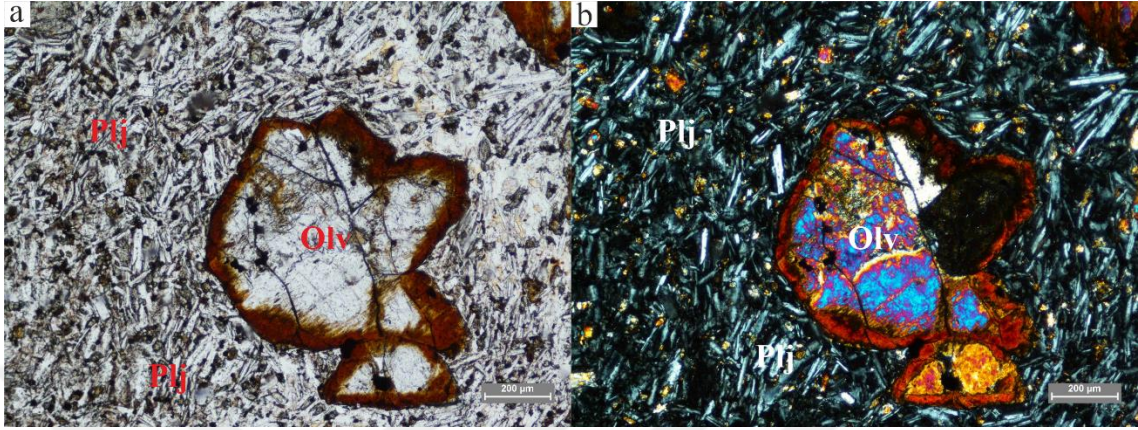
Şekil 5.20. L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan 4. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).



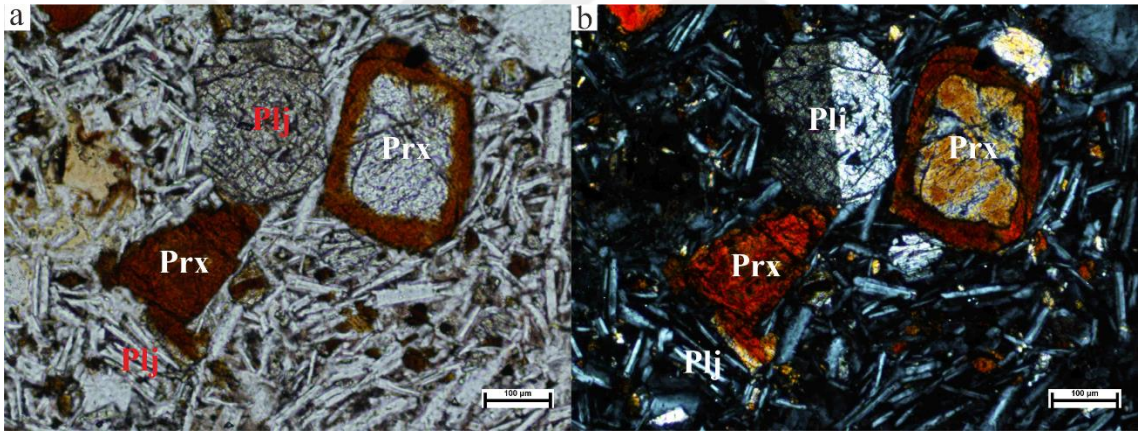
Şekil 5.21. L-3 (Köşk bölgesi) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).



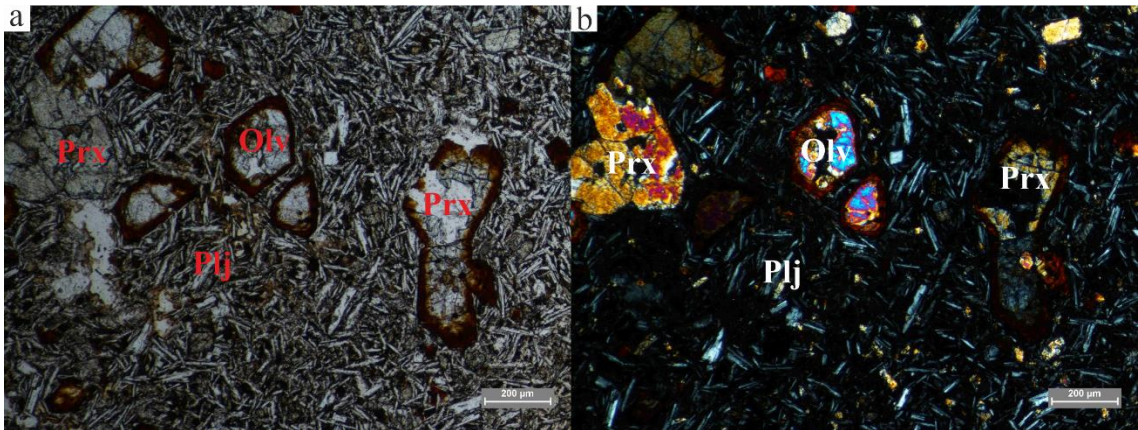
Şekil 5.22. L-3 (Köşk bölgesi) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Plj: Plajiyoklas, Prx: Piroksen).



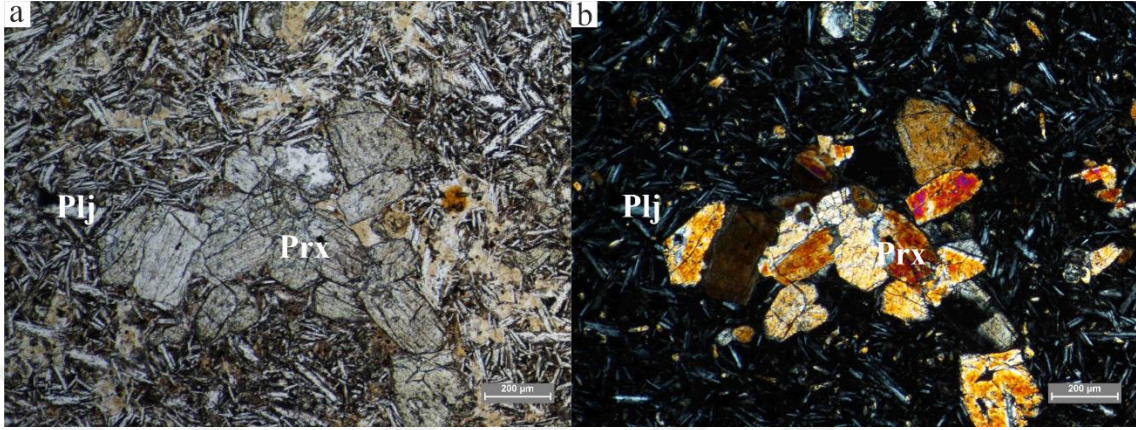
Şekil 5.23. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 1. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Olv: Olivin, Plj: Plajiyoklas).



Şekil 5.24. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 2. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).



Şekil 5.25. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 3. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).

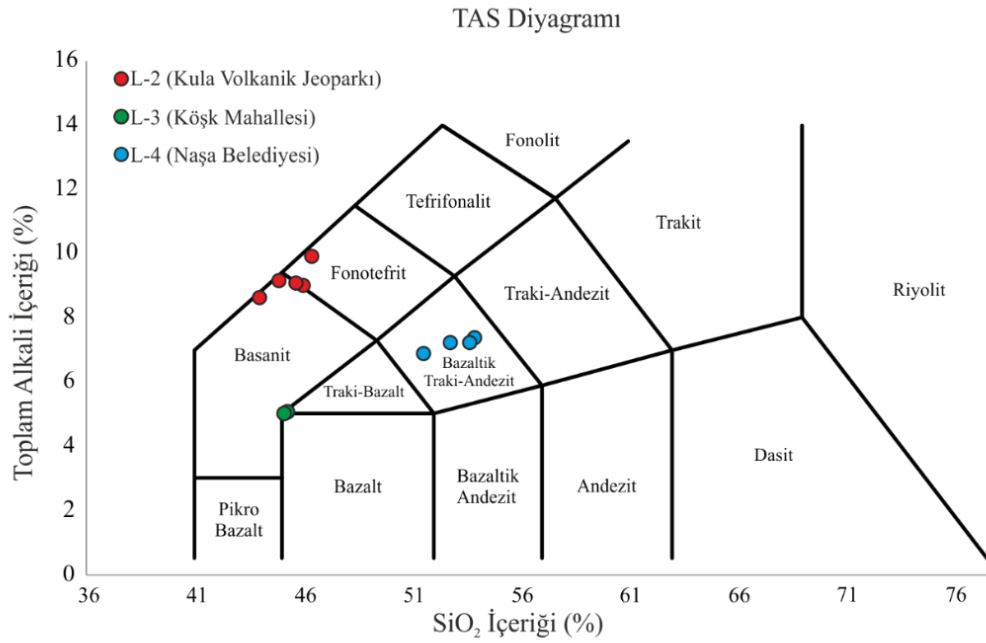
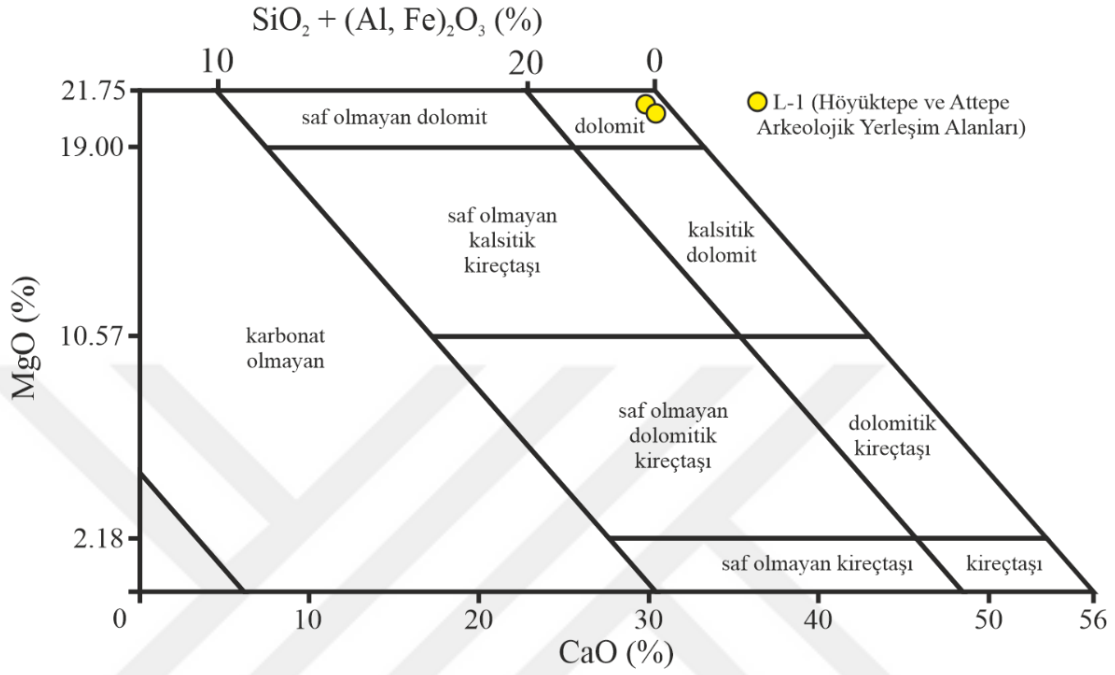


Şekil 5.26. L-4 (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan 4. Blok örneğin ince kesit görüntüleri (a: Tek nikol, b: Çift nikol, Prx: Piroksen, Plj: Plajiyoklas).

5.2.4. Kaya türlerinin belirlenmesi

Kaya türlerinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan XRD, XRF ve ince kesit inceleme çalışmaları sonucunda 4 farklı lokasyondan alınan her bir blok (12 adet) için ayrı ayrı kaya türü tanımlaması yapılmıştır. Kaya türlerinin tanımlanması için yapılan çalışmalar sonucunda L-1 (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) lokasyonundan alınan blokların sedimanter kayalardan olması nedeniyle Krumbein ve Sloss (1963) tarafından önerilen ve kayanın içeriği CaO, MgO ve $\text{SiO}_2 + (\text{Al,Fe})_2\text{O}_3$ miktarlarını dikkate alan kimyasal sınıflama kullanılmıştır. Önerilen sınıflama sistemi kullanılarak yapılan sınıflandırmaya göre L-1'den (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) alınan bloklar dolomit olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.27).

Diğer lokasyonlardan alınan örneklerin volkanik kökenli olmasından dolayı bu kaya bloklarının sınıflandırılması için alkali ve silika içeriği arasındaki ilişkinin kullanıldığı Toplam Alkali Sınıflaması (TAS) tercih edilmiştir. Bu sınıflama yönteminde kaya türünün belirlenmesi için örneğin içerdiği SiO_2 ve $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ miktarları dikkate alınmaktadır. TAS kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonundan alınan bloklar Fonotefrit ve Basanit, L-3'den (Köşk bölgesi) alınan bloklar Traki-Bazalt - Bazalt - Basanit ve L-4'den (Naşa bölgesi) lokasyonundan alınan bloklar ise Bazaltik Traki-Andezit olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 5.28).



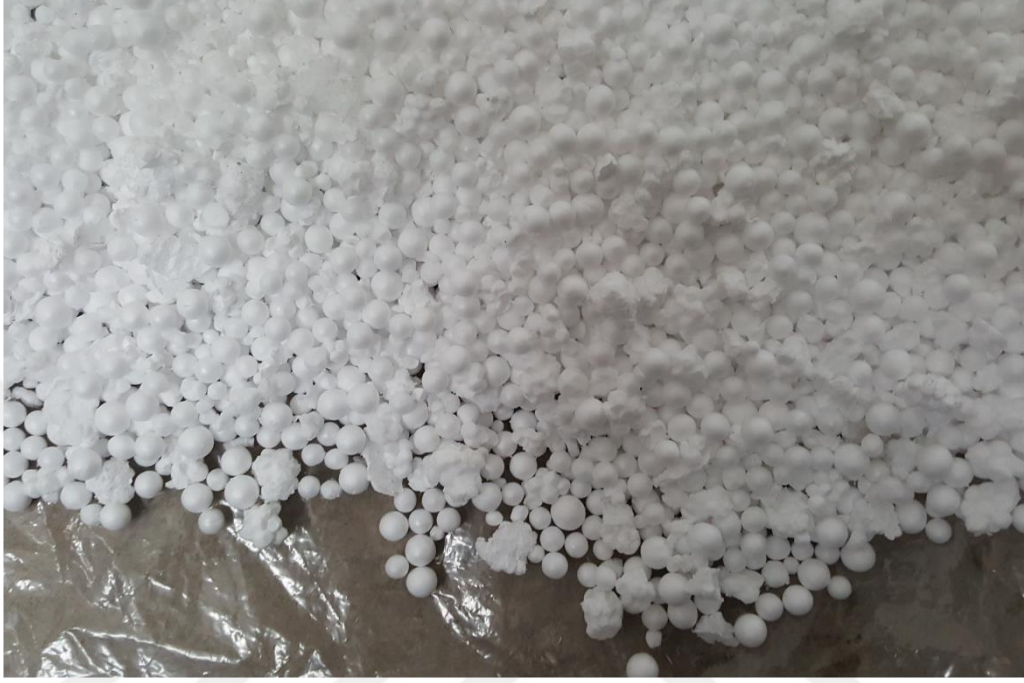
5.3. Yapay Örneklerin Hazırlanması

Kaya birimlerinin içerisinde bulunan boşlukların düzensiz ve çok sayıda olması nedeniyle ortaya çıkan karmaşık yapının, kayacın dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla elastik davranış sergileyen yapay malzemelerin hazırlanarak, bu yapay örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılarak sonuçlarının yorumlanması kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde boşluk etkisinin anlaşılmasında faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ve tez çalışması kapsamında kullanılan cihazların ölçüm aralıkları da dikkate alınmak suretiyle kaya malzemesinin yenilme davranışına benzer şekilde bir davranış sergilemesi beklenen alçı ve beton örnekleri tercih edilmiştir. Yapay örneklerin hazırlanması aşamasında öncelik sağlam kaya malzemesini temsil edeceği düşünülen boşluksuz ve çatlaksız yapıdaki alçı ve beton örneklerinin hazırlanmıştır. Boşluklu kaya malzemesini temsil edecek olan boşluklu yapay malzemelerde doğal boşlukları temsil etmesi için dayanımı ihmal edilebilir derecede düşük olan, farklı çaplardaki straforlar (köpük) kullanılmıştır (Şekil 5.29). Straforlar belirlenen karışım oranlarına göre örnek aşamasında harcın içine katılarak karışım içinde dağılması sağlanmış ve bu sayede kaya malzemesi içinde rasgele dağılım gösteren boşluklara benzer bir yapı elde edilmiştir. Hem alçı hem de beton örneklerin hazırlanma aşamasında kullanılan alçı tozu-su ve çimento tozu-su karışım oranlarına karar verilebilmesi boşlukları temsil ettiği kabul edilen straforların yapay örnek için dağılım gösterdiği oranların belirlenebilmesi için farklı karışım oranlarında yapay örnekler hazırlanmıştır. Bu yaklaşım doğrultusunda alçı tozu-su karışımı kullanılarak hazırlanan örneklerden karışım durumlarına ilişkin olarak Çizelge 5.3'te verilen sonuçlara göre yapay olarak hazırlanan alçı örneklerinin %60 alçı tozu ve %40 su karışımı içermesi gerektiğine kadar verilmiştir. Bu karışım oranı belirlenirken alçı içerisinde straforların homojen dağılacığı karışım oranı özellikle seçilmiştir. Diğer karışım oranlarında ise straforlar genellikle yoğunluk farkından dolayı karışımın yüzeyinde birikmiş ve bir dağılım elde edilememiştir. %70 alçı tozu ve %30 su karışımında ise karışım çok sert bir yapıda olmuş ve bu nedenle de straforlar örnek içinde dağılım göstermiştir. Farklı karışım oranlarında straforların örnek içindeki dağılımları Şekil 5.30'de verilmiş olup tüm alçı örnekleri için %60 alçı tozu ve %40 su karışım oranı tercih edilmiştir. Karışım oranına karar verilen alçı örnekleri için hem boşluksuz hem de boşluklu olacak şekilde 5'er adet örnek hazırlanmış ve örneklerin tamamen sertleşmesi için 30 gün süreyle oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. 30 günlük sürenin altında hem boşluksuz hem de boşluklu olan alçı örnekleri üzerinde tek eksenli

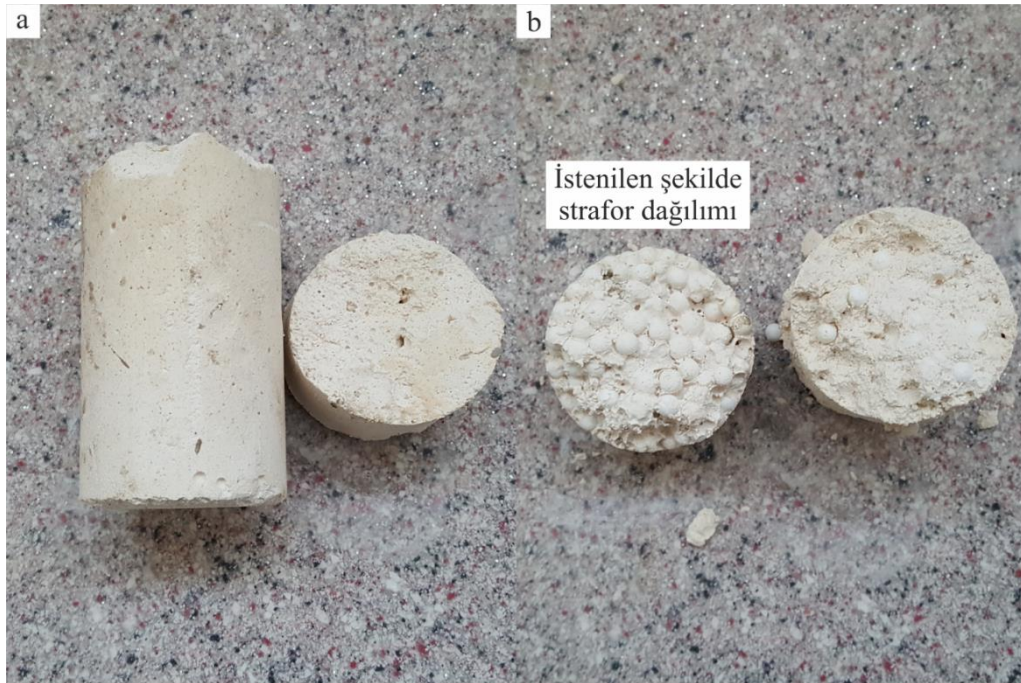
sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda alçı örneklerin hem boşluksuz hem de boşluklar olanları için elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen dayanım değerleri 1 MPa'ın altında çıkmıştır. Yapılan bu deneylerde alçı örneklerin yenilmesi örneğin içindeki gerilim yoğunlaşması noktalarında oluşan çatlakların ilerlemesi ile değil örnekteki mikro boşlukların ezilerek kapanması sonucunda meydana gelmesi şeklinde gerçekleşmiştir. Dayanım değerinin bu denli düşük çıkmasının en önemli nedeni ise 30 günlük kuruma süresinin sonunda dahi örneklerin iç kısımlarındaki alçının tam olarak kurumaması ve sert bir kıvam kazanamamasıdır. Özellikle alçı örneklerinin kuruması için etüv kullanılmaktan malzeme yapısının bozulması riski söz konusu olduğu için kaçınılmıştır. Alçı örneklerinde Bu nedenle alçı örneklerin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde boşluk özelliklerinin etkisinin araştırılmasında yardımcı bir örnek olarak kullanılmasından vazgeçilmiştir. Yapay örneklerin seçilmesi aşamasında ikinci olarak belirlenen beton örnekleri üzerinde yapılan çalışmalar alçı örneklerinin hazırlanmasına benzer şekilde yürütülmüştür. Beton örneklerde de alçı örneklerinde olduğu gibi benzer şekilde Çizelge 5.4'te verildiği şekilde farklı karışım oranlarında örnekler hazırlanmış ve örnek içinde elde edilen strafor dağılımlarına göre uygun karışım oranına karar verilmiştir (Şekil 5.31). Beton örneklerin hazırlanması sırasında çimento tozu olarak 32,5 R - Portland kompoze çimento seçilmiştir. Bununla birlikte beton örneklerin hazırlanması aşamasında örnek boyutlarının da küçük olması ve boşluksuz yapının tam yansıtılabilmesi amacıyla kum kullanılmamıştır. Bu sayede strafor kullanılarak hazırlanan boşluklu örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde boşluk etkisinin tam olarak anlaşılması ve kum kullanılması durumunda meydana gelebilecek olan daha küçük boşlukların etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Çimento tozu - su karışımının her defasında aynı şekilde hazırlanması ve hazırlama yönteminden kaynaklı hataların en aza indirilebilmesi için bir akış şeması oluşturulmuştur.

Çizelge 5.3. Farklı alçı tozu - su karışım oranlarına göre elde edilen sonuçlar.

Alçı tozu oranı	Su oranı	Karışım durumu	Strafor dağılımı
% 30	% 70	Su oranı çok fazla	Yüzeyde birikim
% 40	% 60	Su oranı fazla	Yüzeyde birikim
% 50	% 50	İdeal karışım	Yüzeyde birikim
% 60	% 40	İdeal karışım	İdeal dağılım
% 70	% 30	Çok fazla katı malzeme	-

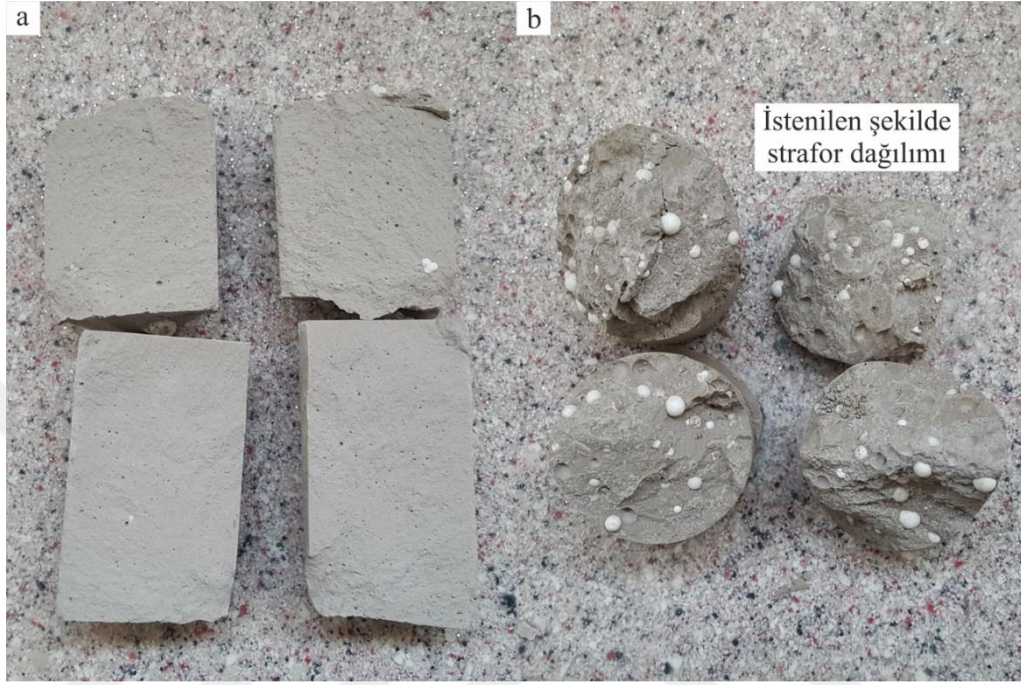


Şekil 5.29. Yapay örneklerde boşlukları temsil etmek için kullanılan farklı çaplardaki straforlar.



Şekil 5.30. (a) Alçı örneklerinde straforların örnek içinde dağılım göstermediği ve (b) istenilen şekilde dağılım gösterdiği örnek.

Hazırlanan her örnek için Çizelge 5.5'te verilen akış takip edilmiştir. Örnek hazırlamada ilk aşamada 350 gr suya ise 650 gr çimento tozu eklenmiştir. Bu işlem toplam 3 defa olacak şekilde tekrarlanmış ve karışım oluşturulmuştur. Karıştırma işlemi için IKA RW-20 model mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Karışım hazırlanırken çimento tozu miktarının 1950 gr, su miktarının ise 1050 gr olmasına dikkat edilmiştir. Bu miktarın üzerinde bir karışım olması durumunda homojen bir karışımın elde edilmesi zorlaşmaktadır. Çimento tozu - su karışımı hazırlanırken karışımın herhangi bir yerinde topaklanma, kuruma, birikme olmamasına özellikle dikkat edilmiştir. Strafor içeren örneklerde ise straforların eklenmesinden sonra karışım içinde dağılım göstermesi için 5 dakika süreyle 2000 d/dk hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan karışımların 24 saat süreyle kurumaya (prizlenme) bırakılabilmesi için 54 mm çapında ve 175 mm boyunda polikarbondan üretilen örnek hücreleri kullanılmıştır (Şekil 5.32). Hazırlanan karışım örnek hücrelerine huni yardımıyla aktarılmıştır. Örnek hücrelerinde karışımın prizlenmesi aşamasında herhangi bir deformasyon veya çapta değişim meydana gelip gelmediği düzenli olarak kontrol edilmiştir. Örnek hücrelerine aktarılan karışımlarda hazırlama aşamasında hapsolmuş olması muhtemel hava kabarcıklarının ortamdaki uzaklaştırılabilmesi amacıyla plastik kaplamalı çekiç ile örnek kabının iki yönü boyunca üç farklı seviyede 5'er defa tokmaklanmış ve ardından da 50 kere şişlenerek ortamdaki hava kabarcıklarının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Strafor kullanılarak hazırlanan boşluklu örneklerde ise karışımın örnek hücresine aktarılması sonrasında straforların örnek içindeki dağılımlarının değişmemesi için tokmaklama ve şişleme işlemi yapılmamıştır. Örneklerin 24 saat süreyle üretilen örnek hücrelerinde prizlenmeye bırakılmasının ardından karot çıkarma ünitesi yardımıyla hücreden alınarak mukavemet kazanabilmeleri için 28 gün süreyle 24°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) su banyosunda bekletilmiştir (Şekil 5.34). Su banyosunda 28 gün süreyle kalan örneklerin yapılacak olan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerine uygun boyutlara getirilmesi için kaya örneklerinde olduğu gibi otomatik karot kesme cihazı kullanılmıştır. Beton örneklerin üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir.



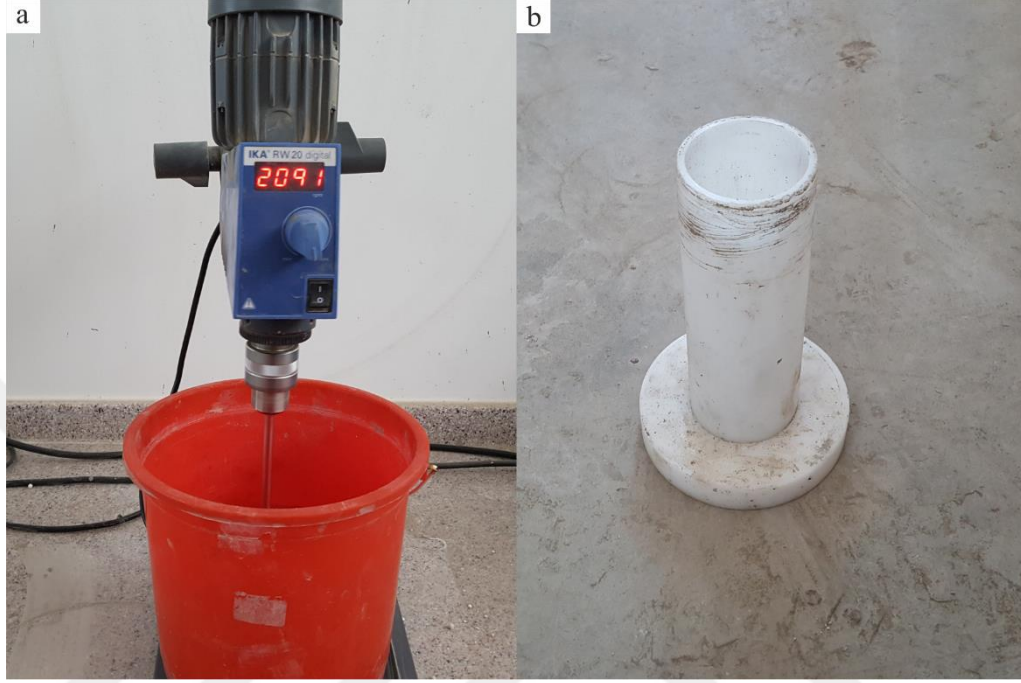
Şekil 5.31. (a) Beton örneklerinde straforların örnek içinde dağılım göstermediği ve (b) istenilen şekilde dağılım gösterdiği örnek.

Çizelge 5.4. Farklı çimento tozu - su oranlarına göre elde edilen sonuçlar.

Çimento tozu oranı	Su oranı	Karışım durumu	Strafor dağılımı
% 30	% 70	Su oranı çok fazla	Yüzeyde birikim
% 40	% 60	Su oranı fazla	Yüzeyde birikim
% 50	% 50	İdeal karışım	Yüzeyde birikim
% 60	% 40	İdeal karışım	Yüzeyde birikim
% 65	% 35	İdeal karışım	İdeal dağılım
% 70	% 30	Çok fazla katı malzeme	-

Çizelge 5.5. Beton örneklerin hazırlanması aşamasında takip edilen adımlar.

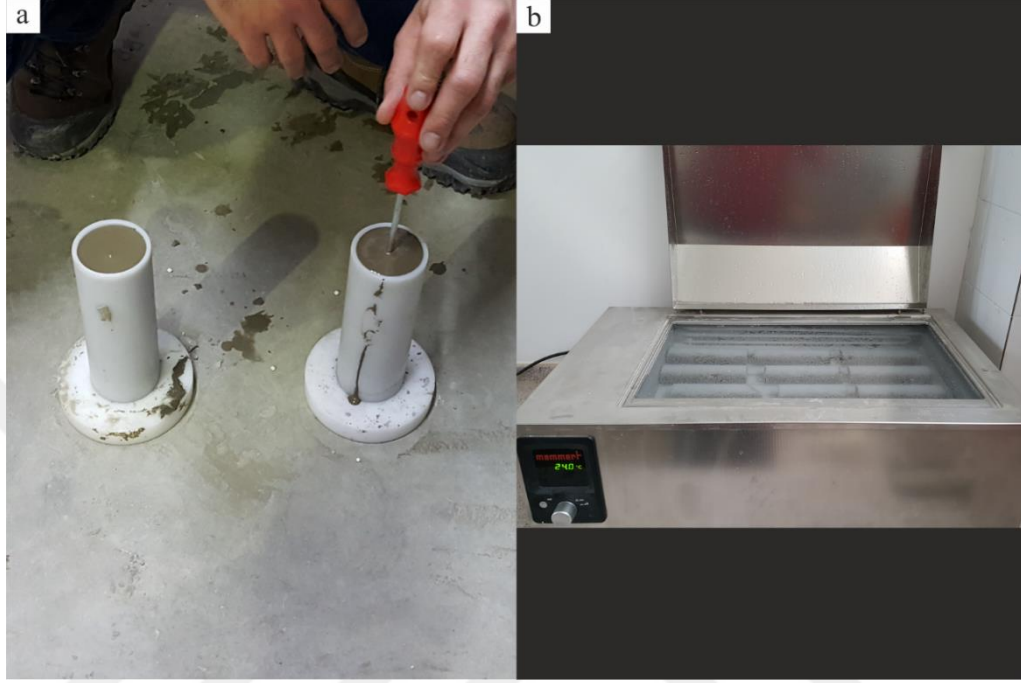
Aşama	Yapılan işlem	Karıştırma süresi
1	350 gr su eklenmesi	1000 d/dk - 1 dakika
2	650 gr çimento tozu eklenmesi	2000 d/dk - 5 dakika
3	350 gr su eklenmesi	1000 d/dk - 1 dakika
4	650 gr çimento tozu eklenmesi	2000 d/dk - 5 dakika
5	350 gr su eklenmesi	1000 d/dk - 1 dakika
6	650 gr çimento tozu eklenmesi	2000 d/dk - 5 dakika
7	Straforların eklenmesi (Boşluklu örnek ise)	2000 d/dk - 5 dakika



Şekil 5.32. Çimento tozu - su karışımının hazırlanması (a), Karışımın döküldüğü polikarbon örnek kalıbı (b)



Şekil 5.33. (a) Hazırlanan karışımın örnek hücre sine aktarılması ve (b) Hapsolmuş baloncukların ortamdan uzaklaştırılması.



Şekil 5.34. (a) Örnek hücrelerine aktarılan karışımın şişlenmesi ve (b) Örneklerin mukavemet kazanması için sabit sıcaklıktaki su banyosunda bekletilmesi.

5.4. Yoğunluk ve Kuru Birim Hacim Ağırlık Değerlerinin Belirlenmesi

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karotların kuru birim hacim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesi için ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem uygun olarak kumpas kullanılmıştır. Örneklerin düşey ve yatay yönde olacak şekilde, düşey yönde 4 farklı eksende, yatay yönde ise karot üstü, ortası ve altı olacak şekilde boy ve çap değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak her karot için karotlar öncelikle 105°C’de etüvde 24 saat kurutulduktan sonra kuru birim hacim ağırlık ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir (Çizelge 5.6). ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemde karot örneklerin kütleleri ile birlikte boy ve çap gibi geometrik özelliklerini dikkate alınarak yoğunluk ve birim hacim değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6. Örneklerin yoğunluk ve birim hacim ağırlık değerlerinin değişim aralıkları.

Lokasyon	Özellik	Değişim Aralığı (Tek eksenli sıkışma)		Değişim Aralığı (Üç eksenli sıkışma)	
		En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek
L-1	Yoğunluk (g/cm ³)	2,18	2,49	2,12	2,54
	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	21,42	24,38	20,84	24,90
L-2	Yoğunluk (g/cm ³)	2,28	2,56	2,66	2,78
	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	22,37	25,15	26,11	27,23
L-3	Yoğunluk (g/cm ³)	2,29	2,52	2,25	2,52
	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	22,43	24,71	22,06	24,75
L-4	Yoğunluk (g/cm ³)	1,70	2,64	1,80	2,62
	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	16,71	25,89	17,63	25,69

5.5. Görünür Gözeneklilik ve Ağırlıkça Su Emme Değerlerinin Belirlenmesi

Baud vd. (2014) tarafından kaya malzemesinin gözeneklilik değeri ile çatlak yoğunluğu özelliklerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisine yönelik olarak yapılan çalışmada gözenekliliğe bağlı olarak meydana gelen çatlak oluşumunun kaya malzemesinin dayanımı üzerinde önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur. Schöpfer vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada ise gözenekliliğin kaya malzemelerinin dayanımı üzerindeki etkisi nümerik yaklaşımlar kullanılarak araştırılmış ve literatürde mevcut olarak yer alan deney sonuçları ile eşleştirilmiştir. Gözeneklilik ve gözenekliliğe bağlı olarak oluşan çatlakların kaya malzemesinin yenilme davranışının doğrudan kontrol etmesi nedeniyle bu değerlerin belirlenmesi son derece önemlidir.

Tez çalışmasının konusunun doğrudan gözeneklilik, çatlak oluşumu ve boşluk özellikleri ile ilgili olması nedeniyle her bir karot örneğinin görünür gözeneklilik değerleri ISRM (2007), ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri ise RILEM (1980) ve TSE (1978) tarafından önerilen yöntemler esas alınarak belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7’de verilmiştir. Her ne kadar Çizelge 5.7’de verilen değerler hesaplanmış olsa da boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasında bu değerlerin örneklerin gözeneklilik değerlerinin birebir yansıtmaması nedeniyle doğrudan yerine yardımcı değerlendirme parametresi olarak dikkate alınmıştır.

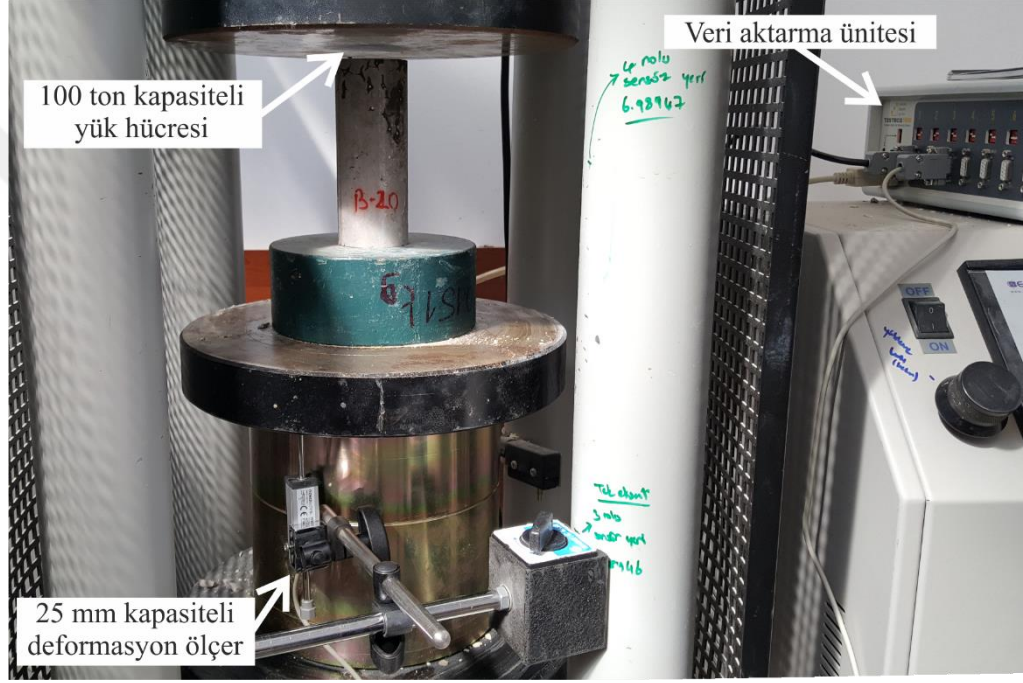
Çizelge 5.7. Örneklerin ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin değişim aralıkları.

Lokasyon	Özellik	Değişim Aralığı (TEŞ* Dayanımı Örnekleri)		Değişim Aralığı (ÜEŞ* Dayanımı Örnekleri)	
		En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek
L-1	Görünür Gözeneklilik (%)	8,88	12,06	3,12	6,16
	Boşluk oranı	0,10	0,14	0,03	0,07
	Ağırlıkça Su Emme	3,94	5,68	1,23	2,62
	Hacimce Su Emme	8,88	12,06	3,12	6,16
L-2	Görünür Gözeneklilik (%)	2,96	5,31	2,79	6,25
	Boşluk oranı	0,03	0,06	0,03	0,07
	Ağırlıkça Su Emme	1,16	2,22	1,10	2,58
	Hacimce Su Emme	2,96	5,31	2,79	6,25
L-3	Görünür Gözeneklilik (%)	5,31	6,43	4,75	5,88
	Boşluk oranı	0,06	0,07	0,05	0,06
	Ağırlıkça Su Emme	2,13	2,74	1,88	2,55
	Hacimce Su Emme	5,31	6,43	4,75	5,88
L-4	Görünür Gözeneklilik (%)	1,65	9,10	1,64	8,06
	Boşluk oranı	0,02	0,10	0,02	0,09
	Ağırlıkça Su Emme	0,63	5,34	0,63	4,33
	Hacimce Su Emme	1,65	9,10	1,64	8,06

5.6. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri ve Elastisite Modülü Tayinleri

Kaya malzemelerinin sınıflandırılmasında ve yenilme davranışlarının değerlendirilmesinde tek eksenli sıkışma deneyi yaygın olarak kullanılan laboratuvar ölçekli bir yöntemdir. Bu tez çalışması kapsamında arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan blok örneklerden elde edilen karot örneklerin bir bölümünde ve hazırlanan yapay (beton) örnekler üzerinde ISRM (2017) tarafından önerilen yöntemle göre tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri bilgisayar kontrollü otomatik sistem aracılığı ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılmıştır (Şekil 5.35). Tüm deneylerde yükleme hızı sabit tutulmuş (1 kN/s) ve örnekte yenilme meydana gelene kadar yüklemeye devam edilmiştir. Yükleme sırasında hem yükleme değerleri hem de düşey yöndeki deformasyon kayıtları her 125 ms'de bir olmak üzere Test Box 1001 veri aktarma ünitesi kullanılarak kaydedilmiştir. Kaydedilen tüm değerler deney sonunda Microsoft Excel yazılımına aktarılarak gerilim-birim deformasyon grafikleri oluşturulmuştur. Deneylere ait olan grafiklerin oluşturulmasından sonra her bir örnek için ayrı ayrı tek eksenli sıkışma dayanımı, tanjant elastisite modülü, ortalama elastisite modülü ve giriş elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Deneylerin önemli bir kısmında belirli aralıklarla fotoğraf çekilerek örnek üzerinde meydana gelen deformasyonlar kayıt altına alınmıştır. Ancak örneklerin büyük bir bölümünün volkanik kökenli ve

yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle örnekte yenilme deneyin son birkaç saniyesinde çok hızlı bir şekilde meydana gelmiştir. Bununla birlikte gözle görülür derecede fazla boşluğa sahip olan örneklerin dış yüzeylerinde yenilmeye neden olan çatlak oluşumu ve ilerlemesinin boşluklardan başladığı deney sırasında gözlenebilmiştir.



Şekil 5.35. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan bilgisayar kontrollü sistem.

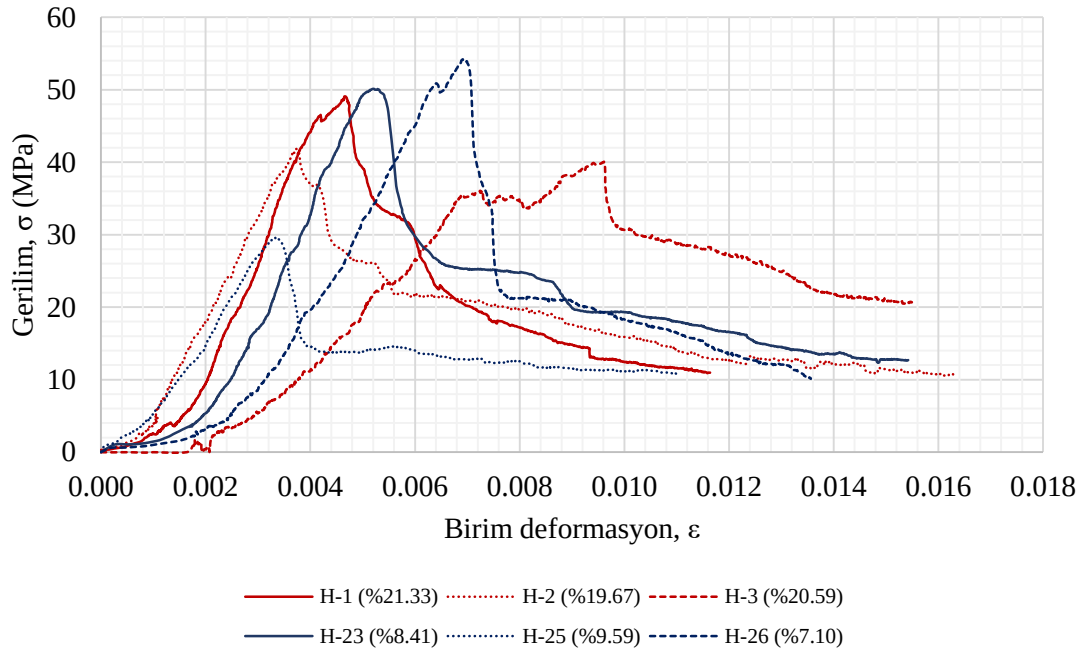
5.6.1. L-1'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri

L-1'den alınan ve farklı boşluk özellikleri gösteren bloklardan çıkarılan karotlardan 6 tanesi üzerinde tek eksen sıkışma dayanımı deneyi yapılmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen dayanım değerleri 29,68-54,19 MPa arasında değişmekte olup hesaplanan elastisite modülü değerleri ile birlikte Çizelge 5.8'de, örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.36'da verilmiştir. Deney yapılan örneklerin görgül boşluk hacmi değerleri 1. bloktan çıkarılanlar için 62,32 ile 69,33 cm³, 2. bloktan çıkarılanlar için ise 22,62 ile 30,80 cm³ arasında değişmektedir. Görgül boşluk hacmi kullanılarak hesaplanan gerçek porozite değerleri ise 1. bloktan örnekler için %9,60 ile 11,55, 2. bloktan alınan örnekler için ise %7,10 ile 9,59 arasında değişmektedir. Söz konusu bu değerlere göre iki bloğun içerdiği boşluk miktarlarının birbirinden farklı olduğu söylenebilir. Ancak sayısal olarak mevcut olan bu farklılığın yanı sıra örneklerdeki

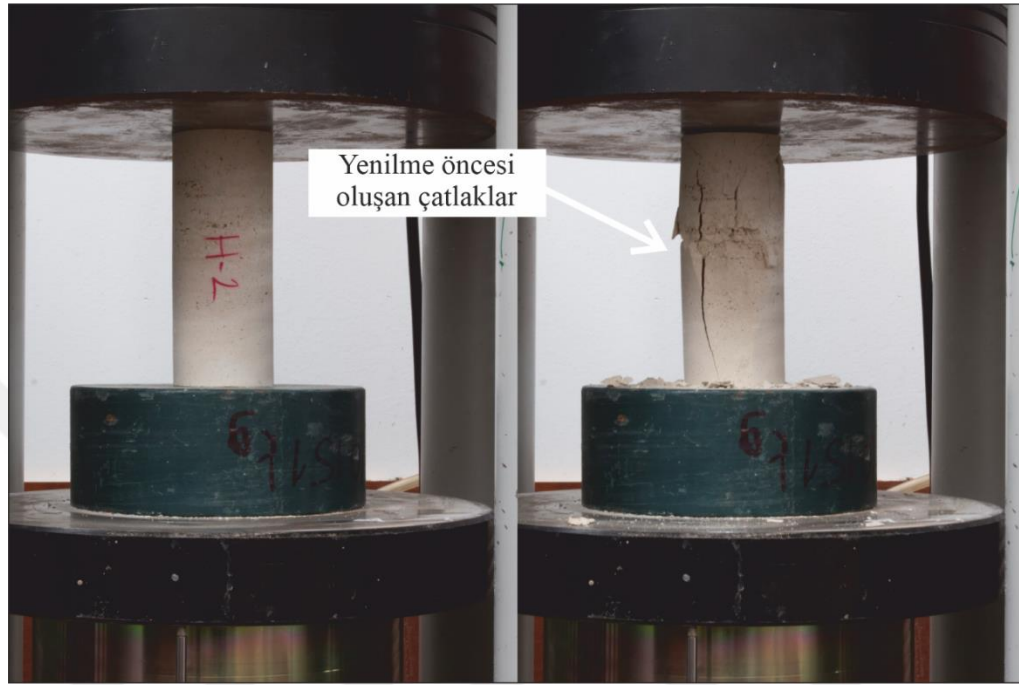
boşluk geometrisi ise oldukça benzerdir. Örneklerin deneyler sırasındaki yenilme davranışı örneklerin belirli bölgelerinde yoğunlaşmış olan küçük boşlukların etrafında oluşan çatlakların yüklemeye paralel yönde ilerlemesi sonucunda meydana gelmiştir (Şekil 5.37). L-1’den alınan örneklerin görgül boşluk hacmi değerleri kullanılarak hesaplanan gerçek porozite değerleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri karşılaştırıldığında 1. ve 2. bloktan alınan örneklerin gerçek porozite değerlerinin birbirinden %10 oranında farklı olduğu görülmektedir (Şekil 5.38). İki bloktan alınan örneklerde gözlenen bu %10’luk gerçek porozite farkına rağmen örneklerin dayanım değerlerinin ciddi oranda farklılaşmadığı veya boşluk özelliklerinin ayırt edici bir dağılım göstermemektedir.

Çizelge 5.8. L-1’den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.

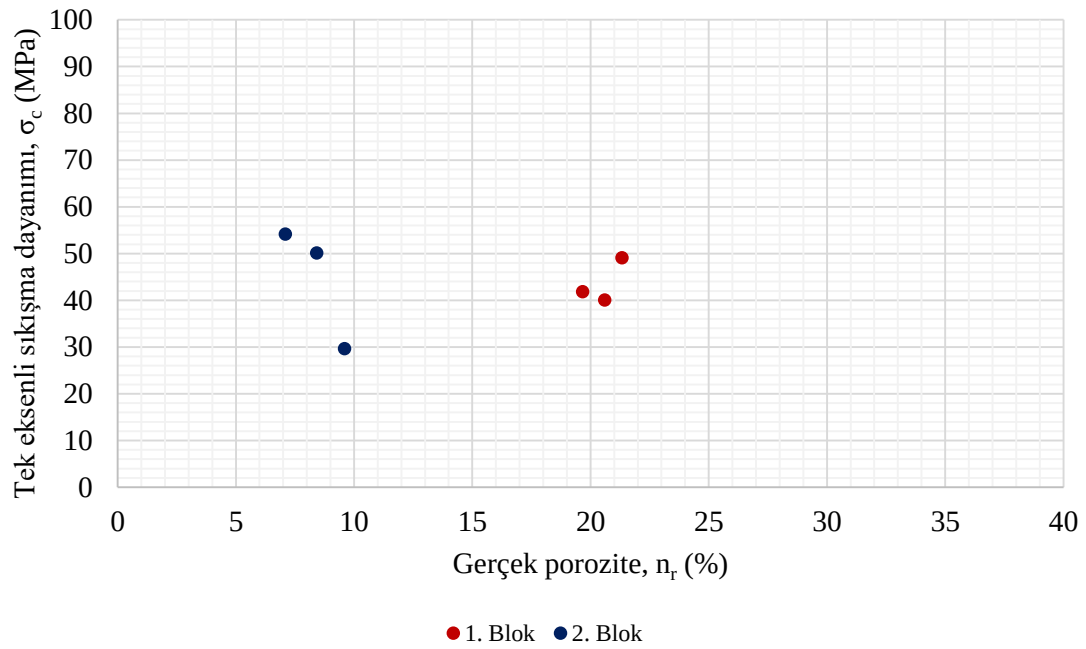
Örnek No	Gerçek porozite (%)	σ_c (MPa)	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)
H-1	21,33	54,19	18,14	18,10	8,50
H-2	19,67	41,82	13,82	13,93	9,36
H-3	20,59	40,07	7,65	7,61	4,35
H-23	8,41	50,11	15,62	15,88	7,20
H-25	9,59	29,68	11,12	11,32	7,44
H-26	7,10	54,19	12,15	12,65	3,56



Şekil 5.36. L-1’den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.



Şekil 5.37. L-1'den alınan H-2 örneğinin çekme gerilmesi etkisinde yenilmesi.



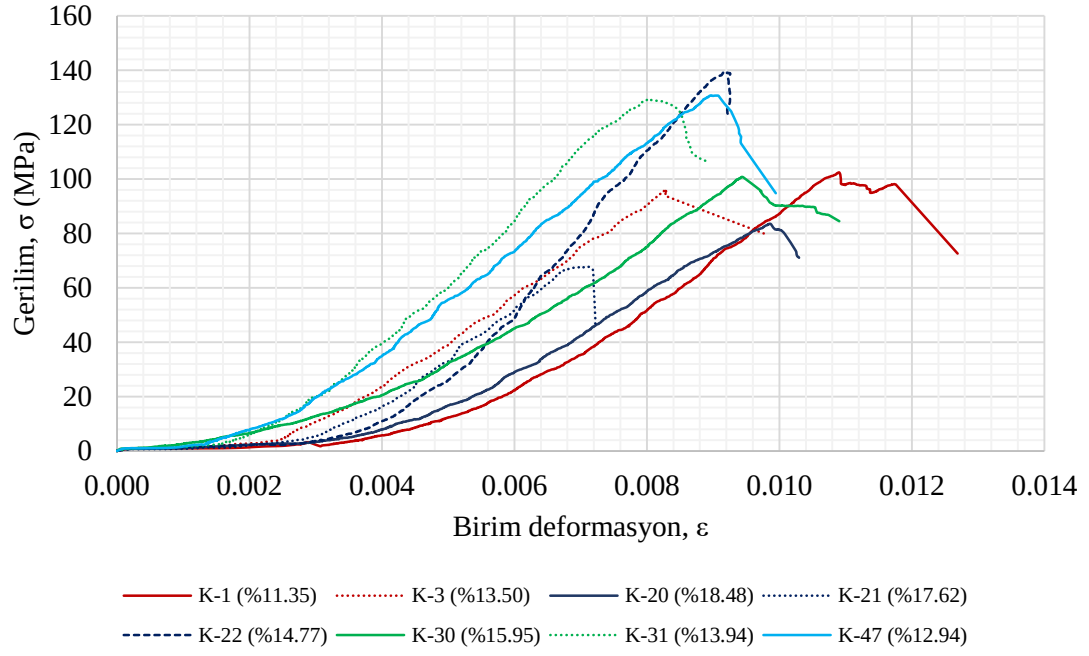
Şekil 5.38. L-1'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.

5.6.2. L-2'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri

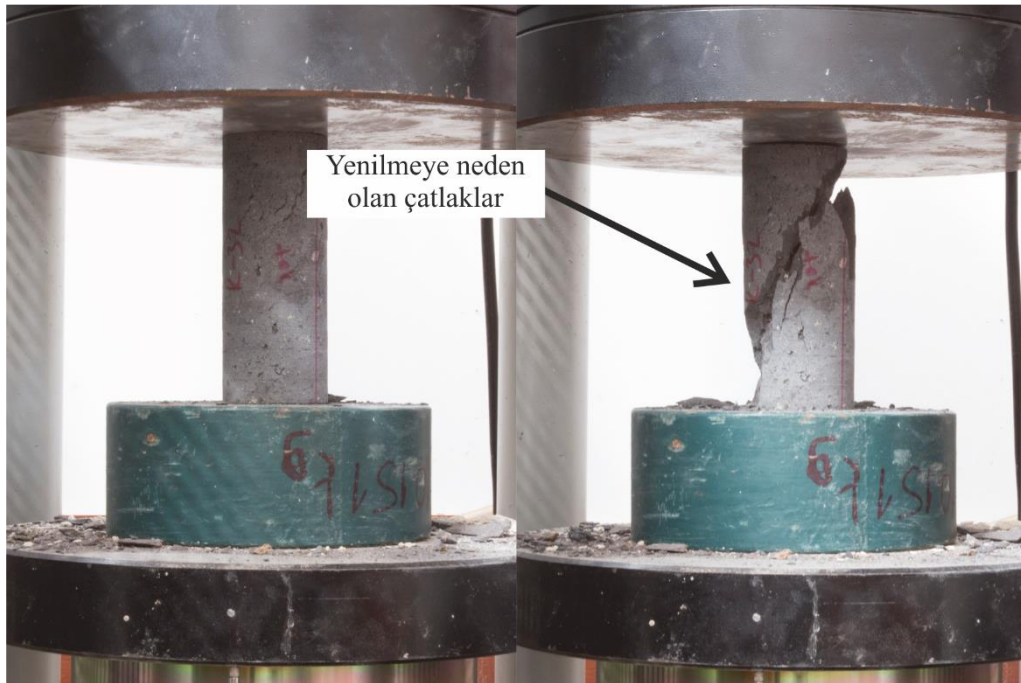
L-2'de alınan 4 farklı bloktan 9 karot örneği üzerinde deformasyon kontrollü olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri 67,84 ile 139,37 MPa arasında değişmekte olup hesaplanan elastisite modülü değerleri ile birlikte Çizelge 5.9'da, örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.38'de verilmiştir. Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında blokların boşluk özellikleri bakımından birbirinden farklı olmasına dikkat edilmiş olsa da 4 farklı bloktan alınan örneklerin gerçek porozite değerleri %11,35 ile 18,48 arasında değişmektedir. Blokların tümü dikkate alındığında toplamda gerçek porozite değerlerinde %7 civarında bir farklılık elde edilebilmiştir. L-2'den alınan örnekler üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sırasında yüklemeye bağlı olarak gerilme birikim alanlarından oluşan birincil çatlaklar makaslama çatlağı şeklinde ilerleme göstererek yenilmeye neden olmuşlardır (Şekil 5.39). Bu lokasyondan alınan örneklerin genç volkanizma ürünleri olması nedeniyle karotlar üzerinde akma izleri de gözlenebilmektedir. Söz konusu bu akma izlerinin çatlak yönelimi üzerinde boşluk etkisinden daha fazla derecede çatlak ilerlemesi üzerinde kontrolü olduğu söylenebilir. Karotlarda deney esnasında yüklemeye bağlı olarak mevcut boşluklardaki gerilme alanlarında oluşan çatlaklar, diğer gerilme alanlarında oluşan çatlaklar yerine akma yönüne bağlı olarak oluşan çatlaklar ile birleşerek yenilmeye neden olacak çatlak sistemlerini oluşturmuşlardır. Örneklerde deney sırasında ise ağırlıklı olarak yenilme L-1'den alınan örneklerde gözlenen yüklemeye paralel şekilde oluşan boyuna (çekme) çatlaklarının aksine makaslama çatlaklarının kontrolünde meydana gelmiştir (Şekil 5.40). L-2'den alınan bloklardan alınan örneklerin Şekil 5.41'de verilen tek eksenli sıkışma dayanımı ve gerçek porozite dağılımları incelendiğinde ayrıştırıcı bir dağılım görülememektedir. Bunun en büyük nedeni ise çatlak ilerlemesinin sonucunda oluşan yenilme davranışının boşluklar ve boşluk özelliklerinin yanı sıra akma izlerinin kontrolünde olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.9. L-2 'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.

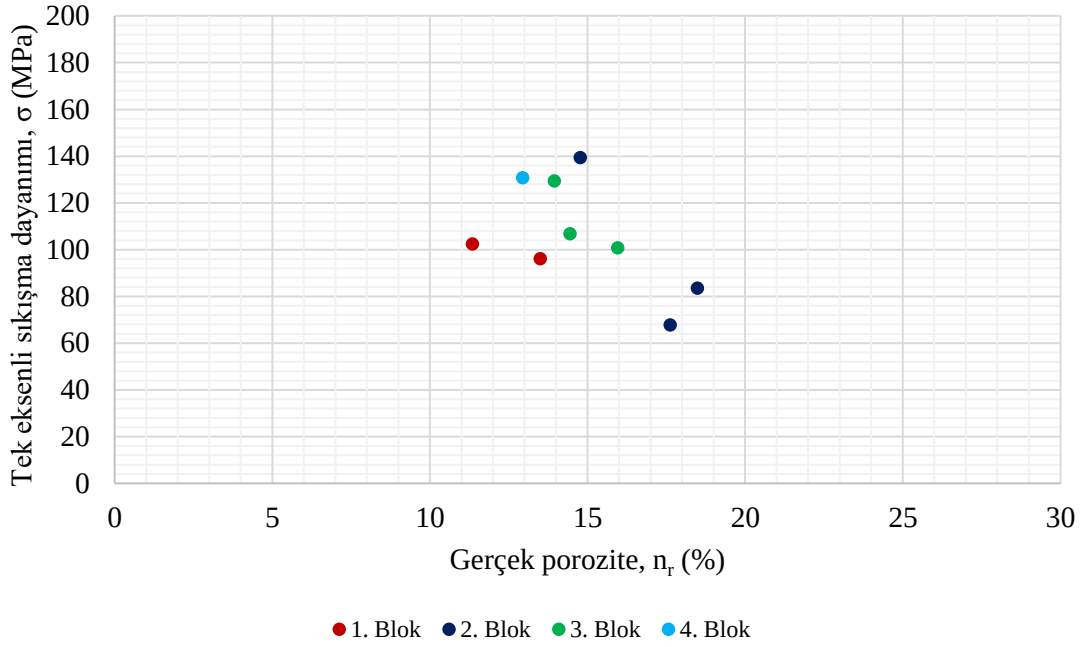
Örnek No	Gerçek Porozite (%)	σ_c (MPa)	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)
K-1	11,35	102,44	16,28	17,73	6,41
K-3	13,50	96,10	16,50	16,50	7,95
K-20	18,48	83,54	14,74	14,53	6,00
K-21	17,62	67,84	20,37	17,83	6,70
K-22	14,77	139,37	32,61	28,71	10,44
K-30	15,95	100,79	14,02	15,99	7,87
K-31	13,94	129,45	23,01	22,71	12,49
K-32	14,45	106,81	14,40	14,33	4,67
K-47	12,94	130,80	19,73	18,95	11,65



Şekil 5.39. L-2'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.



Şekil 5.40. L-2'den alınan K-32 örneğinin makaslama gerilmesi etkisinde yenilmesi.



Şekil 5.41. L-2'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.

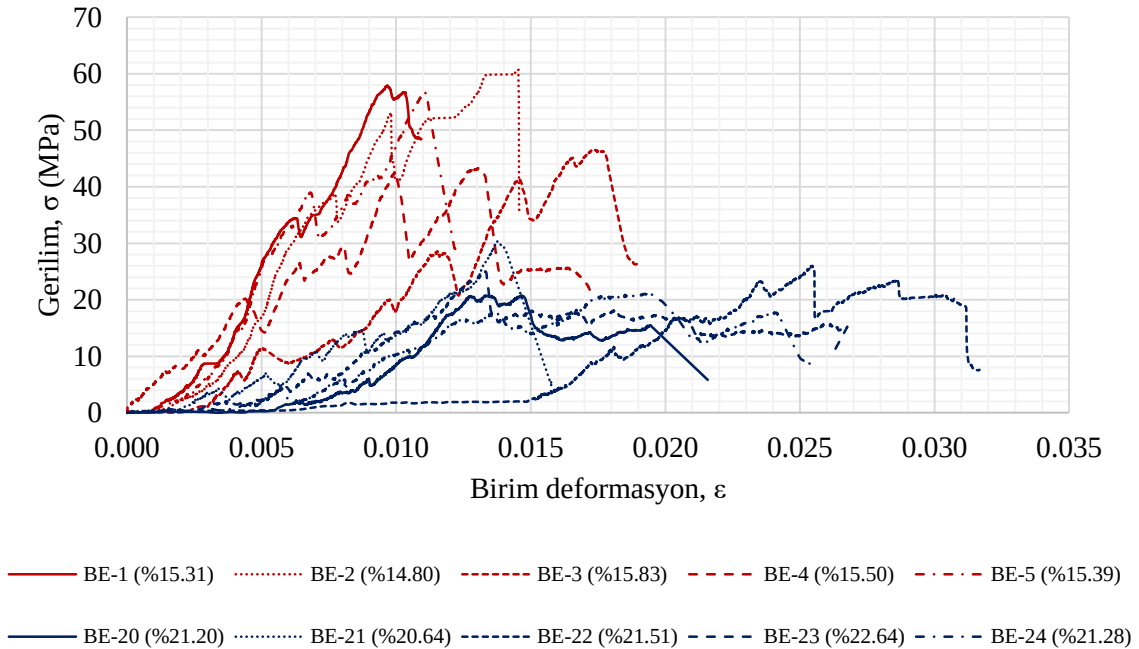
5.6.3. L-3'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri

Van'ın Muradiye ilçesinde bulunan Köşk bölgesinden alınan boşluk özellikleri birbirinden tamamen farklı olan 2 bloktan 10 karot çıkarılan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri 20,81 ile 57,87 MPa arasında değişmekte olup hesaplanan gerçek porozite ve elastisite modülü değerleri ile birlikte Çizelge 5.10'da, örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.43'te verilmiştir. 1. blok genel olarak çok fazla sayıda ve eş çaplı küresel boşluklar barındırırken 2. blok bu küçük boşlukların yanı sıra dairesel yapıda olan ve büyük çapta boşluklar da içermektedir. L-3'den alınan ve farklı boşluk özelliklerine sahip olan iki bloktan çıkarılan karotlar üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sonuçları kullanılarak hazırlanan gerilim-birim deformasyon grafikleri incelendiğinde örnekler arasında farklı bir dağılım olduğu görülmektedir. Özellikle gerçek porozite miktarı %20'nin üzerinde olan ve 2. bloktan alınan örneklerin gerçek porozite miktarı %20'nin altında olan örneklerle göre çok daha fazla deformasyona uğradığı söylenebilir. Bu lokasyondan alınan 1. bloğun gerçek porozite oranı yaklaşık olarak %15 civarında olmakla birlikte bu bloktan alınan karotlarda son derece küçük (<0,2 mm) çapta ve çok sayıda dairesel boşluklar bulunmaktadır. Gerçek porozite oranı %20 civarında olan 2. bloktan alınan karotlarda son derece

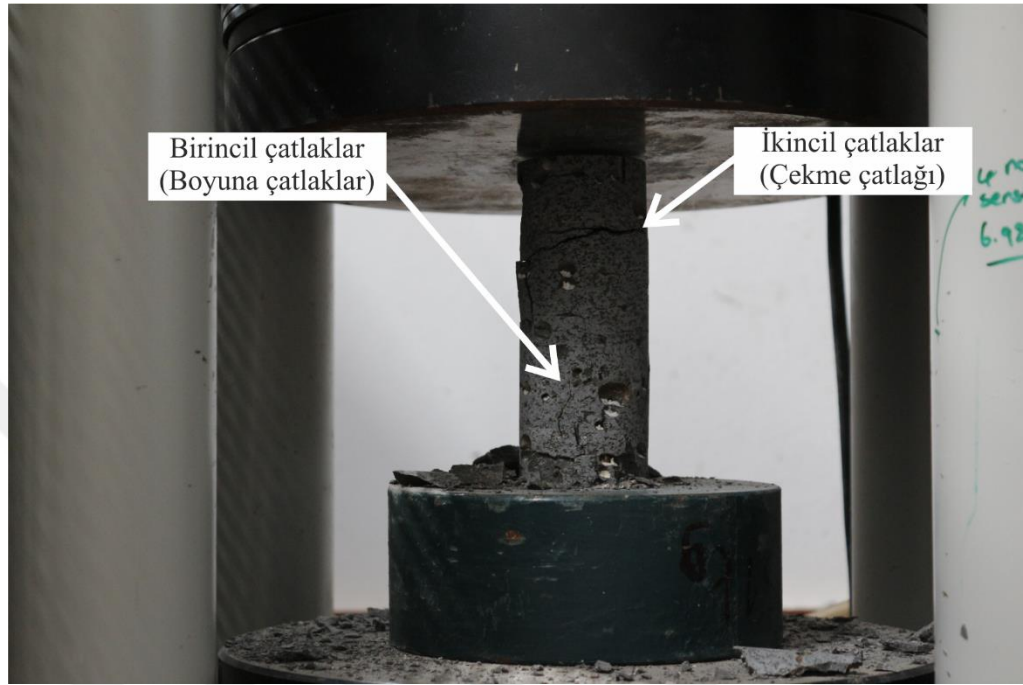
küçük ($<0,2$ mm) çapta olan boşlukların yanı sıra büyük çapta (1-2 cm'ye kadar ulaşan) boşluklar da yer almaktadır. Özellikle 2. bloktan alınan karotlardaki 1. bloktan alınan karotlara oranla 2 kata kadar ulaşan aşırı deformasyon miktarının büyük boşluklardan kaynaklığı olduğu söylenebilir. 1. bloktan alınan karotlardaki yenilme küçük boşluklarda oluşan çatlakların birbirleri ile birleşmesi yaklaşık olarak yüklemeye paralel yönde oluşan boyuna çatlaklar, 2. bloğa ait örneklerde oluşan yenilme ise yüklemeye paralel yönde oluşan çatlaklara ek olarak çekme çatlaklarının da oluşması ile gerçekleşmiştir. Yenilme davranışında boşluk çapının artması çekme çatlaklarının oluşumunu tetikleyerek daha fazla deformasyonun meydana gelmesine, dayanımın düşmesine ve farklı bir yenilme davranışına neden olmuştur. (Şekil 5.43).

Çizelge 5.10. L-3'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.

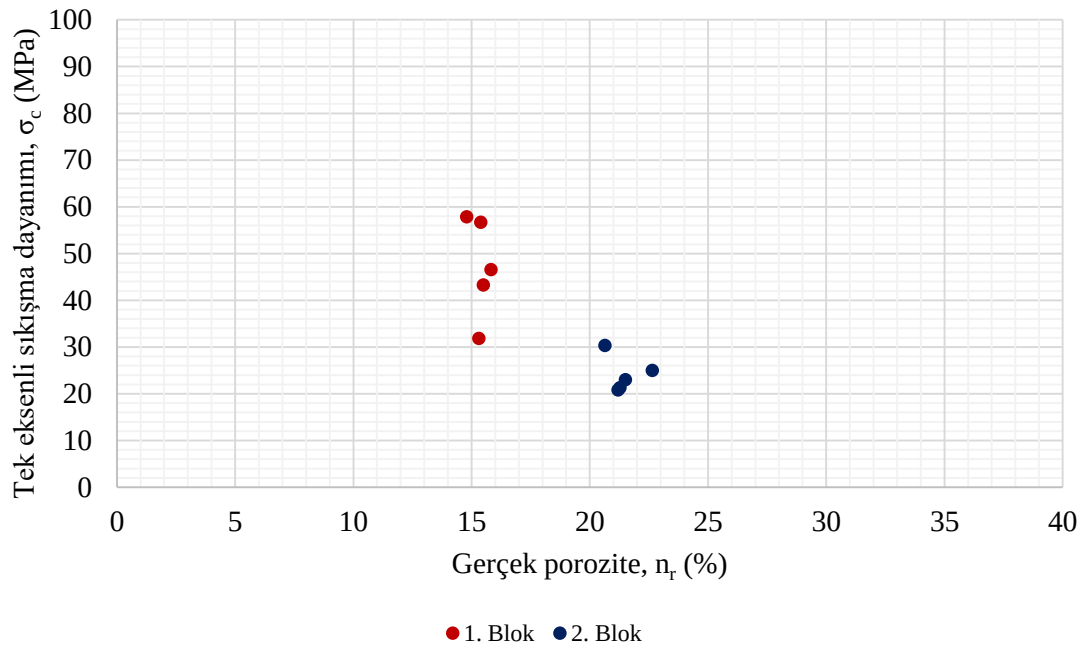
Örnek No	Gerçek Porozite (%)	σ_c (MPa)	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)
BE-1	15,31	31,81	6,52	6,89	5,59
BE-2	14,80	57,87	6,41	5,10	4,87
BE-3	15,83	46,57	3,36	3,06	5,07
BE-4	15,50	43,30	3,44	3,17	3,74
BE-5	15,39	56,68	5,90	6,22	5,24
BE-20	21,20	20,81	3,54	3,87	0,97
BE-21	20,64	30,35	2,35	2,54	1,44
BE-22	21,51	23,00	2,71	2,27	0,66
BE-23	22,64	25,02	2,64	2,87	1,31
BE-24	21,28	21,32	2,09	1,54	1,04



Şekil 5.42. L-3'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.



Şekil 5.43. L-3'den alınan BE-24 örneğinin farklı çatlakların etkisinde yenilmesi.



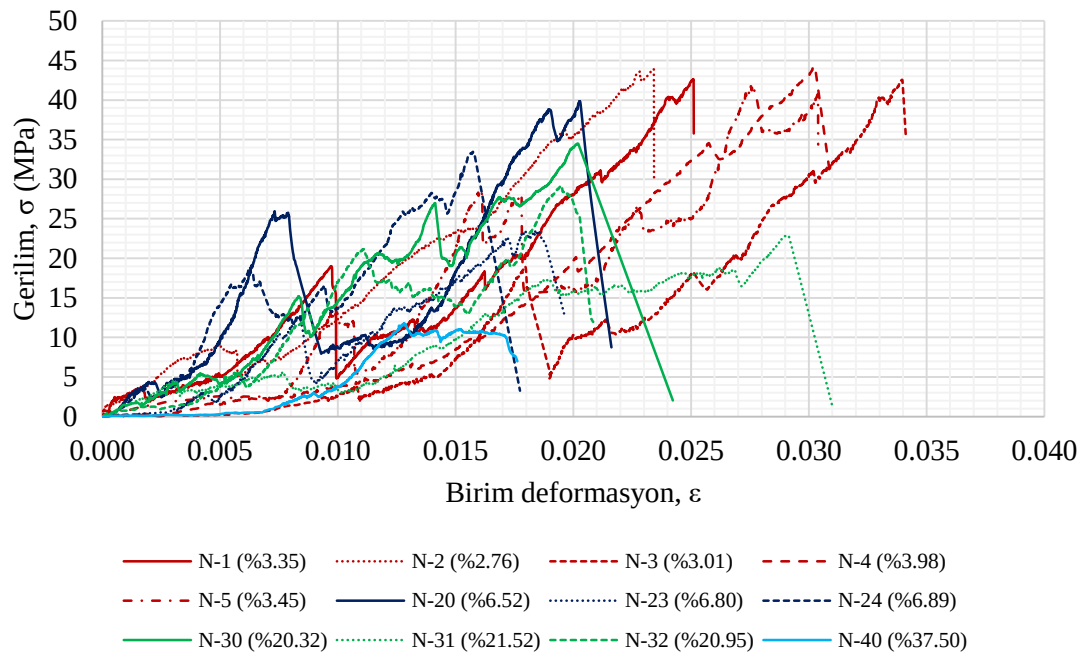
Şekil 5.44. L-3'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.

5.6.4. L-4'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon özellikleri

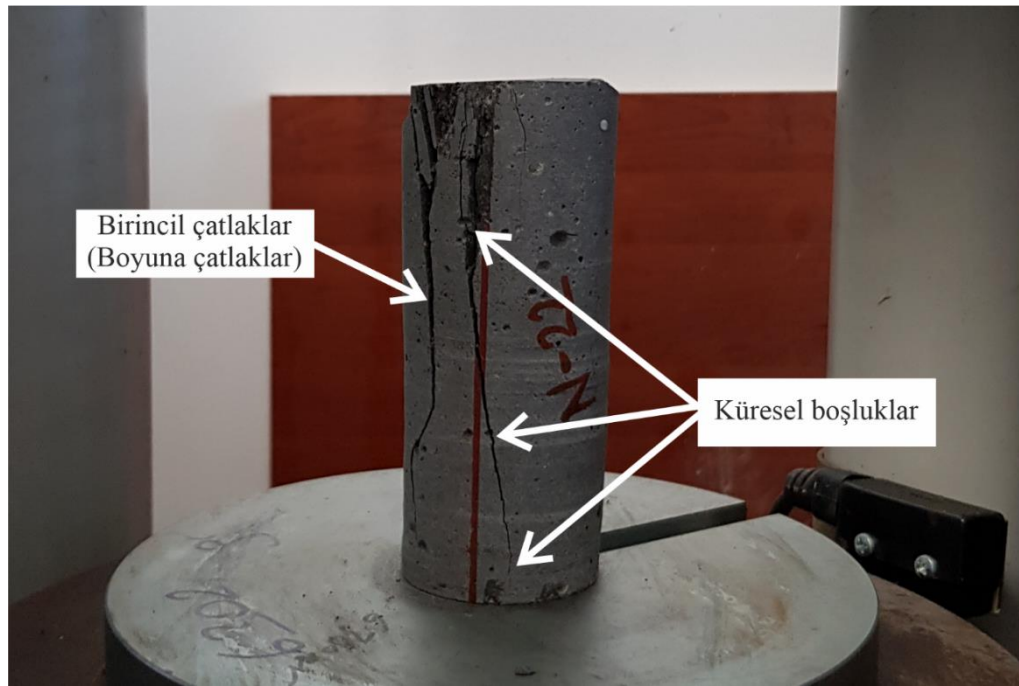
Kütahya ili Simav ilçesi Naşa bölgesinden boşluk özelliklerinin farklılık gösterdiği 4 blok alınmıştır. Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bu bloklardan çıkarılan karot örnekler üzerinde deformasyon kontrollü tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılması için 10 karot örneği çıkarılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri 11,80 ile 42,65 MPa arasında değişmekte olup hesaplanan elastisite modülü değerleri ile birlikte Çizelge 5.11'de, örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.45'te verilmiştir. Bu lokasyondan alınan blokların görgül boşluk hacmi değerleri kullanılarak hesaplanan gerçek porozite değerleri ise % 3.01 ile % 35.11 arasında değişmekte olup her blok için ayırt edici gerçek porozite değerleri yakalanmıştır. Blokların boşluk yapıları ise 1. ve 2. blokta küçük çapta küresel boşluklardan, 3. ve 4. blokta ise küçük çapta küresel boşlukların yanı sıra büyük çaptaki küresel boşluklardan oluşmaktadır. L-4'den alınan bloklar boşluk yapıları göz önüne alındığında L-3'ten alınan bloklarla benzerlik göstermektedir. L-4'ten alınan ve boşluk özellikleri bakımından hem boşluk geometrisi hem de boşluk miktarı bakımından farklılık gösteren 4 bloktan çıkarılan örneklerin yenilme davranışları genellikle boşlukların etrafında yüklemeye bağlı olarak oluşan gerilim alanlarında oluşmaya başlayan birincil (boyuna) çatlaklardan meydana gelmiştir (Şekil 5.46). Gerçek porozite değeri %10'un altında olan 1. ve 2. bloktan çıkarılan örnekleri dayanım değerleri 25 ile 45 MPa, 3.ve 4. bloktan çıkarılan örneklerin ise 10 ile 35 MPa arasında değişmektedir (Şekil 5.47). L-4'ten alınan örneklerin gerçek porozite değeri %10'un üzerinde olduğu örneklerde dayanımda ve kısmen de deformasyonda azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 5.11. L-4'den alınan örneklerin dayanım ve elastisite modülü değerleri.

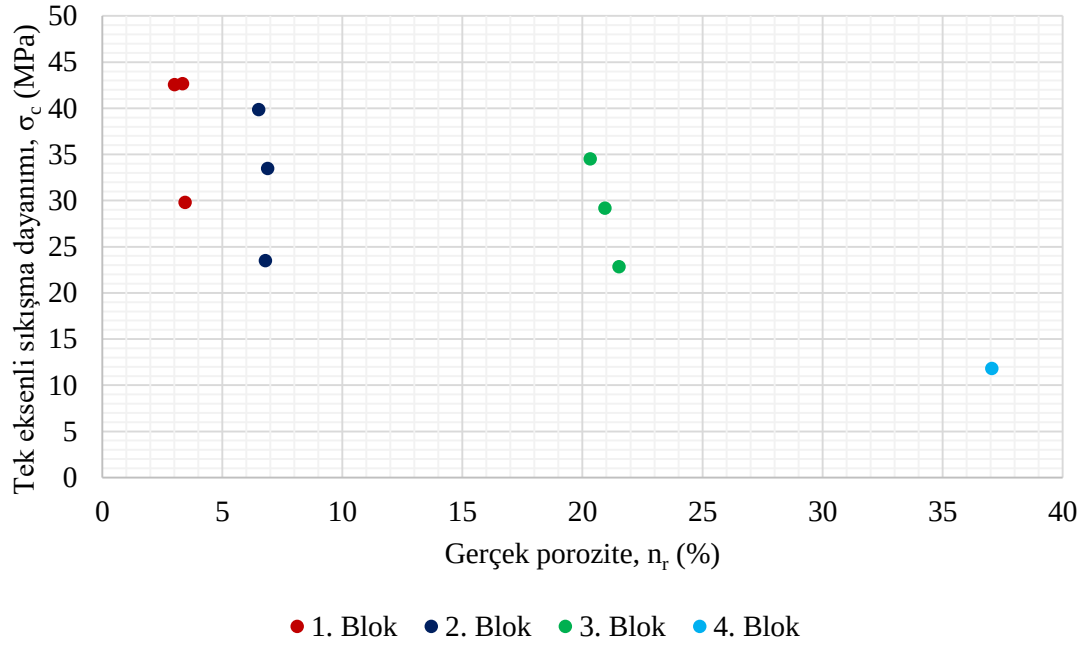
Örnek No	Gerçek Porozite (%)	σ_c (MPa)	E_t (GPa)	E_{av} (GPa)	E_s (GPa)
N-1	3,35	42,65	1,24	1,45	1,22
N-2	2,76	43,89	2,20	1,77	1,05
N-3	3,01	42,57	1,38	1,83	0,78
N-4	3,98	44,19	2,59	2,26	1,02
N-5	3,45	41,75	1,56	1,76	1,49
N-20	6,52	39,85	1,66	2,49	1,27
N-21	6,73	64,42	5,89	5,96	3,57
N-22	7,17	52,58	4,93	4,97	4,33
N-23	6,80	23,49	1,59	1,47	0,98
N-24	6,89	33,47	2,15	2,05	1,50
N-30	20,32	34,51	1,78	1,93	1,62
N-31	20,95	29,17	1,49	1,40	1,17
N-32	21,52	22,83	0,66	0,77	0,72
N-40	37,05	11,80	1,78	2,02	0,55



Şekil 5.45. L-4'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.



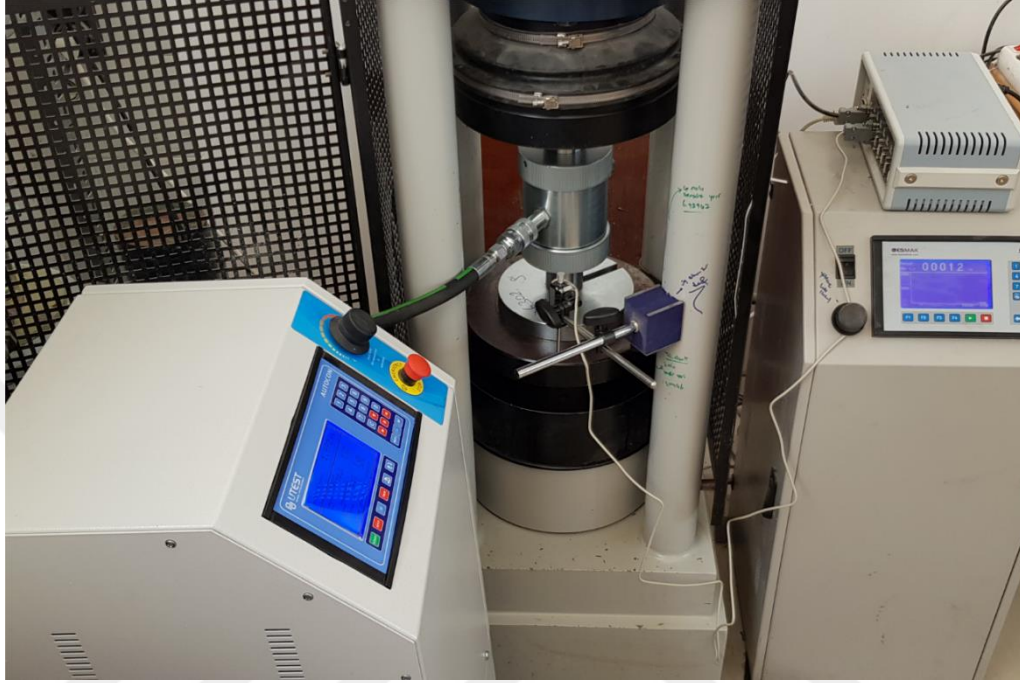
Şekil 5.46. L-4'den alınan N-22 örneğinin çekme gerilmelerinin etkisinde yenilmesi.



Şekil 5.47. L-4'den alınan örneklerin gerçek porozite ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin dağılımı.

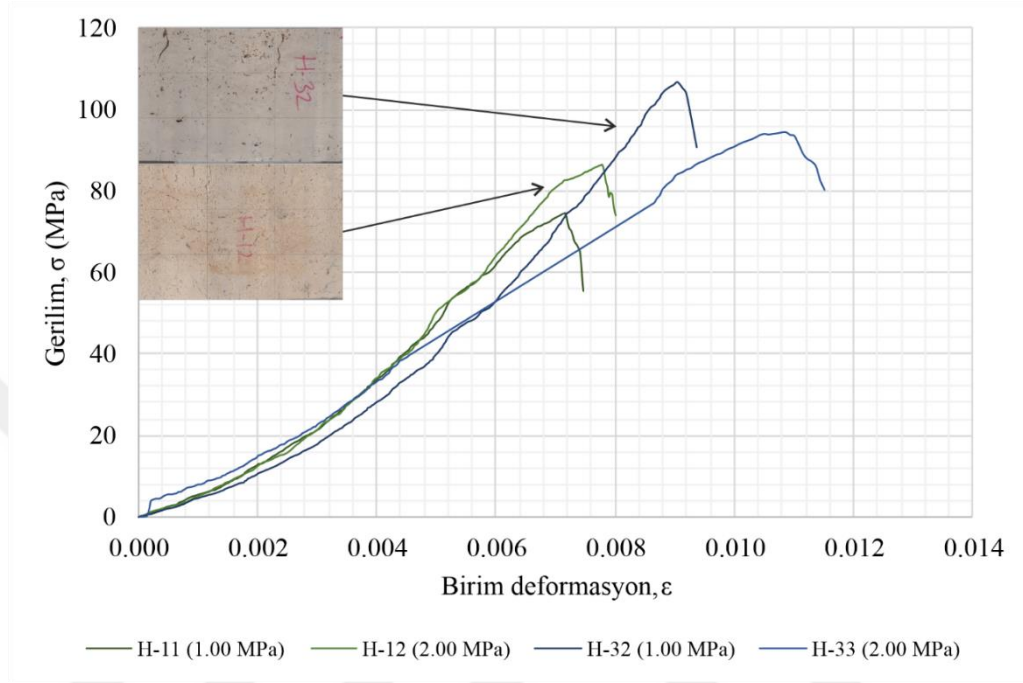
5.7. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karot örnekler üzerinde boşluk özelliklerinin farklı yanal basınç değerlerinde kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi amacıyla üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasında yanal basınç değerlerinin deney sırasında yüklemeye bağlı olarak değişmemesi ve sabit olarak tüm deney boyunca aynı yanal basıncın uygulanabilmesi için servo motora sahip olan yanal basınç ünitesi kullanılmıştır (Şekil 5.48). Deneyler sırasında uygulanacak olan yanal basınç değerlerine kara verilebilmesi amacıyla farklı gerçek porozite değerlerine sahip örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan öncel deneylerde özellikle büyük çaplı (>1 cm) boşluklar içeren örneklerde Hoek hücresinde örneğe yanal basıncın aktarılmasında kullanılan membranlar 2 MPa ve üzeri yanal basınç değerlerinde yüklemeye bağlı olarak parçalanmıştır. Bu nedenle yapılan üç eksenli deneylerde en fazla 1,5 MPa yanal basınç değerine kadar çıkılabilmektedir. Bu bölüm altında üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen dayanım verileri incelenmiş olup boşluk özellikleri ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri arasındaki ilişkiler ise Bölüm 6'da irdelenmiştir.



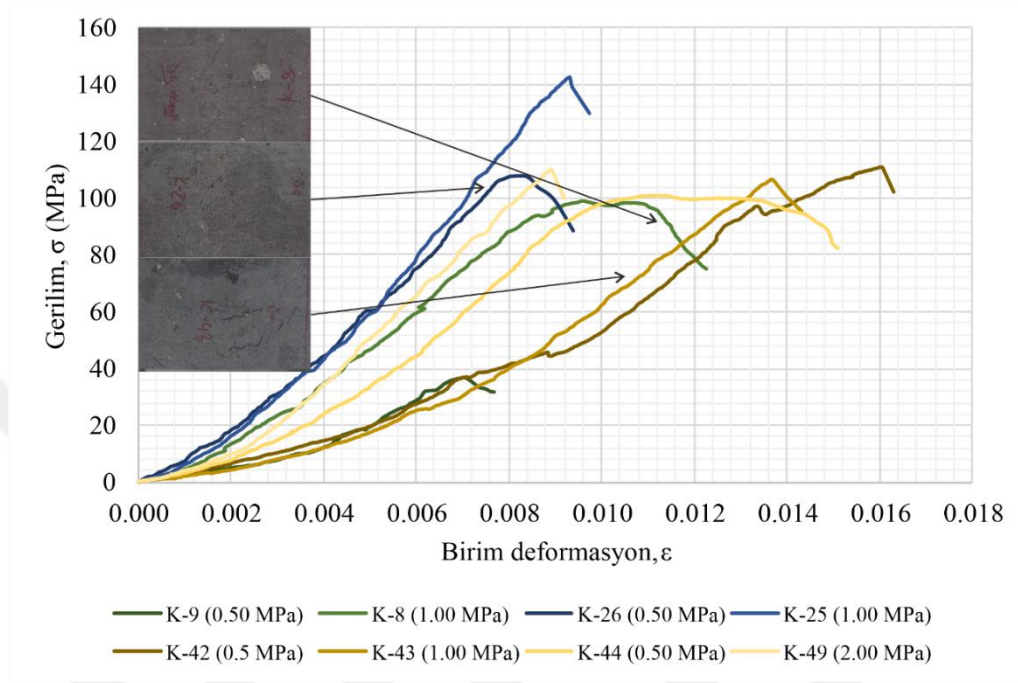
Şekil 5.48. Üç eksenli sıkıştırma dayanımı deneylerine kullanılan deney seti.

L-1'den alınan 4 örnek üzerinde üç eksenli sıkıştırma dayanımı deneyi yapılmış ve deneyler sırasında elde edilen gerilim-birim deformasyon grafiği de Şekil 5.49'da verilmiştir. Bu lokasyondan alınan ve %10'un altında gerçek porozite değerine sahip olan örneklerin üç eksenli yükleme koşulları altında daha yüksek dayanım değerlerine daha fazla deformasyon altında ulaştığı belirlenmiştir. Gerçek porozite değeri %20 civarında olan örneklerin ise dayanım ve deformasyon değerleri daha düşüktür. Üç eksenli yükleme koşullarında örnekler arasında %20 ile %30 arasında meydana gelen bu farklılığın en önemli nedeni çatlak oluşumu ve ilerlemesini kontrol eden boşluk özelliklerinin birbirinden farklı olmasıdır. Gerçek porozite değeri %10'un altında olan örneklerde çatlak oluşumu daha yüksek gerilim değerlerinde meydana gelirken, %20'nin üzerinde olan örneklerde ise daha düşük değerlerde meydana gelmektedir. Daha düşük gerilim değerlerinde çatlakların meydana gelmesi ile de örnek yüklemeye bağlı olarak çok daha kısa sürede yenilmiştir.



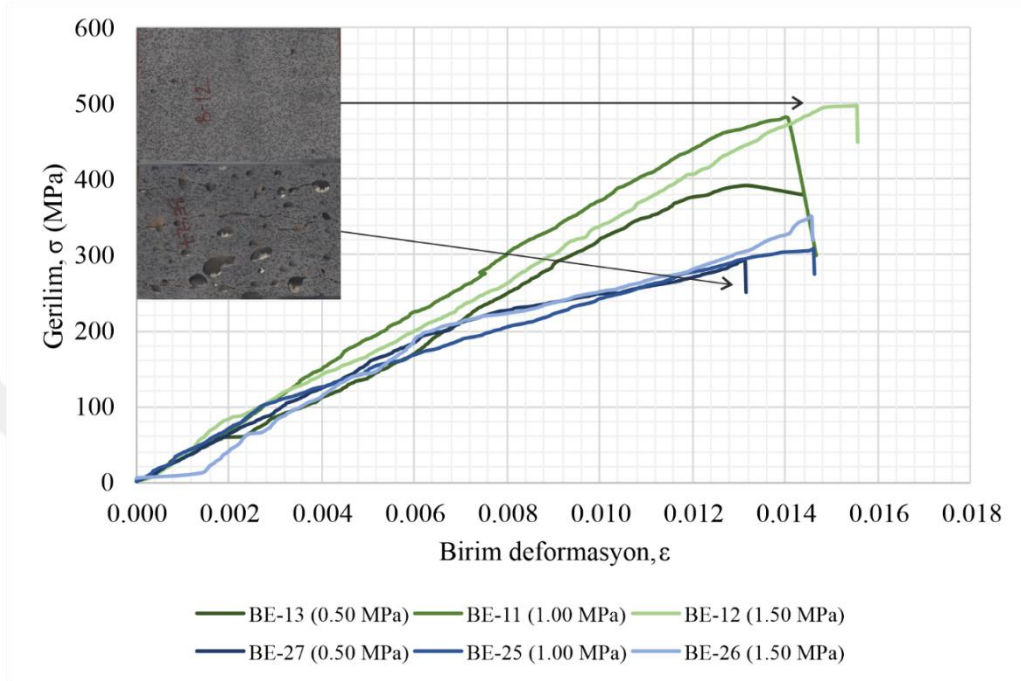
Şekil 5.49. L-1'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

L-2'den alınan örnekler üzerinde 0,5 ile 2 MPa arasında değişen yanıl basınç değışerlerinde 8 adet üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.50'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu lokasyondan alınan örneklerin üç eksenli yükleme koşullarında yenilme davranışı üzerinde boşluk özelliklerinin yanı sıra örneklerde gözlenen akma yapısı ve akma yönünün de etkisi son derece büyüktür. Boşluk çapı (<1 mm) olan örneklerde yenilme akma yönü boyunca oluşan ve ilerleyen çatlaklar nedeniyle meydana gelmiştir. Boşluk çapının artması ile birlikte çatlaklar öncelikle bu boşluklar etrafında oluşmuş ve akma yönünde diğer boşlukların etrafında oluşan çatlaklar ile birleşerek yenilme meydana gelmiştir. Akma yapısı ile birlikte boşluk içeren örneklerin yenilme mekanizmalarının hem tek, hem de üç eksenli yükleme koşulları altında son derece karmaşık bir yapıda olması nedeniyle sadece bu özelliklere sahip örnekler üzerinde ayrı ve detaylı bir çalışmanın yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.



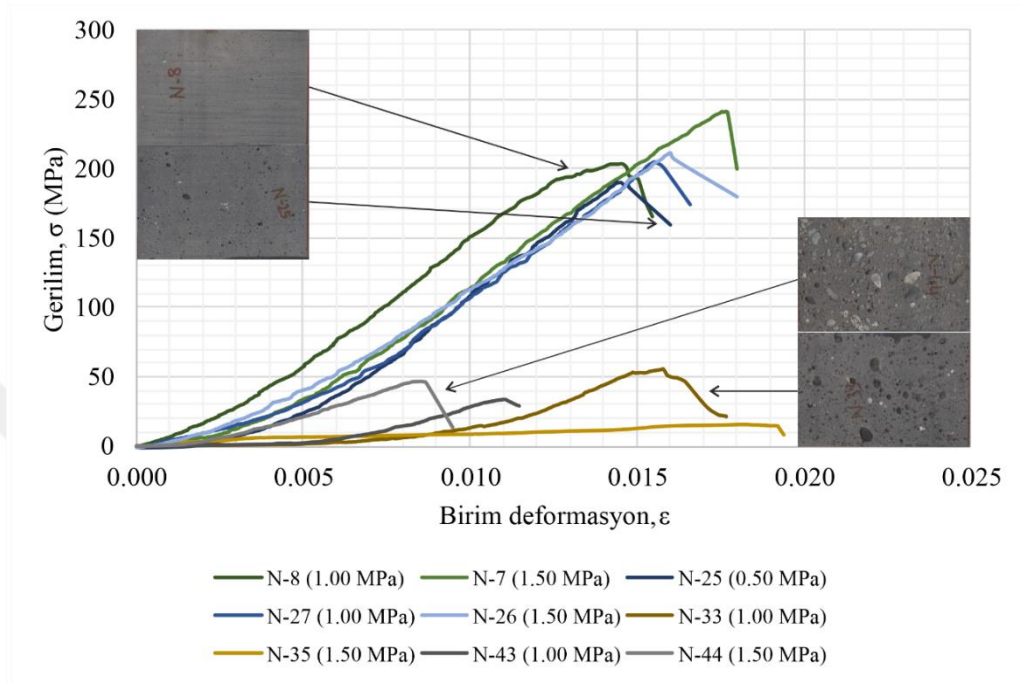
Şekil 5.50. L-2'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

L-3'ten alınan örnekler üzerinde 0,5 ile 1,5 MPa arasında değişen yanıl basınç değerlerinde 6 adet üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmış olup elde edilen gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.51'de verilmiştir. Bu lokasyondan alınan 1. bloktan çıkarılan karot örneklerin gerçek porozite değerleri %15, 2. bloktan çıkarılan karot örneklerin ise %22 civarındadır. 1. bloktan çıkarılan örneklerde eş çaplı (<1 mm) çok sayıda boşluk varken, 2. blokta ise 1. bloktaki eş çaplı boşluklara ek olarak büyük çaplı (>1 mm) boşluklar da bulunmaktadır. Üç eksenli yükleme koşulları altında söz konusu olan bu farklı boşluk özellikleri nedeniyle 2. bloğa ait olan karot örneklerin dayanım değerleri 1. bloğa göre %30 oranında daha düşüktür. Aradaki farkın en önemli nedeninin ise büyük çaplı boşluklar etrafında yüklemenin erken aşamalarında çatlakların oluşması ve devam eden yükleme ile birlikte büyük boşluklar arası çatlak ilerlemesi ve birleşiminin meydana gelmesi olduğu düşünülmektedir. 1. bloktan çıkarılan karot örneklerde ise boşlukların eş çaplı olması nedeniyle örnekler yüke karşı homojen bir şekilde direnç gösteren zayıflık düzlemlerinin oluşması için daha yüksek gerilim koşullarının oluşması gerekmiştir.



Şekil 5.51. L-3'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

L-4'e ait olan 4 farklı bloktan çıkarılan toplam 9 karot örneği üzerinde 0,5 ile 1,5 MPa arasında değişen yanal basınç değerlerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen gerilim-birim deformasyon grafikleri ise Şekil 5.50'de verilmiştir. Bu lokasyondan alınan ve gerçek porozite değerleri %3 ile 6 arasında değişen 1. ve 2. bloğa ait örnekler ile gerçek porozite değerleri %20'nin üzerinde olduğu 3. ve 4. bloğa ait örneklerin dayanım parametreleri arasında 4 kata varan farklılık meydana gelmiştir. Az sayıda çok küçük çaplı (<0.5 mm) küresel boşluk içeren 1. ve 2. bloğa ait olan örneklerin dayanım değerleri 200 ile 250 MPa arasında değişirken, büyük çaplı (>10 mm) küresel ve küresele yakın şekilli boşluklar içeren 3. ve 4. bloğa ait örneklerin dayanım değerleri yaklaşık olarak 50 MPa civarında kalmıştır. 3. ve 4. bloğa ait örneklerdeki büyük çaplı boşlukların etrafında yüklemenin erken aşamalarında çatlaklar meydana gelerek yüklemeye bağlı olarak hızlı bir şekilde çatlak ilerlemesini meydana gelerek yenilmenin düşük dayanım değerlerinde meydana gelmesine neden olmuştur.



Şekil 5.52. L-4'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

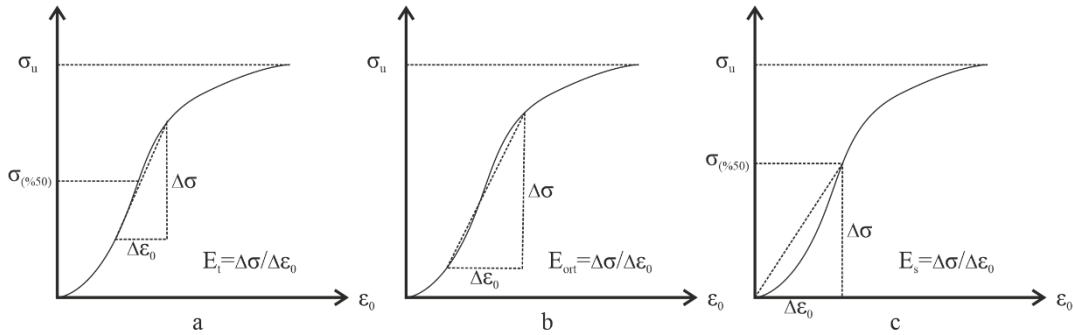
6. BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN DAYANIM ve DEFORMASYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında L-1'den (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) alınan bloklar dolomit, L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı), L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4'den (Naşa bölgesi) alınan bloklar ise sırasıyla basanit-fonotefrit, traki-bazalt ve bazaltik traki-andezit olarak sınıflandırılmıştır. Boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin yorumlanabilmesi amacıyla arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karotlar üzerinde yapılan tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde veriler bu bölüm altında her bir lokasyon için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kaya örneklerine ek olarak hazırlanan ve kaya malzemeleri ile benzer yenilme özellikleri sergileyen yapay beton örneklerle ilişkin yapılan değerlendirmeler de yine bu bölümde verilmiştir. Kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tanımlanmasında ve değerlendirilmesinde tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde veriler araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan bu deneylerde kaya malzemelerinin uygulanan gerilime karşı gösterdikleri direnç, dayanım, meydana gelen deformasyon ile olan bileşkesi ise elastisite modülü ile temsil edilmektedir.

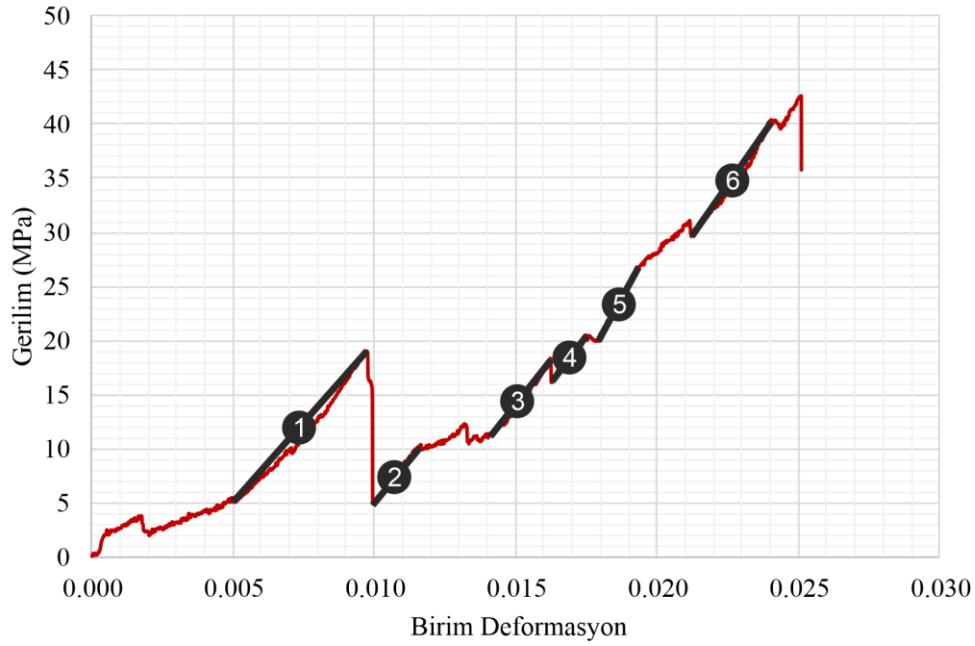
Hem dayanım hem de elastisite modülü değerleri yüklemeye bağlı olarak karotların sahip oldukları boşluk özelliklerinden etkilendikleri ve boşluk özelliklerini yansıtmaları nedeniyle yapılan değerlendirmelerde son derece önemlidir. Elastisite modülü değeri, yaygın olarak tek eksenli sıkışma dayanımının %50'si kadar bir değere denk gelen teğet (tanjant) elastisite modülü, gerilim-birim deformasyon eğrisinin eğimini ifade eden ve tek eksenli sıkışma dayanımının %25 ile 75 arasındaki bölgeyi temsil ortalama elastisite modülü ve yüklemenin başlangıcı ile tek eksenli sıkışma dayanımının %50'sine kadar olan kısmı dikkate alan kiriş (sekant) elastisite modülü olmak üzere 3 farklı şekilde ifade edilmektedir (Şekil 6.1). Kaya malzemelerinde yenilme davranışı yüklemeye bağlı olarak çatlakların oluşması, ilerlemesi ve birleşerek yenilme düzlemlerinin oluşması ile meydana gelmektedir. Boşluk içeren kayalarda yüklemenin ilerleyen aşamalarında çok sayıda yeni çatlak oluşmaktadır. Oluşan bu yeni çatlaklar ile deformasyon miktarı da yüksek değerlere ulaşmaktadır. Özellikle boşluklu kaya malzemelerinde çatlak oluşumunun deneyin ilerleyen safhalarında çok fazla sayıda olması nedeniyle elastisite modülü hesaplamalarında çok düşük değerler elde edilebilmektedir. Elastisite modülünün kullanımda genellikle tercih edilen ortalama elastisite modülünde gerilim-birim deformasyon eğrisinin genelini ifade eden doğru dikkate alınmaktadır. Tez çalışması kapsamında

kullanılan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri incelendiğinde örneklerin iki ayrı gruba ayrılması mümkündür. L-1 ve L-2'den alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon eğrileri teorik kabullere uygunken, L-3 ve L-4'ten alınan örnekler ise teorik eğrilerden farklı bir davranış ortaya koymaktadır (Şekil 6.2). Örnekler arasında söz konusu olan bu farklılıktan dolayı boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin yorumlanmasında her lokasyonuna ayrı ayrı irdelenmesinin faydalı olacağı düşünülmüştür. Boşluk özelliklerine bağlı olarak kaya malzemesi tek eksenli yükleme koşullarında boşlukların kapanmasına bağlı olarak deformasyon, kapanma sonrası yeniden yüklemeye karşı direnç gösterebilme yetisinin kısa süreli artması nedeniyle gerilimde artış olarak tanımlanabilen ve basamak olarak isimlendirilen döngü birkaç defa görülmektedir. Bu durumda kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özelliklerini temsil eden sayısal değerlerin belirlenmesinde hangi eğrinin veya basamağın kullanılması gerektiği önemli bir nokta olarak öne çıkmaktadır. Boşluklu kaya malzemelerinde görülen bu davranış ile ilgili olarak Şekil 6.2'de 1 numara ile gösterilen eğrinin kaya malzemesinin boşlukları ile birlikte bir bütün olarak yüklemeye karşı gösterdiği davranışı temsil ettiği söylenebilir. Bu davranış göz önüne alındığında sonraki aşamalarda meydana gelen gerilimdeki artma ve azalma ile birlikte birim deformasyonda meydana gelen değişim kaya malzemesinin içinde bulunan boşlukların kapanması ve buna bağlı olarak dayanımın ve deformasyonda meydana gelen kısa süreli artıştan kaynaklıdır. Şekil 6.2'de 1 numara ile gösterilen, kaya malzemesini hamur, boşluk, çatlak ve diğer tüm yapısal ve mineralojik unsurları ile temsil ettiği kabul edilen dayanım-birim deformasyon eğrisinin ilk basamağını temsil eden doğrunun elastisite modülü ile diğer basamakların elastisite modülü değerleri birbirinden farklıdır. 1. basamaktan sonra yüklemeye bağlı olarak örnekte meydana gelen deformasyon boşluklar tarafından karşılanmaktadır. Tez çalışması kapsamında alınan örneklerde tek eksenli yükleme koşullarında gerilim-birim deformasyon grafiklerindeki basamaklı yapı sadece L-3 ve L-4'te görülmektedir. Ortaya çıkan bu davranışın en önemli nedeninin ise her ne kadar kayaçların kökenleri L-2, L-3 ve L-4 için benzer olsa da mineralojik ölçekte dokusal özellikler birbirinden tamamen farklıdır. L-2'ye ait örneklerin mineralojik dokusal yapısı daha iri taneli minerallerden oluşmakta iken L-3 ve L-4'te ise dokusal yapı büyük oranda ince taneli minerallerden oluşmaktadır. Söz konusu bu dokusal yapı farklılığı nedeniyle de örneklerin yüklemeye karşı gösterdikleri davranış da birbirinden farklı olmaktadır. Gerilim-birim deformasyon eğrilerinde basamaklı yapının görüldüğü L-3 ve L-4'e ait örneklerin tamamında 1. basamak olarak tanımlanan eğrinin eğimi 45° ve altındadır. Bu noktada bir diğer önemli parametre ise çatlak koşullarıdır. 1 numara ile temsil edilen basamak süresi boyunca oluşan çatlakların sayısı ve ilerleme durumunun diğer basamaklara göre az olması nedeniyle de kaya

malzemesinin 1. basamak boyunca yüklemeye karşı daha uzun süre direnç göstermesi mümkün olmuştur. Sonraki her basamakta oluşan çatlak sayısı ve ilerlemesi de arttığından yüklemeye karşı direnç gösterilebilen gerilim aralığı azalarak meydana gelen deformasyonlar nedeniyle daha dar bir aralıkta meydana gelmiştir. Özellikle son basamaklara doğru boşluklar arasında meydana gelen makaslama ve çekme çatlaklarının da birleşmesi ile örnekler yenilme noktasına ulaşmıştır. Kaya malzemeleri çok sayıda mikro ölçekte boşluk ve çatlak gibi yapısal unsurlar içerebilir. Boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin araştırılması sırasında kullanılan bir diğer yöntem olan nümerik analiz ve modelleme çalışmalarında oluşturulan modellerin kaya malzemelerinin sahip oldukları doğal, heterojen, anizotropik ve detaylı yapıya sahip olmaları için çok detaylı modelleme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Nümerik yöntemlerin doğası gereği oluşturulan modellerin mümkün olduğunca basit olması gerekmektedir. Nümerik yöntemler kullanılarak oluşturulan modellerden elde edilen gerilim-birim deformasyon eğrileri ise kaya mekaniği ile ilgili olarak teorik eğrilerden farklı olarak doğrusaldırlar. Doğrudan ve nümerik yöntemlerden elde edilen gerilim-birim deformasyon eğrileri arasındaki bu farklılık nedeniyle nümerik modellerin kalibrasyonu sırasında hedef elastisite modülü olarak hangi elastisite modülü tipinin seçileceği konusunu öne çıkarmaktadır. Bu noktada tek eksenli sıkışma dayanımının %50'sine karşılık gelen deformasyon değerine dikkate alan kiriş (sekant) elastisite modülünün tercih edilmesinin faydalı olacağı düşünülmüş ve nümerik modellerin kalibrasyonu aşamasında hedef elastisite modülü olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.1. (a) Teğet (tanjant) elastisite modülü, (b) Ortalama elastisite modülü, (c) Kiriş (sekant) elastisite modülü hesaplaması.

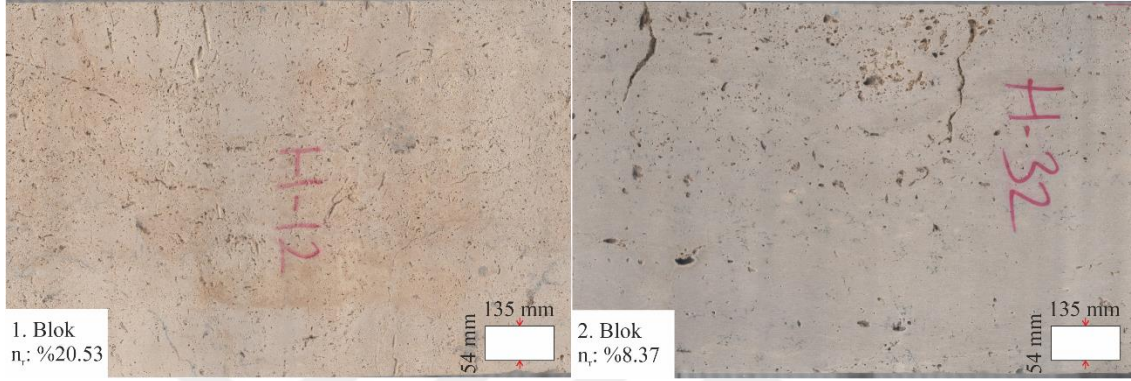


Şekil 6.2. L-4'e ait olan N-1 örneğinin gerilim-birim deformasyon grafiğinde görülen tekrarlı gerilim artışı.

6.1. L-1 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki

L-1'den 2 blok örnek alınmış ve bu bloklardan çıkarılan karotlardan 2 tanesinin yüzey taramaları ise Şekil 6.3'de verilmiştir. Bu lokasyondan alınan bloklardan çıkarılan karotların ortalama gerçek porozite değerleri 1. bloktan çıkarılan karotlar için %20,53, 2. bloktan çıkarılanlar için ise %8,37 olarak belirlenmiştir. 1. bloktan çıkarılan karotlarda genellikle küresel ve küresele yakın şekilli, karotun bazı bölümlerinde çapı 2 mm'ye kadar ulaşan çok sayıda boşluk bulunmaktadır. Bunun aksine ortalama gerçek porozite değeri 1. bloktan yaklaşık olarak %12 kadar düşük olmasına rağmen 2. bloktan çıkarılan karotlarda 3.boyutta derinliği 2 mm'ye, çapı 5 mm'ye ulaşan daha az sayıda kadar küresel ve elipsoit şekilli ve yüklemeye paralel yönde olacak şekilde genişliği 3 mm'ye, uzunluğu ise 35 ile 40 mm'ye kadar varan düzensiz şekilli doğrusal yönetime sahip olan yapıda boşluklar bulunmaktadır. Bu nedenle her ne kadar gerçek porozite değeri 1. bloğa göre daha az olsa da 2. bloktan çıkarılan örneklerin tek eksenli yükleme koşullarında gerilim yoğunlaşmasının meydana gelerek çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak hızlı bir şekilde çatlak ilerlemesinin de meydana gelme olasılığı daha yüksek olan boşluklar bulunmaktadır. Bununla birlikte her ne kadar boşluk sayısı daha

fazlada olsa 1. bloktan çıkarılan karotların boşlukları özelliklerinin birbirleri ile çok benzer olması tüm karotun homojen bir şekilde gelen yüke karşı direnç göstermesini sağlamaktadır.



Şekil 6.3. L-1’den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.

Zhu vd. (2010) tarafından tek eksenli yükleme koşullarında kireçtaşlarındaki boşlukların kapanımının mikro mekaniği ile ilgili olarak yapılan çalışmada ilk olarak kapanmanın büyük olan boşluklarda meydana geldiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, ilk kapanımların meydana gelmesinin ardından boşluk kaynaklı oluşan çatlakların mikro çatlaklar ile devam ettiği ve yenilmenin bu şekilde gerçekleştiğini de ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar tarafından yapılan bu çalışmada olduğu gibi L-1’den alınan 2. bloktan çıkarılan karotlarda tek eksenli yükleme koşullarında çatlak oluşumu öncelikle büyük boşluklarda meydana gelmiştir. Örneklerin yenilmesi ise bu boşluklarda oluşan çatlakların yüklemeye paralel olarak ilerlemesi sonucunda gerçekleşmiştir. Daha yüksek gerçek porozite değerine sahip olan ancak boşluk özellikleri homojen olarak tanımlanabilecek 1. bloktan çıkarılan örneklerde ise yenilme 2. bloktan farklı olarak büyük oranda mikro çatlakların oluşması ve bunların boyuna çatlakları oluşturması sonucunda oluşmuştur. Tek eksenli yükleme koşullarında karotların dayanım ve deformasyon değerleri için ayırt edici olan en önemli özellik 3. boyutta derinliği olan, genişliği 3 mm’ye kadar ve boyu 35 ile 40 mm’ye kadar ulaşan düzensiz şekilli çizgisel yapıda boşlukların yoğunluğudur. Bu yapıdaki boşlukların sayısının ve geometrik ölçülerinin artması doğrudan dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Örneğin, düzensiz şekilli doğrusal yapıdaki boşluk özellikleri diğer karotlardan farklı olan ve gerçek porozite değeri %9,59 olan H-25 örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 29,68 MPa ve meydana gelen birim deformasyon yaklaşık olarak 0,48 mm olarak belirlenmiştir. Buna karşında daha fazla gerçek porozite değerine sahip olan H-1 örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 49,08 MPa ve birim

deformasyon değeri yaklaşık olarak 0,61 mm civarındadır (Çizelge 6.1). Normal koşullarda gerçek porozite değeri daha düşük olan örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı değerinin yüksel olması beklenirken dayanım ve deformasyonun tamamen düzensiz şekilli çizgisel yapıda boşluklar tarafından kontrol edilmesinden dolayı gerçek porozite değeri daha düşük olan örnekte süreksizlik denetim bir yenilme gerçekleşmiştir. L-1'e ait olan üç eksenli yükleme koşullarındaki yenilme davranışı ise tek eksenli koşullara göre farklılık göstermektedir. Üç eksenli koşullarda gerçek porozite değeri daha fazla olan örneklerin dayanım ve deformasyon değerleri daha düşüktür. Karotun üç eksenli yüklemeye maruz kaldığı durumda tek eksenli yükleme koşulların aksine çatlakların ilerleme hızlarının daha yavaş olması nedeniyle bu davranışın meydana geldiği düşünülmektedir. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sırasında ortalama gerçek porozite değeri %20,53 olan 1. bloktan çıkarılan karotların dayanım değerleri 70 ile 90 MPa, meydana gelen birim deformasyon miktarı ise 0,77 ile 0,82 mm arasındadır. Buna karşılık olarak ortalama gerçek porozite değeri %8,37 olan 2. bloktan çıkarılan karotların dayanım değerleri ise 90 ile 110 MPa, meydana gelen deformasyon miktarı ise 0,99 ile 1,94 mm arasında bulunmuştur. Düzensiz şekilli büyük boşluklar içermesine rağmen gerçek porozite değeri daha düşük olan 2. bloktan çıkarılan karotlar üç eksenli yükleme koşullarında daha yüksek dayanım değerine daha yüksek deformasyona izin vererek ulaşmışlardır. Boşluk özelliklerinin üç boyutlu yükleme koşullarında makaslama parametreleri üzerinde zayıflatıcı etki oluşturmuştur. Gerçek porozite değerlerinin artması sonucunda kohezyon değeri blok bazında 22 MPa'dan 18 MPa'a, içsel sürtünmesi açısı ise 40°'den 38°'ye düşmüştür.

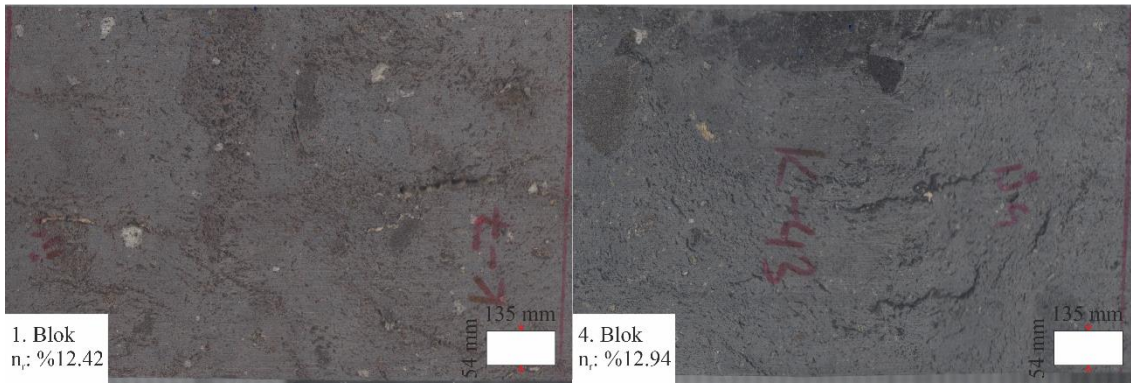
Çizelge 6.1. L-1'den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.

No	n _r (%)	Tek eksenli yükleme		Üç eksenli yükleme			
		σ_c (MPa)	E_s (GPa)	σ (MPa)	E_s (GPa)	c (MPa)	ϕ (°)
H-1	21,33	49,08	8,50				
H-2	19,67	41,82	9,36				
H-3	20,59	40,07	4,35				
H-11	18,14			79,38 ($\sigma_3=1$)	9,73	18	38
H-12	18,97			86,37 ($\sigma_3=2$)	8,85		
H-23	8,41	50,11	7,20				
H-25	9,59	41,55	7,44				
H-26	7,10	54,19	3,56				
H-33	7,78			94,48 ($\sigma_3=1$)	8,84	22	40
H-32	9,15			106,54 ($\sigma_3=2$)	8,99		

6.2. L-2 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki

L-2'den 4 blok örnek alınmış ve bu bloklardan çıkarılan karotlardan 4 tanesinin yüzey taramaları ise Şekil 6.4'te verilmiştir. Bu lokasyondan alınan bloklar mineralojik olarak aynı özellikleri göstermelerine rağmen yapısal özellikleri bakımından birbirleri arasında farklar bulunmaktadır. 1., 2. ve 3. bloklardan çıkarılan karotların boşluk özellikleri benzer olmakla birlikte 4. bloktan çıkarılan karotların boşluk özellikleri ise diğer 3 bloğa göre farklılık göstermektedir. İlk 3 bloktan çıkarılan karotlar genellikle 0,5 mm'den küçük çapa sahip küresel boşluklar içermekle birlikte çok az sayıda da olsa 1,5 mm üzeri çapta küresel boşluklara da sahiptirler. 4. blokta ise önceki bloklarda bulunan küçük çaplı küresel boşlukların yanı sıra ağırlıklı olarak 1 ile 3 mm arasında çapa sahip küresel boşluklara sahiptirler. Bu küresel boşlukların yanı sıra az sayıda olsa da 3 ile 5 mm arasında çapa sahip olan küresel boşluklarda bu karotlarda bulunmaktadır. Bu boşluk özelliklerinin yanı sıra tüm karotlarda çok sayıda küçük çaplı küresel boşluğun yan yana bulunduğu, çok zayıf bir kaya malzemesi ile birbirinden ayrılan yüklemeye paralel ve dik yönde olan doğrusal yapıda boşluklar gibi davranan lokal yapılar da bulunmaktadır. Bu lokasyondan alınan bloklardan çıkarılan karotların bloklara göre ortalama gerçek porozite değerleri ise 1. blok için %12,42, 2. blok için %16,96, 3. blok için %14,78 ve 4. blok için %12,94 olarak hesaplanmıştır. Bloklardan çıkarılan karotlar üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde gerçek porozite değerlerine bağlı olarak net ve keskin ayırt edici sınırlar ortaya çıkmamıştır. Bu durum, yenilmeye neden olan çatlak oluşumu ve ilerlemesini kontrol eden boşluk özelliklerinin bu karotlarda tek başına çatlak ilerlemesini kontrol eden parametre olmaması nedeniyle gözlenmiştir. Boşluk özellikleri çatlak oluşumu ve ilerlemesi için en önemli parametre olsa da bu lokasyondan alınan karotlarda oluşan çatlakların ilerlemesi karotların yüzeylerinde de gözlenen akma izlerinin doğrultusu boyunca meydana gelmiştir. Deney sonrasında karotlar üzerinde yapılan incelemelerde yenilme düzlemleri ile akma doğrultularının benzer olması bu durumun en belirgin sonucu olarak öne çıkmaktadır. Tek eksenli yükleme koşullarında yenilme boşluklarda oluşan çatlakların akma izlerinin doğrultuları boyunca ilerlemesi sonucunda meydana gelen makaslama çatlakları ile oluşmuştur. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen dayanım değerleri ise 67,84 ile 139,37 MPa arasında değişmekte olup, yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 6.2'de verilmiştir. Tek eksenli yükleme koşullarında meydana gelen yenilme davranışına benzer şekilde de üç eksenli yükleme koşullarında da gerçek porozite değeri yenilme davranışı üzerinde tek başına kontrole sahip değildir. 0,5 ile 1,5 MPa arasında değişen yanal basınç değerlerinde farklı gerçek porozite değerine sahip olan 9 karot üzerinde yapılan üç eksenli sıkışma

dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapısal özellikleri bakımından benzerlik gösteren 1. ve 2. bloktan çıkarılan karotların kohezyon değeri 20 MPa ve içsel sürtünme açısı ise 47° , 3. ve 4. bloktan çıkarılan karotların kohezyon değeri 18 MPa ve içsel sürtünme açısı değeri 52° olarak bulunmuştur. Her iki yükleme koşulunda da yenilmeye neden olan çatlak ilerlemesi akma izlerini yönelimine benzer doğrultuda olacak şekilde ilerlemiş ve 30° ile 60° arasında açığa sahip makaslama çatlakları sonucunda yenilme meydana gelmiştir.



Şekil 6.4. L-2'den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.

Foged ve Andreassen (2016) tarafından İzlanda'da bulunan volkanik kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri üzerinde yapılan çalışmada karotların yoğunluk değerlerinin $2-3 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişiklik gösterdiği örnekler üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen dayanım değerleri ile yoğunluk değerleri arasında bir korelasyon bulunmayıp oldukça geniş bir aralıkta (10 ile 200 MPa) arasında bir dağılım göstermektedir. Birim hacim ağırlık değerlerinin değişimi karotların gerçek porozite değerleri ile doğrudan ilişkilidir. Söz konusu bu ilişki dikkate alındığında alındığında araştırmacılar tarafından akma izlerinin gözlenebildiği Holosen ($< 12,000$ yıl) ve Pleyistosen ($11,70 - 2,58 \text{ my}$) yaşlı genç volkanizma ürünlerinde yenilme davranışının L-2'den alınan örneklerde de olduğu gibi ağırlıklı olarak akma izlerinin kontrolünde olduğu öngörülmüştür. Hem bu çalışma hem de Foged ve Andraessen (2016) tarafından yapılan çalışmaların benzer jeolojik kökene sahip olan genç volkanizma ürünlerinde yapılmıştır. Her iki çalışmada da karot örneklerin hem tek hem de üç eksenli koşullarda dayanım ve deformasyon değerleri çok geniş bir aralıkta dağılım göstermekte olup, birim hacim ağırlığı ve gerçek porozite değerleri ile korele edilebilir bir ilişki ortaya koymamaktadır. Birçok genç volkanizma ürününde oluşumu soğuma evresi sırasında akma izleri gözlenebilmektedir. Yapılan hem tek hem de üç eksenli sıkışma dayanımı

deneyleri sonucunda karotlarda da yenilme söz konusu bu akma izleri doğrultusunda meydana gelmiştir. Elde edilen tüm sonuçlara göre akma izlerinin karotların içerdikleri boşluk özelliklerinden bağımsız olarak yenilme davranışı üzerinde çok daha etkili olduğu yorumu yapılabilir.

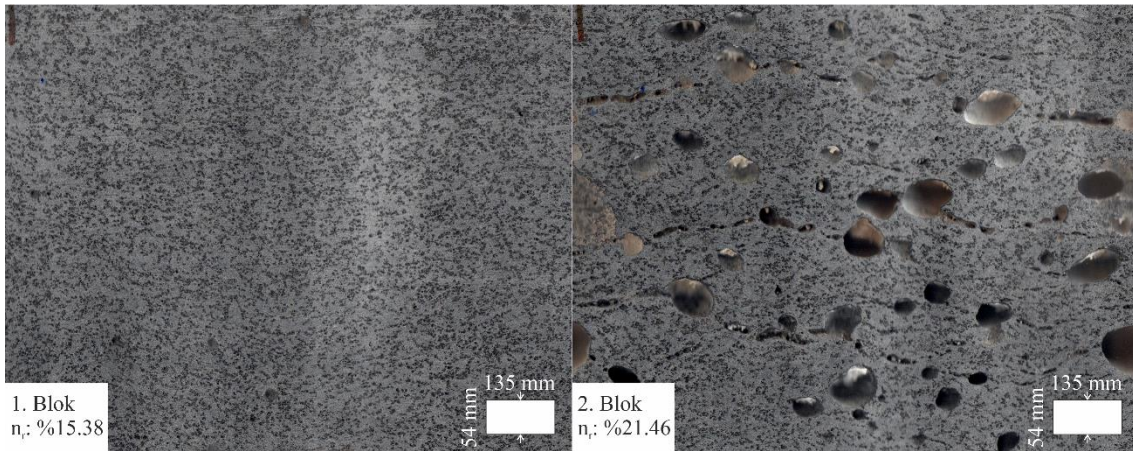
Çizelge 6.2. L-2’den alınan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.

No	n _r (%)	Tek eksenli yükleme		Üç eksenli yükleme		c (MPa)	φ (°)
		σ _c (MPa)	E _s (GPa)	σ (MPa)	E _s (GPa)		
K-1	11,35	16,28	6,41				
K-3	13,50	15,50	7,95				
K-20	18,48	14,74	6,00				
K-21	17,62	20,37	6,70				
K-22	14,77	32,61	10,44				
K-9	15,06			36,96 (σ ₃ =0,5)	3,83		
K-8	13,73			99,25 (σ ₃ =1)	9,55		
K-25	13,58			142,89 (σ ₃ =1)	12,73	20	47
K-26	17,75			108,12 (σ ₃ =0,5)	11,84		
K-30	15,95	14,02	7,87				
K-31	13,94	23,01	12,49				
K-32	14,45	14,40	4,67				
K-50	22,36	16,27	6,55				
K-42	15,31			110,78 (σ ₃ =1,5)	5,41		
K-43	13,78			106,71 (σ ₃ =1)	5,77		
K-44	12,72			100,88 (σ ₃ =0,5)	7,88	18	52
K-49	13,10			110,41 (σ ₃ =1,5)	10,37		

6.3. L-3 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki

L-3’te gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında boşluk özellikleri bakımından farklılık gösteren 2 adet blok alınmıştır. Bu lokasyondan alınan bloklardan çıkarılan karotlardan iki tanesinin yüzey tarama görüntüleri ise Şekil 6.5’te verilmiştir. Gerçek porozite değerlerinin belirlenebilmesi için yapılan çalışmalarda 1. bloğun ortalama gerçek porozite değeri %15,38, 2. bloğun ortalama gerçek porozite değeri ise %21,46 olarak bulunmuştur. İki blok mineralojik olarak aynı köke sahip olsa da boşluk özellikleri bakımından birbirinden farklılaşmaktadır. 1. bloktan çıkarılan karotlarda çapı 0,5 mm ve altında olan çok sayıda küresel boşluk bulunmaktadır. Söz konusu olan bu boşluklar karotun genelinde yayılım gösterdiği için doğal dokusal özellik olarak nitelendirilebilir. 2. bloktan çıkarılan karotlarda ise çapı 0,5 mm ve altında olan çok sayıda küçük çaplı küresel boşluğun yanı sıra sayısı çok sayıda büyük çaplı (R:25 ile 30 mm) küresel boşluklar da yer almaktadır. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri arasında da her iki bloktan çıkarılan karotlarda 2 katı varan farklar bulunmaktadır. 1. bloktan çıkarılan karotların ortalama tek eksenli

sıkışma dayanımı değerleri 51,11 MPa iken 2. blok için ise bu değer 24,10 MPa olarak hesaplanmıştır. Tek eksenli yükleme koşullarında bloklar arasında meydana gelen bu farkı gerçek porozite değerinde değişim ile birlikte bu değişime neden olan boşlukların çaplarının etkili olduğu söylenebilir. 1. bloktan çıkarılan karotlarda bulunan çok sayıda küçük çaplı küresel boşluktan herhangi birinde çatlak oluşumu meydana gelebilir. Ancak farklı boşluk özelliklerine sahip olan 2. bloktan çıkarılan karotlarda çatlak oluşumu öncelikle büyük çaplı olan boşluklarda meydana gelmekte ve çatlak ilerlemesi de büyük boşluklar arasında olmaktadır. Bu nedenle de ikinci blokta daha çok deformasyon meydana gelmekte, dayanım ise çok daha düşük değerlere ulaşmaktadır. Bu lokasyondan alınan örneklerde tek eksenli yükleme koşullarında dayanım ve deformasyon değerleri arasındaki farklılık üzerinde gerçek porozite değeri ile birlikte boşluk çapının etkili olduğu söylenebilir. L-3'ten alınan bloklardan çıkarılan karotlardan 6 tanesi üzerinde farklı yanal basınç değerlerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi de yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ortalama gerçek porozite değeri %15,38 olan 1. blokta (400 ile 500 MPa), gerçek porozite değeri %21,46 olan 2. bloğa göre daha yüksek dayanım değerlerine (300 ile 350 MPa) ulaşılmıştır. 1. bloktan çıkarılan karotların kohezyon değeri 70 MPa ve içsel sürtünme açısı değeri ise 53° , ortalama gerçek porozite değeri daha yüksek olan ve daha büyük çapta boşluklara sahip olan 2. bloktan çıkarılan karotların kohezyon değeri 60 MPa ve içsel sürtünme açısı ise 47° olarak bulunmuştur. Gerçek porozite ve boşluk çapındaki değişim makaslama parametrelerinde de azalmanın meydana gelmesine neden olmuştur. Üç eksenli yükleme koşullarında çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin gerçek porozite değeri ile bağlantılı olduğu ve boşlukların özelliklerinden ziyade toplam gerçek porozite değerleri ile ilişkili olduğu söylenebilir.



Şekil 6.5. L-3'den alınan 2 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.

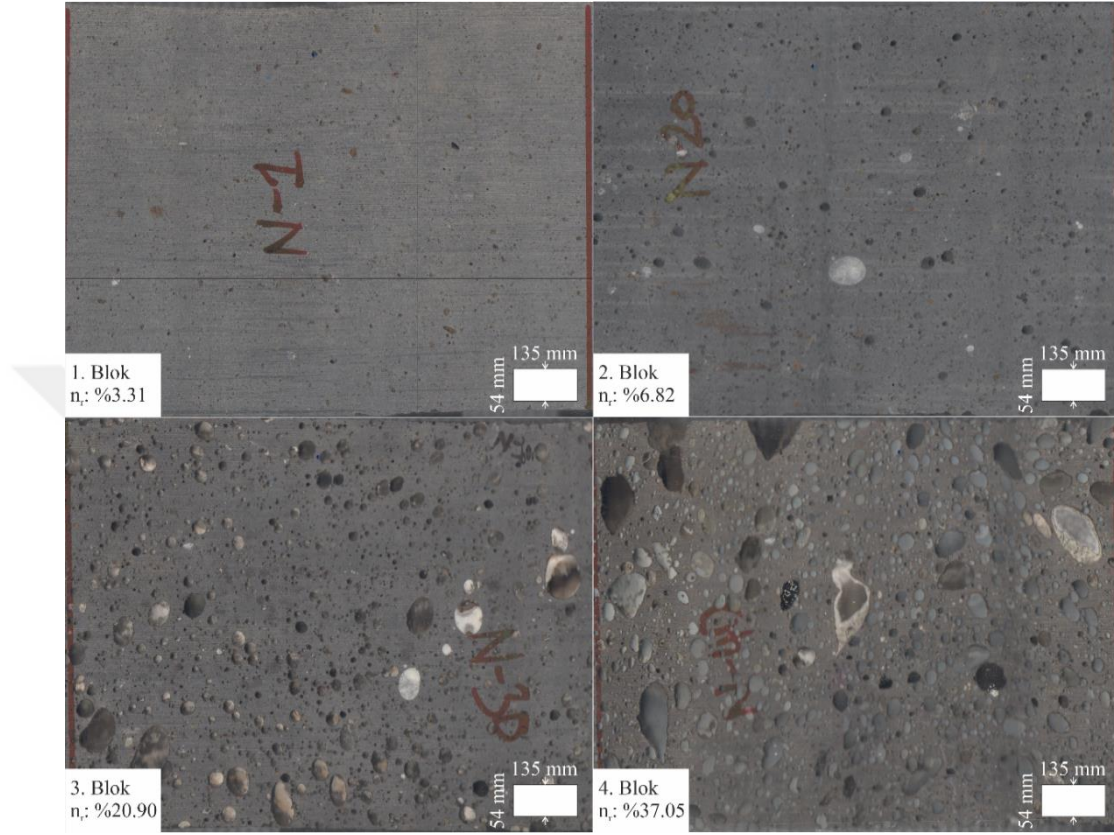
Griffiths vd. (2017) tarafından kaya malzemelerinin sahip oldukları boşlukların geometri ve yönelimlerinin dayanım ve sıklık üzerindeki etkisinin araştırılmasına yönelik olarak sentetik modeller üzerinde RFPA2D (Rock Failure Process Analysis) yazılımı kullanılarak araştırma yapmışlardır. Araştırmacılar karot örnekler içerisinde çap oranı 0,2 ile 1,0 arasında değişecek şekilde dairesel (2 boyutlu) ve eliptik olacak şekilde boşluklar oluşturarak bu yapısal unsurların etkisi üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar farklı çap oranına sahip olan boşlukların yerleşimlerinin ve yönelimlerini etkisinde ayrıca değerlendirmişlerdir. Boşluklar sırasıyla yükleme boşluk yönelim açısı 0° , 45° ve 90° olacak şekilde yerleştirilmiş ve toplam porozite değeri %10 olarak sabit tutulmuştur. Model boyutları ise 40×20 mm olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda L-3'ten alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerde gözlenene benzer şekilde boşluk yöneliminin 90° olduğu (en geniş çapın yüklemeye dik olduğu koşul) ve 2. bloktan çıkarılan karotlara benzer şekilde dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Doğal koşullarda arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında L-3'ten alınan bloklara benzer şekilde küresel ve küresele yakın şekilli boşluklar sahip blokların bulunması çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle de boşluk özelliklerinin etkisinin farklı boşluk özelliklerine sahip olan karotlar üzerinde deneyler yapılarak araştırılması çoğu zaman başılamamaktadır. Deneysel yöntemlerde ortaya çıkan bu açığın kapatılabilmesi için son dönemde özellikle nümerik modelleme yazılımları da yaygın olarak tercih edilmektedir. Boşluk özelliklerinin nümerik olarak araştırılması sırasında öne çıkan en büyük sorun ise model detayıdır. Çapı küçük olan küresel boşlukların modellenenbilmesi için çok yüksek iterasyon kapasitesine sahip donanımlara ihtiyaç duyulmakta, bu da altyapı maliyetlerini arttırmaktadır.

Çizelge 6.3. L-3'e ait olan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri

No	n_r (%)	Tek eksenli yükleme		τ (MPa)	Üç eksenli yükleme		
		σ_c (MPa)	E_s (GPa)		E_s (GPa)	c (MPa)	Φ ($^\circ$)
BE-1	15,31	31,81	5,59				
BE-2	14,80	57,87	4,87				
BE-3	15,83	46,57	5,07				
BE-4	15,50	43,30	3,74				
BE-5	15,39	56,68	5,24				
BE-11	15,16	20,81		481,01 ($\sigma_3=1$)	36,78		
BE-12	15,78	30,35		499,00 ($\sigma_3=1,5$)	43,98	70	53
BE-13	14,37	23,00		392,00 ($\sigma_3=0,5$)	29,86		
BE-20	21,20	25,02	0,97				
BE-21	20,64	21,32	1,44				
BE-22	21,51	31,81	0,66				
BE-23	22,64	57,87	1,31				
BE-24	21,28	46,57	1,04				
BE-25	20,00	43,30		309,00 ($\sigma_3=1$)	29,50		
BE-26	19,72	56,68		352,00 ($\sigma_3=1,5$)	36,71	60	47
BE-27	23,63	20,81		293,00 ($\sigma_3=0,5$)	30,64		

6.4. L-4 Örneklerinin Yenilme Davranışı ve Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki

L-4'ten alınan 4 farklı bloğa ait olan yüzey tarama görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir. L-4'ten alınan blokların ortalama gerçek porozite değerleri ise %3,31 ile %37,05 arasında değişim göstermektedir. 1. ve 2. bloktan çıkarılan karotların gerçek porozite değerleri çok düşük olup var olan az sayıdaki boşluk dairesel şekilli ve çapları 0.10 mm ve altında olmakla birlikte 2. blokta boşlukların çapları 1,5 ile 2 mm'ye kadar çıkabilmektedir. 1.ve 2. bloktan çıkarılan karotlardaki boşluklar küresel şekilli olup yapısal olarak benzer özelliklere sahiptirler. 3. blokta ise 1. ve 2. blokta bulunan 0,1 mm ve altında çapa sahip olan dairesel şekilli boşluklara ek olarak çapı 30 mm'ye kadar varan küresel ve elipsoit şekilli boşluklar da bulunmaktadır. 3. bloktan çıkarılan karotlarda gerçek porozite değerindeki artışın kaynağı büyük çaplı olan boşluklardır. Ortalama gerçek porozite değerinin en yüksek olduğu 4. bloktan çıkarılan karotlarda ise boşlukların çap değerleri 3. bloktan çıkarılan örneklerle benzerlik göstermekle birlikte boşluklar daha köşeli yapıdadır. Bu lokasyondan alınan 4 bloktan çıkarılan örnekler üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde gerçek porozite değeri %10'un altında olan 1. ve 2. bloktan çıkarılan karotların dayanım değerleri 40 ile 50 MPa, ortalama gerçek porozite değeri %20'nin üzerinde olan 3. ve 4. bloktan çıkarılan karotların dayanım değerleri 10 ile 30 MPa arasında değişim göstermektedir. Özellikle boşluk çapının ve ortalama gerçek porozite değerinin düşük olduğu 1. ve 2. bloktan çıkarılan karotların dayanım değerleri diğer karotların yaklaşık olarak 2 katına kadar ulaşmaktadır. Bu lokasyondan alınan örneklerin üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerin sonucunda 1. ve 2. blokların çok benzer dayanım ve deformasyon değerlerine (200 ile 250 MPa) sahiptir. 3. ve 4. bloklardan çıkarılan karotların dayanım değerleri ise (40 ile 50 MPa) 1. ve 2. bloğa ait örneklerle göre ise çok daha düşüktür. Hem tek hem de üç eksenli yükleme koşullarında bloklar arasında meydana gelen bu farklı yenilme davranışını en önemli nedeni 3. ve 4. bloktaki boşlukların çaplarının büyümesi ve bununla birlikte 4. bloktan çıkarılan karotlarda boşluk geometrisinin küresellikten düzensiz şekilliye doğru geçiş göstermesidir. Özellikle daha köşeli yapıya sahip boşlukların bu köşe noktalarında gerilim yoğunlaşması çok daha fazla olmakta ve küresel boşluklarda meydana gelen çatlak oluşumu bu noktalarda çok daha erken meydana gelmektedir. Bunun sonucunda da kaya malzemesinde hem tek hem de üç eksenli yükleme koşullarında çatlaklar çok erken safhada oluşmaya başlamakta ve dayanım değeri de son derece düşük olmaktadır. Bu lokasyona ait örnekler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Griffiths vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ile de benzerlik göstermektedir.



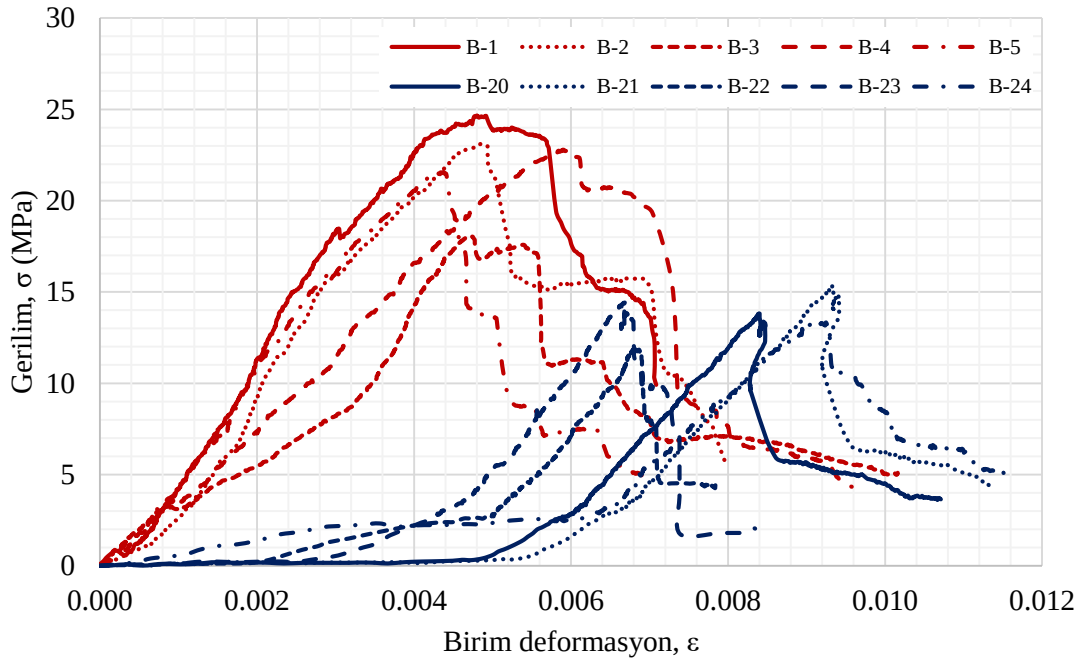
Şekil 6.6. L-4'den alınan 4 farklı bloktan çıkarılan karotların yüzey tarama görüntüleri.

Çizelge 6.4. L-4'e ait olan örneklerin dayanım ve deformasyon parametreleri.

No	nr (%)	Tek eksenli yükleme		Üç eksenli yükleme			Φ (°)
		σ_c (MPa)	E_s (GPa)	τ (MPa)	E_s (GPa)	c (MPa)	
N-3	3,01	42,57	0,78				
N-4	3,98	63,13	4,39				
N-5	3,45	29,82	1,14				
N-20	6,52	39,85	1,27				
N-21	6,73	64,42	3,57				
N-22	7,17	52,58	4,33				
N-23	6,80	23,49	0,98				
N-24	6,89	33,47	1,50				
N-25	6,39			191,09 ($\sigma_3=0,5$)	11,85		
N-26	6,25			211,45 ($\sigma_3=1$)	11,37	20	65
N-27	6,90			204,53 ($\sigma_3=1,5$)	10,72		
N-30	19,68	34,51	1,62				
N-31	20,89	22,83	0,72				
N-32	20,31	29,17	1,17				
N-40	35,11	11,80	0,55				
N-33	21,91			56,05 ($\sigma_3=0,5$)	2,26		
N-35	17,97			81,62 ($\sigma_3=1$)	0,92		
N-43	31,47			33,16 ($\sigma_3=0,5$)	1,94	4	60
N-44	29,11			46,18 ($\sigma_3=1$)	1,56		

6.5. Beton Örneklerin Yenilme Davranışları İle Boşluk Özellikleri Arasındaki İlişki

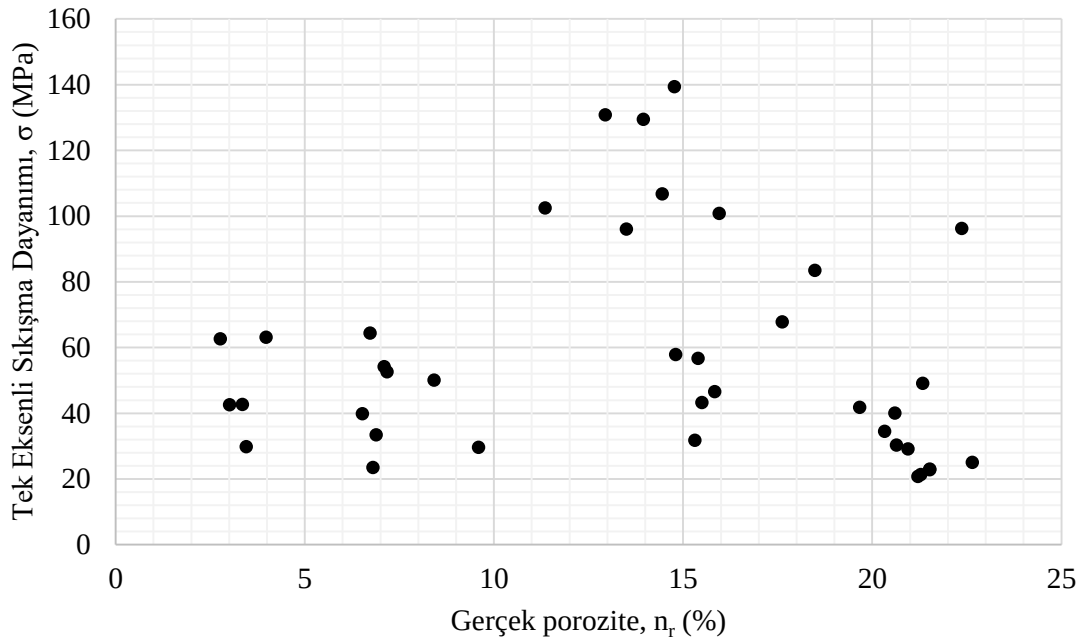
Kaya malzemeleri ile benzer yenilme davranışı göstermesi ve istenilen boşluk geometrisine sahip olan örneklerin hazırlanabilme imkanının kısmen olsa bulunması nedeniyle beton örnekler dayanım ve deformasyon üzerinde boşluk özelliklerinin etkisinin araştırılması için kullanılmıştır. Gerçek porozite değeri %10'un altına olan ve sağlam kaya malzemesini temsil ettiği kabul edilen 5 (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5), gerçek porozite değeri %10'un üzerinde olan ve boşluklu kaya malzemesini temsil ettiği kabul edilen de 5 beton örnek (B-20, B-21, B-22, B-23, B-24) hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler üzerinde ise deformasyon kontrollü olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. (Şekil 6.7). Boşluklu beton örnekleri hazırlanırken kullanılan straforlar ile küresel boşluklar oluşturulabilmiştir. Boşluklu olan beton örneklerinin dayanım değerleri boşluksuz olanlara göre %40 ile 45 oranında daha düşüktür. Beton örnekler üzerinde yapılan deneyler sonucunda boşlukların dayanım üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bununla birlikte beton örnekler hazırlanırken kullanılması gereken farklı tane çapındaki kum karışımı örnek boyutlarının küçük olması ve gerçek porozite değerinin %10'un altında tutulabilmesi amacıyla kullanılmamıştır. Aynı yöntem gerçek porozite değeri %10'un üzerinde olan örneklerde de tercih edilmiştir. Kum kullanılması durumunda kum taneleri arasında da boşluklar oluşacağından küresel şekilli olan boşlukların etkisinin tam gözlenmesi mümkün olamayacağı için bu yöntem tercih edilmiştir. Bununla birlikte hazırlanan örnek boyutlarının küçük olması, kum kullanılmaması, boşlukların dayanım değerlerini çok fazla düşürmesi ve en düşük yanıl basınç değerinde dahi örneklerde aşırı deformasyon meydana gelmesi nedeniyle beton örneklerde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılamamıştır. Beton örnekler üzerinde boşluk özelliklerinin araştırılabilmesi için kum kullanımı ve örnek boyutunun arttırılması gerekmektedir. Boşluksuz olan beton örneklerde tek eksenli yükleme koşullarında yenilme yüklemeye paralel yönde gelişen çatlaklar ile meydana gelmiştir. Boşluklu olan beton örneklerinde ise boşlukların bulunduğu bölgelerde yoğun çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu durum nedeniyle deneyin ilk aşamalarında 0.5 mm'ye kadar deformasyon meydana gelmiştir. Meydana gelen bu deformasyon ile boşlukların kısmen kendi içinde kapanması sonrasında dayanım değerleri artmaya başlamıştır.



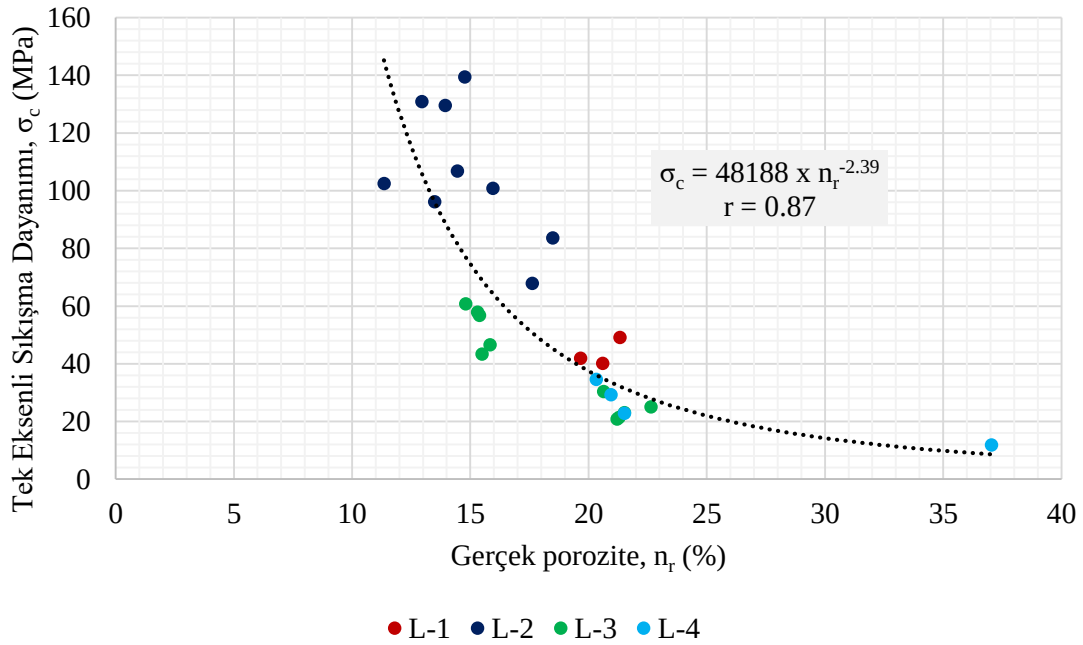
Şekil 6.7. Tek eksenli yükleme koşulları için beton örneklerin gerilim-birim deformasyon grafikleri.

6.6. Boşluk Özelliklerinin Dayanım ve Deformasyon Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Tüm örnekler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ile gerçek porozite değerleri arasındaki ilişki Şekil 6.8’de verilmiştir. Tüm örnekler dikkate alındığında bu iki parametre arasında korelasyonu yüksek bir ilişkinin bulunmadığı görülmektedir. Ancak gerçek porozite değerleri %10’un altında olan örnekler ile %10’un üzerinde olan örneklerin söz konusu bu parametreler bazındaki ilişkisi birbirinden tamamen ayrılmaktadır. Gerçek porozite değeri %10’un altına olan örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ile olan ilişkisi dağınık ve korelasyonu düşük iken, %10’un üzerinde olan örneklerin ilişkisi daha yüksek korelasyona sahiptir (Şekil 6.9). Veriler arasında bu yaklaşım baz alınarak yapılan ayrıştırma sonucunda gerçek porozite değeri %10’un üstünde olan örneklerin gerçek porozite-dayanım değerleri arasında yüksek korelasyon katsayısına ($r: 0,87$) sahip bir ilişki olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar nedeniyle gerçek porozite değeri %10’un altında olan örnekler dikkate alınmamıştır. Bununla birlikte gerçek porozite değeri %10’un altında olan tüm örnekler incelenmiş ve daha yüksek gerçek porozite değerine sahip örneklerle benzer büyük çapta boşluk içermedikleri de doğrulanarak yanlış bir değerlendirme yapılmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 6.8. Örneklerin tümünden elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı ile gerçek porozite arasındaki ilişki.



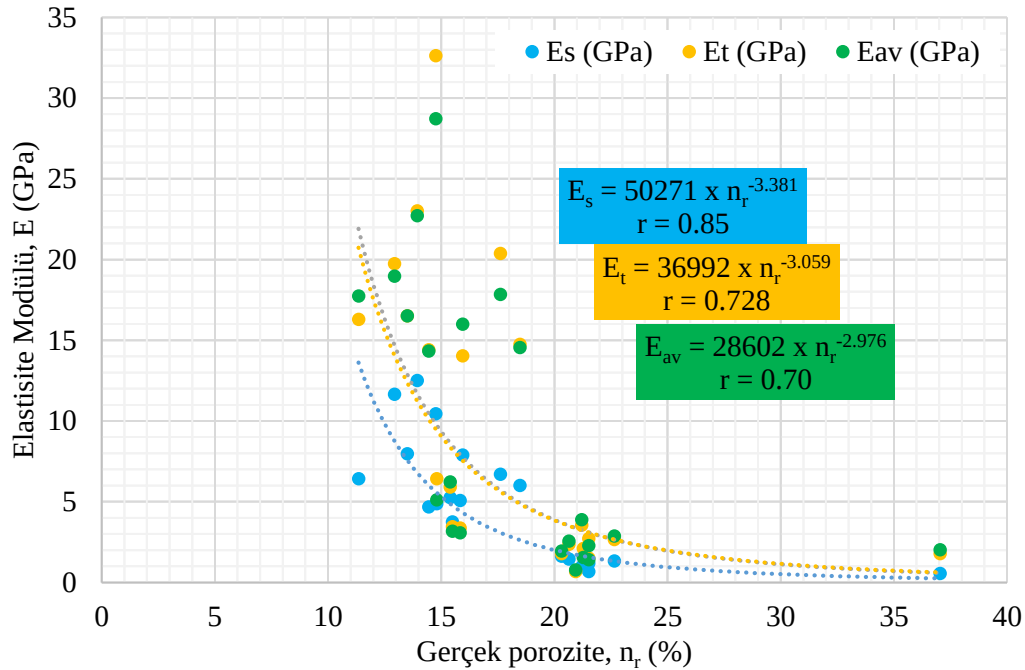
Şekil 6.9. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile gerçek porozite (> %10) arasındaki ilişki.

Tek eksenli yükleme koşullarında her ne kadar kayacın kökeni, oluşum koşulları, kendine has yapısal unsurları etkili olsa da dayanım ve deformasyon davranışını etkileyen en önemli parametrenin gerçek porozite değeri ve boşluk özellikleri olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan bloklardan çıkarılan karotlarda gerçek porozite değerlerinin ortalama olarak %15'e kadar olduğu örneklerde boşluklar 1 mm ve altında çapta, küresel şekilli ve çok sayıdadır. Ortalama değer %15'in üzerine çıktığı durumlarda ise 1 mm ve altında çapta, küresel ve çok sayıda olan boşluklara ek olarak 1 mm'den daha büyük çapta olan, hem küresel hem de düzensiz şekilli olan boşluklar da bulunmaktadır. Gerçek porozite değerlerinde bu artışa geometrik olarak daha büyük çap ve ölçülerde olan küresel ve düzensiz şekilli boşluklar nedeniyle ulaşılmıştır. Deneyler sırasında yapılan gözlemler ve fotoğraf çekimleri ile yüklemenin ilk aşamalarında büyük çapta boşluklara sahip örneklerde çatlakların ilk olarak oluştuğu da belirlenmiştir. Oluşan bu ilk çatlaklara bağlı olarak çatlak ilerlemesi de yüklemenin erken safhalarında gerçekleşmiştir.

Üç eksenli yükleme koşullarında ise boşluk özelliklerinin değişimin etkisi ağırlıklı olarak dayanımdaki değişimde gözlenmektedir. Özellikle boşluk çapının büyüdüğü ve gerçek porozite değerinin %15'in üzerinde olduğu örneklerde dayanımda %50'ye varan azalma meydana gelmektedir. Dayanım değerlerinde meydana gelen bu büyük fark deformasyon değerlerinde ise gözlenmemektedir. Deformasyon değerlerinde meydana gelen düşüş dayanım değerlerine göre daha az miktardadır. L-1, L-3 ve L-4'ten alınan örnekler üzerinde farklı yanal basınç değerlerinde yapılan tüm deneylerde gerçek porozite değerindeki artış dayanımda ve deformasyonda azalmaya neden olmuştur. Sadece L-2'den alınan örnekler bu durum gözlenememiştir. Bu farklılığın en önemli nedeni ise L-2'den alınan örneklerde bulunan akma izlerinin karotun yenilmesine neden olacak çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerinde boşluk özellikleri ile birlikte etkili olmasıdır. Söz konusu bu etkinin ortaya konulabilmesi için ise gelecekte yapılması muhtemel çalışmalarda akma yönü ve akma yönü ile yükleme yönü arasındaki ilişki gibi parametrelerin tanımlanması ve bunların etkileri üzerinde çalışılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Örneklerin boşluk özelliklerinin deformasyona etkisinin görülebileceği elastisite modülü verilerinde ise kiriş (sekant), teğet (tanjant) ve ortalama elastisite modülü için ayrı ayrı hesaplamalar yapılarak elde edilen değerler gerçek porozite değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.10). Deneyler sırasında elde edilen dayanım-deformasyon eğrisinin büyük bir bölümünü dikkate alan teğet (tanjant) ve ortalama elastisite modülü değerleri ile gerçek porozite değerleri arasındaki korelasyon katsayısı

kiriş (sekant) elastisite modülü değerlerine göre daha düşük korelasyon katsayısına sahiptir. Bu farklılığın en önemli nedeni ise boşluk özelliklerine bağlı olarak deneylerin ilerleyen aşamalarında aşırı deformasyon meydana gelebilmesi ve dayanımın düşmesi nedeniyle aynı lokasyon ve bloktan alınan karotlar içinde dahi farklı dayanım-deformasyon eğrilerinin elde edilmesi olarak açıklanabilir. Nümerik çalışmalarda da kalibrasyon aşamasında hedef parametrelerinin başında gelen elastisite modülünün teğet (tanjant) veya ortalama elastisite modülü değerlerinden birisinin seçilmesi halinde kaya malzemesinin özelliklerinin yanlış kalibre edilmesi sorunu ortaya çıkmaktadır. Söz konusu bu kısıtlamalar nedeniyle yapılan değerlendirmelerde dayanım-deformasyon eğrisinin ilk %50'lik kısmını dikkate alan kiriş (sekant) elastisite modülünün kullanılmasının daha faydalı olacağı düşünülmüştür. Kiriş (sekant) elastisite modülü ile gerçek porozite değerleri arasında ise korelasyon katsayısı ($r = 0,85$) yüksek olan bir ilişki söz konusudur. Elastisite modülü ve gerçek porozite değerleri arasında korelasyon katsayısı en yüksek olan kiriş (sekant) elastisite modülü değerleri nümerik çalışmalarda oluşturulan modellerde kalibrasyon aşamasında hedef elastisite modülü değerleri olarak seçilmiştir.



Şekil 6.10. Elastisite modülü değerleri ile gerçek porozite (>%10) değerleri arasındaki ilişki.

7. BOŞLUK ÖZELLİKLERİNİN DAYANIM ve DEFORMASYON ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN NÜMERİK YÖNTEMLER KULLANILARAK ARAŞTIRILMASI

Gelişen yazılım ve donanım teknolojisine paralel olarak son dönemde yerbilimleri ile ilgili olan birçok çalışma alanında modelleme ve nümerik analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kaya malzemelerinin farklı yapısal koşullar altındaki davranışlarının araştırılabilmesi için istenilen ve ihtiyaç duyulan örnekleme çalışmalarının yapılabilmesi çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle modelleme ve nümerik analiz yazılımları ile boşluk, çatlak ve çentik gibi yapısal unsurları barındıran modeller oluşturularak farklı koşullar için çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. Yapılan bu çalışmalar ile çeşitli yapısal unsurların kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon davranışları üzerindeki etkilerinin araştırılması da mümkün olmaktadır. Modelleme ve nümerik analiz yöntemlerinin sunduğu bu geniş hareket alanı sayesinde yerbilimlerinin yanı sıra yerbilimleri ile ilgili birçok alanda da tercih edilmektedir. Tez çalışmasının kapsamının boşluklu kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin araştırılması olması ve istenilen her boşluk koşuluna ait örnekleme yapılmasının mümkün olmaması nedeniyle modelleme ve nümerik analiz yöntemleri kullanılarak birçok farklı boşluk özelliğine yönelik olarak değerlendirme yapılabilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla tez çalışması kapsamında Cundall ve Strack (1979) tarafından geliştirilen ve ayırık elemanlar yöntemini (discrete element method) temel alan, iki boyutta dairesel diskler, üç boyutta küresel tanecikler ve bunlar arasındaki etkileşimi de bağlar ile temsil eden Particle Flow Code Suite 5.0 (PFC) yazılımı kullanılmıştır. PFC yazılımı Itasca Consulting Group, Inc tarafından geliştirilmektedir.

7.1. Particle Flow Code (PFC) Yazılımı ve Çalışma Prensipleri

PFC ilk kez 1994 yılında zemin ve kaya malzemelerinin davranışları, şev stabilitesi ve kaya düşmesi riskleri ile hidrolik çatlatma gibi konuların araştırılmasında kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de benzer konular üzerinde araştırmalarına devam eden araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde tercih edilen nümerik yazılımların başında gelmektedir. PFC yazılımı birçok disiplin tarafından kullanılabilen çok amaçlı, ayırık elemanlar yöntemini temel alan, hem iterasyon yapabilen hem de kullanıcı ara yüzüne sahiptir ve çok geniş özellikleri bulunmaktadır. PFC yazılımı hem iki hem de üç boyutta sonlu yapıdaki sentetik malzemelerinin hareketlerini ve dış etkenlere bağlı olarak

davranışlarını simüle edebilen bir yazılımdır (Potyondoy, 2015). PFC ile ilgili olarak bu bölümde yapılan tanımlama ve açıklamalarda ise sentetik malzemeyi oluşturan yapıyı temsil edecek şekilde “*tanecik*” terimi kullanılmıştır. Sentetik malzemeleri oluşturulan ve “*ball*” olarak tanımlanan disk ve küresel tanecikler ise birbirlerine “*contact*” adı verilen bağlar ile tutturulurlar. Tanecikler birbirlerinden bağımsız olarak hareket edebilen ve dönebilen katı cisimlerdir. Bu tanecikler aynı zamanda iç kuvvet ve moment etkisiyle çift yönlü olarak birbirleri ile temas edebilirler, etkileşime girebilirler. PFC yazılımında temel olarak Newton’un hareket kanunları dikkate alınır, tüm hesaplama ve iterasyonlar bunlara göre yapılır. Jeolojik açıdan bakıldığında ise PFC ile hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz malzemeler sentetik olarak oluşturulabilmekte ve gerekli deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. PFC’de yapılan tüm işlemler belirli kabuller temel alınarak yapılmaktadır.

Bu kabuller;

1. Tüm tanecikler katı birer parçacıktır.
2. Tanecikler iki boyutta diskler, üç boyutta küreler ile temsil edilirler.
3. “*Clump*” yaklaşımı kullanılarak taneciklerden oluşan ve “*pebble*” olarak tanımlanan bileşik yapılar oluşturulabilir. Bu yaklaşımla istenilen şekilde tanecik topluluğu tek bir parça şeklinde oluşturulabilir. Sadece bu koşulda geçerli olmak üzere tanecikler iç içe geçebilir.
4. Tanecikler iç kuvvet ve moment etkisiyle çift yönlü olarak birbirleri ile etkileşime girebilirler. Tanecikler arasındaki bağlarda sürekli olarak tanecikler arası etkileşime bağlı olarak iç kuvvet ve moment prensiplerine uygun olarak davranırlar.
5. Tanecikler arasındaki temas davranışı çok küçük bir noktada gerçekleşir. Bu temas nedeniyle taneciklerde herhangi bir şekil değişikliği olmaz. Söz konusu temas sonucu meydana gelen hareket kuvvet-yer değiştirme kanuna uygun olarak gerçekleşir.
6. Bağlar tanecikler arasında hem temasa bağlı olarak (kohezyonsuz malzeme) hem de ön tanımlı olarak sentetik malzemenin oluşturulması sırasında (kohezyonlu malzeme) oluşabilir.
7. Temas yerine daha uzun mesafeli etkileşimler ise enerji potansiyeli fonksiyonlarından elde edilebilir.

“*Particle rigidity*” olarak tanımlanan yaklaşım özellikle fiziksel sistemdeki dış etkenlere bağlı olarak meydana gelen deformasyonun büyük bir bölümünün meydana gelen ara yüzeyler boyunca oluştuğunu dikkate almaktadır. Kaya ya da kum gibi granüler malzemelerde meydana gelen deformasyon da bu yaklaşımın temel aldığı yaklaşım ile tanımlanmaktadır. Çünkü bu malzemelerde deformasyon temel olarak taneciklerin belirli bir yüzey boyunca hareket etmesi ve kendi eksenleri

etrafında dönmesi ile gerçekleşmektedir. Bu yaklaşım ile malzemelerde meydana gelen deformasyon tahmin edilebilmesi için çok detaylı modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmamakta, bu sayede kullanıcı üzerindeki iş yükü de azalmaktadır. PFC yazılımında da taneciklerin dış etkenlere bağlı olarak hareket ve yer değiştirme özellikleri bu yaklaşıma göre gerçekleşmektedir. Potyondy ve Cundall (2004)'e göre sentetik modelin davranışı yüklemeye bağlı olarak her bir tanecikte meydana gelen hareket ve yer değiştirme ile temsil edilir. Sentetik malzemeye uygulanan gerilme ise tanecikler arasındaki bağlar aracılığı ile tanecikler arasında aktarılır ve bu bağların uygulanan gerilmeye karşı direnç gösterememesi sonucunda oluşan ve yapay çatlaklar olarak tanımlanan bağ kopmalarının oluşmasına bağlı olarak yenilme meydana gelir. PFC'de yapılan tüm işlemler FISH programlama dili ile yapılabilmektedir. FISH programlama diline ek olarak ise Python programlama dili de son versiyonlar ile birlikte PFC'de kullanılabilmektedir. Bu iki programlama diline ek olarak PFC ile birlikte ön tanımlı olarak gelen "*fistpkgXX*" olarak adlandırılan paket kullanılarak ön tanımlı birçok deney hızlı bir şekilde uzun zaman alan kodlama işlemlerinin birçoğunun yapılmasına gerek kalmadan gerçekleştirilebilmektedir. Bu paket içerisinde model oluşturma, deneylerin yapılması, verilerin izlenmesi ve gerekli veri çıktılarının alınması gibi birçok özellik hazır olarak bulunmaktadır.

7.2. Ayırık Elemanlar Yöntemi (Distinct-Element Method)

PFC yazılımı taneciklerin iki ve üç boyutta hareketlerini ve birbirleri ile olan etkileşimlerini modelleyebilmek için ayırık elemanlar yöntemini (DEM) temel almaktadır. DEM ilk kez Cundall (1971) tarafından kaya mekaniği problemlerinin analizi için geliştirilmiş ve sonrasında da zemin malzemelerinde de kullanılmaya başlanmıştır (Cundall, 1979). Yöntem ile ilgili olarak araştırmacılara bir yol gösterici olması amacıyla Cundall (1988) ve Hart (1988) tarafından hazırlanan iki makalede detaylı bir rehber hazırlanmıştır. Araştırmacılar tarafından hazırlanan bu kaynaklar ise Itasca Consulting Group, Inc. tarafından geliştirilen bir UDEC (Universal Distinct Element Code) el kitabında da paylaşılmıştır (Itasca, 2011). PFC ile ilgili olarak Cundall (1992) tarafından yapılan değerlendirmede, PFC'nin DEM'in basitleştirilmiş bir modelini temel aldığı belirtilmiş ve oluşturulan modellerde taneciklerin yer değiştirmesine ve dönmesine izin verildiği, meydana gelen yeni koşullara bağlı olarak bağların tekrar oluşabileceği de belirtilmiştir. DEM dinamik bir süreç olarak tanımlanan tanecikler arası etkileşimin iç kuvvetlerin dengeye gelmesi durumunda eriştiği denge durumu olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde taneciklerden oluşan sentetik malzemede bulunan bağlardaki temas kuvvetleri ve yer değiştirmelerde her bir taneciğin hareketinin ayrı ayrı olarak takip edilmesi ile bulunabilir. Bu nedenle de çok sayıda tanecikten oluşan modeller üzerinde yapılan

çalışmalarda güçlü bir donanım altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Sentetik modeldeki hareketler, çatlaklar ve zayıflık düzlemlerinin oluşumu ise tanecik hareketlerinin model boyunca iletilmesi sonucunda meydana gelir. Söz konusu bu sistem iç kuvvetlerin dengeye gelmesine kadar devam eden dinamik ve sürekli bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu dinamik davranış ise hız ve ivmenin sabit olduğunun kabul edildiği ve her bir aşaması “*time-step*” olarak tanımlanan bir nümerik süreçtir. “*Time-step*” olarak tanımlanan her bir iterasyon aşamasında taneciklerde ve tanecikler arasında meydana gelen bağlarda oluşacak olan hareket ve yer değiştirme ise sadece bunlar ve bunların komşuları ile sınırlı kalmaktadır. DEM aracılığı ile yapılan tüm hesaplamalarda Newton’ın hareket kanunları dikkate alınmaktadır. Taneciklerde meydana gelen her türlü hareket, etki eden kuvvet ve yer değiştirmeye ilişkin olarak yapılan hesaplamalar bu kanuna uygun olarak gerçekleşmektedir. PFC yazılımında sadece yüklemenin sağlanabilmesi ve diğer amaçlarla kullanılan düzlemler (wall) bu kanuna tabi değildir. DEM dinamik ve sürekli bir süreç olarak tanımlandığı için taneciklerin enerji kaybına uğrayabilmesi için “*damping coefficient (azaltma katsayısı)*” adı verilen bir katsayıya sahip olması gerekmektedir. Aksi takdirde sonsuza kadar taneciklerin hareketi devam edecektir. Bu nedenle Eşitlik 7.1’de verildiği şekilde bir azaltma kuvvetinin uygulanması gerekmektedir.

$$F^d = -\alpha|F| \pm (V) \quad (7.1)$$

Burada;

- F^d : Azaltma kuvveti
- α : Damping coefficient (azaltma katsayısı)
- F : Dengelenmemiş kuvvetin büyüklüğü
- V : Tanecik hızı

Kaya malzemelerinde meydana gelen enerji azalımı yaygın olarak sismik kalite faktörü adı verilen bir parametre ile tanımlanmaktadır. Sismik kalite faktörü ise bir dalga boyunda depolanan enerjinin kaybedilen enerjiye oranının 2π katı olarak tanımlanmaktadır (Eşitlik 7.2).

$$Q = 2\pi\left(\frac{W}{\Delta W}\right) \quad (7.2)$$

Burada;

- Q : Sismik kalite faktörü
- W : Enerji

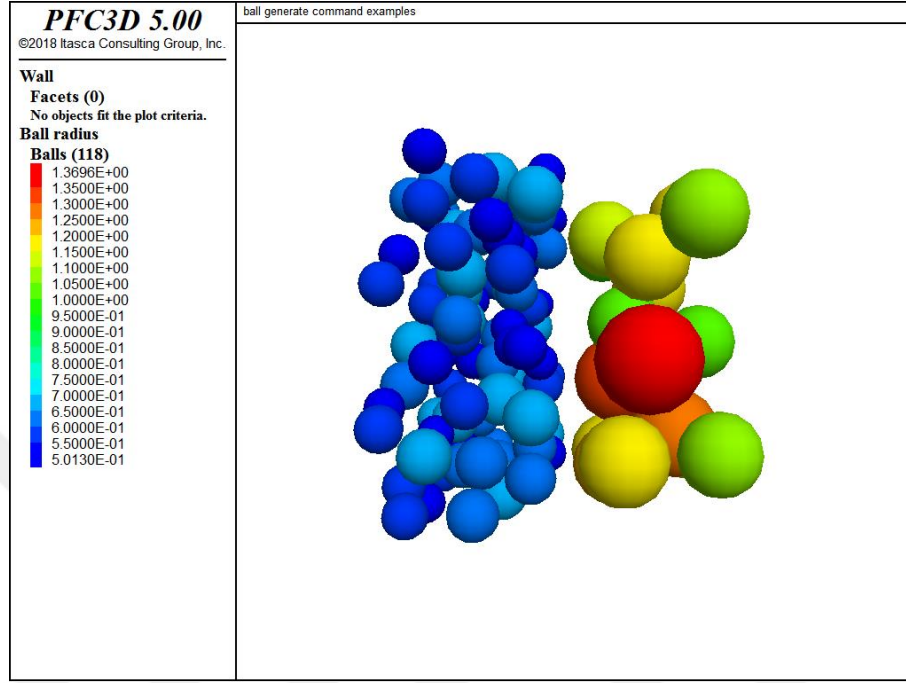
Sismik kalite faktörü kullanılarak elde edilen azaltma katsayısı gerçek koşullardaki sürtünme ve enerji kaybının nümerik değeri olarak düşünülebilir. Atanacak azaltma katsayısı değeri ile her bir iterasyon aşamasında tanecikler enerji kaybına uğrayacak ve sistemin dengeye gelmesi gerçekleşecektir. Azaltma katsayısı değerinin belirlenmesine ilişkin olarak birçok araştırmacının çalışmaları bulunmaktadır (Cundall, 1987; Feustel, 1995; Hazzard et.al, 2000a; Hazzard et.al, 2000b; ITASCA, 1999). Yapılan tüm bu çalışmalar dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda Potyondy ve Cundall (2004) tarafından PFC’de oluşturulacak olan modellerde bu değer 0.70 alınması önerilmiştir. Yapılan bu tez çalışması kapsamında hazırlanan tüm sentetik modellerde azaltma katsayısı değeri literatürde yer alan çalışmalarda uygun olacak şekilde 0.70 olarak alınmıştır.

7.3. PFC Yazılımının Temel Bileşenleri

PFC yazılımında çalışma alanı olarak belirlenen bir alan (domain), sentetik malzemeyi oluşturmak için tanecikler (balls), tanecikler arasında temas özellikleri tanımlamak için bağlar (contacts), deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi ve model oluşturma aşamasında sınırlayıcı olarak kullanılmak üzere düzlemler (wall) bulunmaktadır. PFC’de yapılan tüm işlemler bu temel bileşenler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. PFC yazılımında bu temel bileşenlerinin her birinin farklı koşulları temsil eden ayrı ayrı özellikleri bulunmaktadır. Bu özellikler yapılan projeye uygun olarak seçilebilmektedir. Bu tez çalışmasının amacına uygun olarak PFC ile ilgili olarak yapılan tanımlamalarda sadece ihtiyaç duyulan özelliklerinin detaylarına yer verilmiştir.

7.3.1. Tanecik (Ball)

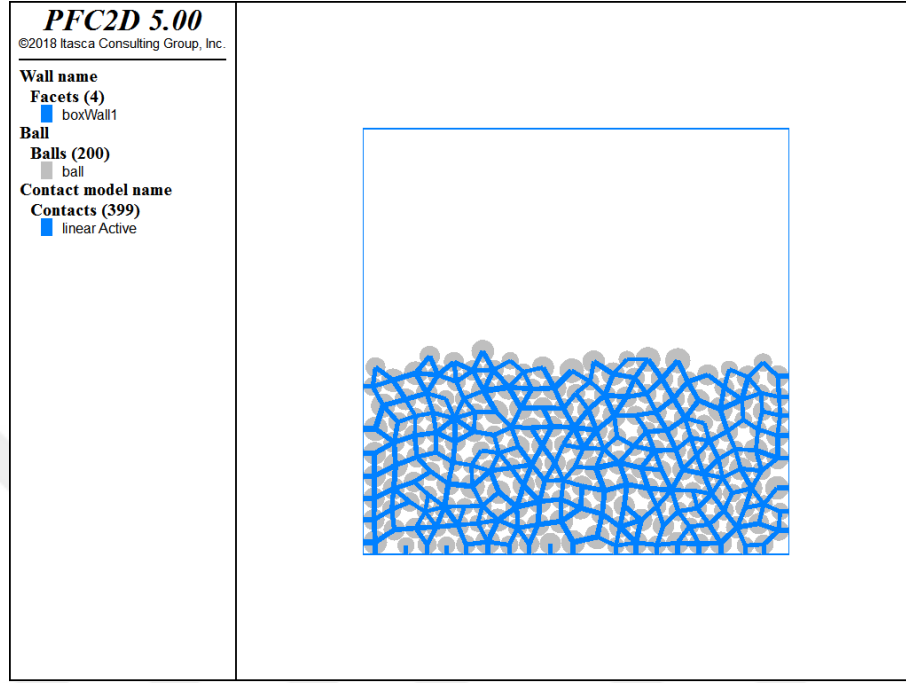
İki boyutta diskler, üç boyutta ise küreler ile temsil edilen tanecikler PFC yazılımında sentetik model oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 7.1). Modeli oluşturun tanecikler belirli bir porozite değerinde bir araya getirilerek kohezyonlu malzeme oluşturulabildiği gibi benzer şekilde granüler yapıdaki kohezyonsuz malzemelerin de oluşturulabilmesi mümkündür. Model içindeki taneciklerin çaplarının dağılımı ise kullanıcı tarafından belirlenebilmekte, laboratuvarında elde edilmiş bir tane boyu dağılım grafiği varsa bu kullanılarak gerçek dağılım da modelin oluşturulması sırasında kullanılabilir. Tanecikler dış etkenlerin etkisi ile yer değiştirebilir ve kendi çevrelerinde dönebilirler. Ancak herhangi bir şekilde sıkıştırılmaz, kırılmaz veya parçalanamazlar.



Şekil 7.1. PFC yazılımında farklı çaptaki tanecikler.

7.3.2. Bağ (Contact)

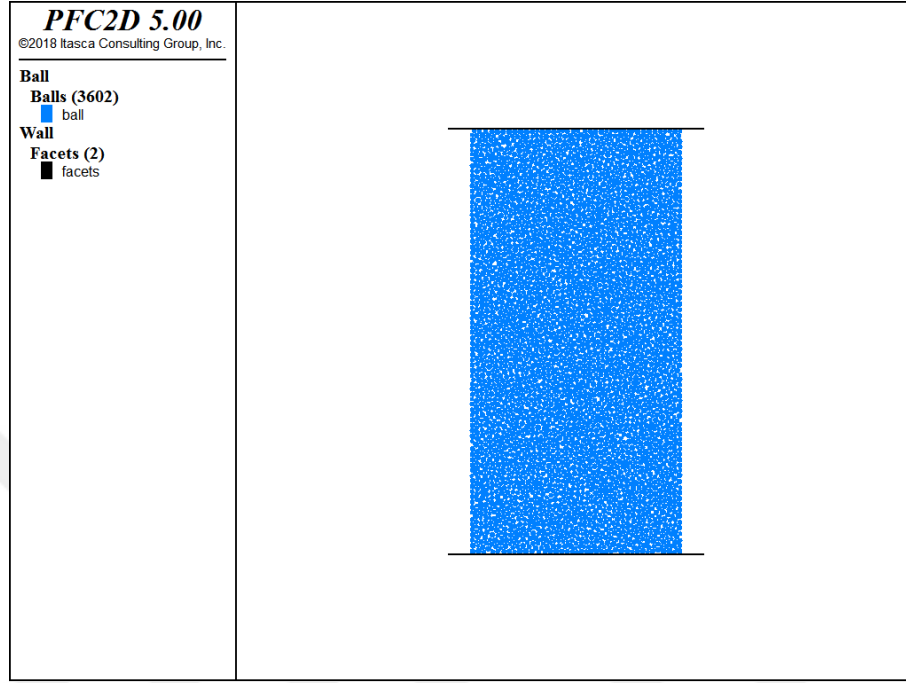
PFC yazılımında tanecikler arasında temasa bağlı olarak (kohezyonsuz malzeme) ya da sentetik malzemenin oluşturulması sırasında bağlar (kohezyonlu malzeme) oluşabilmektedir (Şekil 7.2). Tanecikler arasındaki temasa bağlı olarak oluşan ya da ön tanımlı olarak bulunan bağ türü ne olursa olsun mutlaka belirli parametrelere sahip olmalıdır. PFC içerisinde 9 farklı ön tanımlı bağ modeli bulunmaktadır. Ön tanımlı olarak bulunan bağ modellerine ek olarak kullanıcı tarafından da tamamen özgün olarak yeni bir bağ modeli de tanımlanabilmektedir. Ön tanımlı olarak bulunan bağ modelleri farklı amaçlara uygun olarak geliştirilmiştir. Kaya mekaniği ile ilgili olarak ise özellikle son dönemde yapılan çalışmalarda “*Flat Joint*” olarak tanımlanan ve kaya malzemeleri için uygun olduğu belirtilen model kullanılmaktadır (Potyondy, 2012a; Potyondy, 2012b; Potyondy, 2013). Tez çalışması kapsamında oluşturulan tüm modellerde de bu bağ modeli tercih edilmiştir. Yazılım içerisinde bulunan ve yeni oluşturulan tüm bağ modellerinin özelliklerinin bulunduğu ve tanımlandığı CMAT (Contact Model Assignment Table) yer almaktadır. CMAT içerisinde bağların özelliklerini temsil eden mikro-mekanik parametreler yer almaktadır. Söz konusu bu mikro-mekanik özelliklerinin değerleri ise kalibrasyon aşamasında belirlenir ve sonraki aşamada yapılan tüm çalışmalarda kullanılabilir.



Şekil 7.2. PFC yazılımında tanecikler arasında meydana gelen bağlar (mavi).

7.3.3. Düzlem (Wall)

Kaya mekaniği ile ilgili olarak gerçekleştirilen deneylerde yükleme işlemleri düzlemler aracılığı ile sağlanmaktadır (Şekil 7.3). Düzlemler Newton'ın hareket kanunlarından bağımsız olarak kullanıcı tarafından tanımlanan özelliklere göre iterasyon aşamalarında davranırlar. Düzlemlerin oluşan gerilmelere bağlı olarak parçalanması veya zarar görmesi mümkün değildir. Bununla birlikte taneciklerinde düzlemlerin içinden geçmesi veya düzlemlerin ilerleme hızlarını etkilemesi söz konusu değildir. Düzlemlere belirli bir ilerleme hızı tanımlanarak yükleme gerçekleştirilmektedir. Sadece doğrudan çekme deneylerin düzlemler yerine örneğin alt ve üst yüzeylerinde belirli bir kalınlık içerisinde kalan tanecikler çekme yüzeyleri olarak tanımlanmakta ve deney bu şekilde gerçekleştirilmektedir. Düzlemler kaya mekaniği ile ilgili olan deneylerin yanı sıra birçok farklı amaç içinde kullanılabilir. Düzlemler deney sistemlerinin tasarımı dışında kullanıcıya bağlı olarak farklı deney sistemlerinin tasarımında veya farklı disiplinler tarafından gerçekleştirilen çalışmalar içinde kullanılabilir.



Şekil 7.3. PFC yazılımında yüklemenin sağlanabilmesi amacıyla kullanılan düzlemler (siyah).

7.4. PFC Yazılımında Model Oluşturma Aşamaları

7.4.1. Bağlı parçacık modeli (Bonded particle model)

PFC, Potyondy ve Cundall (2004) tarafından geliştirilen bağlı parçacık modeli (bonded particle model) yaklaşımını esas alan bir yazılımdır. Bağlı parçacık modeli tane yoğunluğu, tane şekli, tane boyu dağılımı, tane sıklığı ve tane-hamur özelliklerini temsil eden mikro mekanik parametreleri içerir ve bu parametrelere atanan değerler ile kaya malzemesini temsil eden sentetik model oluşturulur. Sentetik modele atanan parametrelere karar verilirken kullanıcının tecrübesi ve laboratuvarından deneylerinden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi son derece önemlidir. Söz konusu her bir parametreye atanan değer sentetik malzemenin davranışı etkilemektedir. Mikro mekanik parametrelere değerlerin atanması ve atanan değerler ile oluşturulan sentetik model üzerinde deney yapılarak elde edilen sonuçların doğrudan yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile eşleştirilmesi aşaması kalibrasyon olarak adlandırılmaktadır (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. “Flat Joint” bağ modelinin kalibrasyon aşamaları.

Atanacak Parametre		Etkilediği / Dikkat Edilmesi Gereken Parametre
A	Sıklık oranını (1,5)	Poisson oranı
B	Sürtünme katsayısı (0,4-0,6)	Bağlar koptuktan sonra taneler arası sürtünme
1	Sürtünme açısının (0°) Çekme dayanımı ($1e^{20}$ Pa) Kohezyon ($1e^{20}$ Pa)	Kalibrasyon öncesi modelin basitleştirilmesi
2	Elastisite modülü	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinin yapılarak elastisite modülü değerinin kontrol edilmesi, yeni değer atanarak hedef değere ulaşılması
3	Çekme dayanımı ve kohezyon	Doğrudan çekme deneyinin yapılarak yenilmenin yükleme yönüne tamamen dik meydana geldiğinin kontrol edilmesi, yeni çekme dayanımı değerinin atanarak hedef değere ulaşılması
4	Kohezyon	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılması, yeni dayanım değerinin atanarak hedef değere ulaşılması
5a	Yanal Basınç	Farklı yanal basınç değerlerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılması, artan yanal basınçla örneğin daha az kırılğan davranış gösterip göstermediğinin kontrol edilmesi
5b	Sürtünme açısı	Yenilme zarfının oluşturulması, yeni sürtünme açısı değerinin atanarak içsel sürtünme açısı değerine ulaşılması

Ancak bu aşamadan önce oluşturulacak olan sentetik modelde bulunan taneciklerin tane çaplarına karar verilmesi gerekmektedir. Tane boyu dağılımı ile laboratuvar deneylerinden elde edilmiş bir veri varsa doğrudan bu veri kullanılabilir. Aksi takdirde en büyük (D_{max}) ve en küçük (D_{min}) tane çapı değerleri tanımlanarak yazılımın kendiliğinden model sınırları içerisinde belirli sayıda tanecik oluşturulması da sağlanabilir. En büyük ve en küçük tane çapı değerlerinin belirlenebilmesi için en temel yaklaşım hedef poroziteyi sağlayacak tane çapına inilmesidir. Bu durumda da porozite değeri düşük olan modellerde tanımlanması gereken tane çapı değeri azalmakta, bununla birlikte de oluşan tanecik sayısı artmaktadır. Tanecik sayısının artması iterasyon süresi arttırmakta ve gelişmiş donanım ihtiyacının ortaya çıkmasına da neden olmaktadır. Tane çapının belirlenmesi ile ilgili bu kısıtlamaların aşılabilmesi amacıyla Potyondy ve Cundall (2004) tarafından yapılan çalışmalar en büyük ve en küçük tane çapının birbirine oranının 1,5, sayısal değerlerinin ise yapılan deney sonucunda modelden elde edilen sonuçların farklılık göstermediği en düşük değerler olması gerektiği belirtilmiştir. Bu noktada literatür açısından kabul gören yaklaşım ise modelin iki veya üç boyutlu olmasına X, Y ve Z eksenli boyunca en az 10 taneciğin bulunmasıdır. PFC ile oluşturulan model izotropik, lineer ve elastik yapıdadır. Bu tür sentetik malzemede meydana gelen deformasyon sıklık (stiffness) olarak tanımlanan ve mikro-mekanik parametreler iki ayrı parametre tarafından temsil edilmektedir. Bu iki parametrenin ise doğrudan tanımlanması mümkün değildir.

Bunun yerine tane ve hamur elastisite modülü değerleri aracılığı ile bu parametreler PFC içinde kontrol edilir.

7.4.2. Sentetik modelin oluşturulması

Model için gerekli olan mikro mekanik parametreler tanımlandıktan sonra sentetik malzemenin oluşturulması aşamasına geçilir. PFC’de sentetik modelin oluşturulması genel olarak 5 aşamada gerçekleştirilir; Tanecik topluluğunun oluşturulması, izotropik gerilmenin yüklenmesi, serbest taneciklerin ortadan kaldırılması, bağ özelliklerinin tanımlanması, geometrik sınırların kaldırılması.

Tanecik topluluğunun (Compact initial assembly) oluşturulması

PFC’de oluşturulacak sentetik modelin şekline göre düzlemler aracılığı ile örnek boyutlarını temsil eden geometrik sınırlar düzlemler aracılığı ile oluşturulur (kare, dikdörtgen, silindir, kübik, vb.). Bu geometrik sınırlar içerisinde tanecikler tanımlanan tane boyu değerlerine uygun olacak şekilde en büyük ve en küçük tane çapı değerleri kullanılarak oluşturulur. Bu noktada istenilen porozite değerine sahip olan ve iyi tutturulmuş bir tanecik topluluğun oluşturulması için tane boyu değerlerinin birkaç kez değiştirilerek ortaya çıkan modelin kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

İzotropik gerilmenin (Isotropic stress) yüklenmesi

Örnek üzerinde üç yönde (σ_x , σ_y , σ_z) etki eden gerilmelerin ortalaması olarak tanımlanan izotropik gerilme PFC’de kohezyonlu malzemelerin oluşturulması sırasında tanecikler arasında bağların oluşturulabilmesi amacıyla deney öncesi uygulanmaktadır. Sentetik modele uygulanması gereken izotropik gerilme miktarının örnek üzerinde laboratuvar koşullarında doğrudan yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen gerilme değerinin %1’i kadar olması yeterlidir (Potyondy ve Cundall, 2004). Sentetik modelde tanımlanan izotropik gerilme değerlerine ulaşıncaya kadar tanecikler arasında seçilen bağ modeline göre birçok sayıda bağ oluşur ve kaya malzemesi temsil edilmiş olur.

Serbest taneciklerin (Floating particles) kaldırılması

Sıkı ve yoğun bir sentetik model elde etmek için her bir taneciğin en az 3 adet bağa sahip olması önerilmektedir. Bu nedenle de model oluşturma aşamasında 3’den az bağa sahip olan taneciklerin silinmesi, gerekiyorsa farklı tane çapında yeni bir modelin oluşturulması gerekmektedir. Tane çapına bağlı olarak sentetik bir modelde %15’e kadar 3’ten az bağa sahip olan tanecik olabilir.

PFC’de sentetik modelin oluşturulması için “*fistpkgXX*” olarak tanımlanan hazır paket kullanılıyorsa bu adımı PFC kendiliğinden gerçekleştirmektedir.

Bağ özelliklerinin tanımlanması

Serbest taneciklerin silinmesinin ardından tanecikler arasındaki bağlara mikro-mekanik parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bağların kopması ile sentetik malzemede yenilmenin meydana gelmesi nedeniyle bağ özelliklerinin tanımlanması son derece önemlidir. Sentetik malzemede meydana gelen deformasyon miktarı da doğrudan bu özellikler ile ilgilidir. Bu nedenle kalibrasyon aşamasında bağ özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için bu aşamanın birkaç defa tekrar edilmesi gerekebilir.

Geometrik sınırların kaldırılması

Tüm bu aşamaların ardından birbirleri ile bağlarla tutturulmuş olan tanecikleri çevreleyen ve düzlemler kullanılarak oluşturulmuş olan geometrik sınırların ortadan kaldırılması gerekmektedir. Düzlemlerin ortadan kaldırılması sonucunda sentetik modelde çok az bir miktarda rahatlama meydana gelebilir. Söz konusu bu rahatlama statik denge koşuluna gelmesi ile sonlanır. Meydana gelen bu rahatlama bir kaya bloğunun içinden karotun çıkarılmasına benzetilebilir. Belirli gerilme koşulu altında bulunan karot bloktan çıkarıldığında farklı gerilme koşullarına tabi olmasına rağmen herhangi bir deformasyon meydana gelmez ya da meydana gelen deformasyon ihmal edilebilecek kadar düşüktür.

7.4.3. PFC yazılımında modelin kalibre edilmesi

PFC’de yapılması planlanan çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için kalibre edilmiş bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bir modelin kalibre edilmesi ise örnekler üzerinde laboratuvar koşullarında doğrudan yapılan deneylerden elde edilen verilere ulaşılması için taneciklerin ve CMAT içerisinde yer alan ve bağların özelliklerini temsil eden mikro-mekanik parametrelerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Kaya mekaniği ile ilgili olan çalışmalarda yaygın olarak “*Flat Joint*” bağ modelinin kullanılması nedeniyle bu tez çalışması kapsamında hazırlanan tüm modellerde de aynı bağ modeli kullanılmıştır. PFC’de model oluşturulma aşamasında ilk olarak model boyutları ve taneciklerin tane boyu dağılımlarına karar verilmesi gerekmektedir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta belirlenen boyutlara göre modelin temsil edici bir davranış sergileyebilmesi ve optimum iterasyon süresinin sağlanabilmesi için hem yatay hem de düşey yönde en az 10 adet taneciğinin bulunmasıdır (Potyondy ve Cundall, 2004). Bununla birlikte istenilen gözeneklilik

değerine ulaşılabilmesi için tane çapının düşürülmesi gerektiğinden bu koşul rahatlıkla sağlanabilmektedir. Üç boyutlu model üzerinde çalışılması gerektiği durumda özellikle %15 ve altında gözeneklilik değerine sahip modellerin oluşturulması istenildiğinde tanecik sayısı çok yüksek değerlere (>100000 tanecik) ulaşmaktadır. Bu durum, her taneciğin en az 3 bağ noktası olması gerekliliği de göz önüne alındığında meydana gelen bağ sayısının ve iterasyon sayısının artmasına ve nümerik model üzerinde gerçekleştirilen deneylerin tamamlanma süresinin de artmasına neden olmaktadır. Özellikle üç boyutlu modellerde düşük gözenekliliğe sahip olan modellerin oluşturulması için yüzbinlerce taneciğe ihtiyaç duyulmakta ve deney süreleri de haftaları varan süreler alabilmektedir. Söz konusu bu şartlar nedeniyle çok yüksek seviyede donanım altyapısının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Tüm bu kısıtlamalar göz önüne alınarak PFC’de oluşturulan nümerik modellerin basitleştirilmiş olması ve karmaşık sorunlar yerine temel problemlerin değerlendirilmesine yönelik olarak oluşturulması gerekmektedir.

Potyondy (2017) tarafından PFC’de “*Flat Joint*” bağ modelinin kalibrasyon aşamasında ilk aşamada sıklık oranı değerinin 1,5 olarak atanması önerilmiştir. Sıklık oranı değeri modelin Poisson oranı üzerinde etkili olmakta ve bu değerin arttırılması ile Poisson oranı da artmaktadır. Ancak araştırmacı tarafından bu değere 4’ün üzerinde bir değer atanması önerilmemiştir. PFC’de modeli oluşturan taneciklerin hepsi izotrop olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle PFC ile oluşturulan ve kumtaşı gibi benzer özellikli tanelerden meydana gelen örneklerin modelleri için Poisson oranı temsil edici bir şekilde tanımlanabilirken izotrop özellik göstermeyen ve farklı minerallerden oluşan kayaç grupları için Poisson değerlerinin temsil edici olarak PFC’de belirlenmesinde problem yaşanmaktadır. Bununla birlikte Poisson değerinin belirlenebilmesi için atanan sıklık oranı değerinin 1,5 ile 4 aralığında kalması durumunda sadece Poisson değerinde değişiklik meydana gelmesi, Poisson oranının kaya malzemeleri için çok küçük bir aralıkta değişim göstermesi nedeniyle kalibrasyon aşamasında Poisson oranının birebir yakalanması zorunluluğu da bulunmamaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan örneklerin boşluklu yapıda olması nedeniyle yenilme herhangi bir düzlem üzerinde meydana gelebilmektedir. Bu durumda yatay deformasyonun ölçülmesi için kullanılan deformasyon ölçerlerin iğne tipi olması ve tek bir noktadan veri alabilmesi ölçümlerin yapılamamasına veya alınan verilerin temsil edici olmamasına neden olmuştur. Bu nedenle tez çalışması kapsamında kullanılan örneklerin Poisson oranlarının PFC’de yaklaşık değerlerde kalibrasyonu için Gerçek (2007)’de yer alan değerler temel alınmıştır. Alınan bu temel değerlere ulaşabilmek için kalibrasyon aşamasında farklı sıklık oranı değerlerinde deneyler yapılmış, elde

edilen sonuçlara göre ise bu değerin 1,5 olmasına karar verilmiştir. Sıkılık oranı ile başlangıç aşaması öncesinde atanması gereken bir diğer parametre olan sürtünme katsayısı da 0,4 olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değeri taneler arası bağların gerilmeye bağlı olarak kopmasından sonra taneler arasındaki sürtünmenin karakterize edilmesi için kullanılmaktadır. Potyondy (2017) tarafından sürtünme katsayısı değerinin 0,4 ile 0,6 arasında atanması önerilmiştir. Sıkılık oranı ve sürtünme katsayısı parametreleri nümerik modelleri basit ve sağlıklı bir temele oturtabilmek için genellikle küçük bir aralıkta değişen değerler olarak alınırlar. Bununla birlikte bu değerler üzerinde yapılan değişiklikler modellerin dayanım ve deformasyon özelliklerinin kalibre edilmesinden ziyade nümerik modelin sağlıklı bir şekilde çalışması üzerinde daha etkilidir.

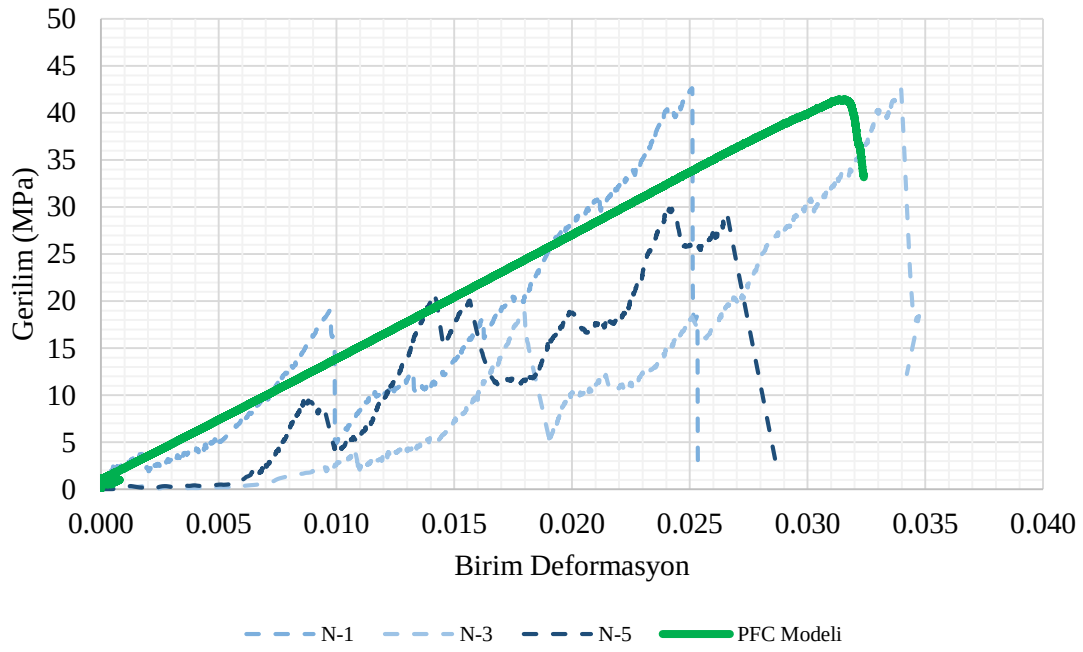
Çizelge 7.1’de “A” ve “B” olarak belirtilen ve kalibrasyon aşaması öncesi ilgili parametrelerin atanmasının ardından kalibrasyon işlemlerinin 1. adımında tanelerin sürtünme açısı, çekme dayanımı ve kohezyon değerlerin atanır. Burada amaç deney öncesi temel parametrelerin belirlenmesi ve deney sonrası sonuçlara göre bu parametreler üzerinde ilgili değişikliklerin yapılarak laboratuvarda doğrudan yapılan deney sonuçlarının yakalanabilmesidir. Bu parametreler atandıktan sonra model üzerinde kalibrasyonun 2. adımı olarak elastisite modülü değeri atanır ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılır. Deney sonucunda elde edilen elastisite modülü değeri ile laboratuvar koşullarında yapılan deneylerden elde edilen elastisite modülü değeri karşılaştırılır. Bu aşama hedef elastisite modülüne ulaşılan kadar modeldeki elastisite modülünün değiştirilmesi ile devam eder. Hedef elastisite modülüne ulaşılması halinde ise kalibrasyon 3. aşamasına geçilebilir. 3. aşamada laboratuvar koşullarında çekme dayanımı deneyi yapılmış ise bu değer eşleştirilebilmesi için tanelerin çekme dayanımı ve kohezyon değeri değiştirilir. Eğer laboratuvar koşullarında çekme dayanımı deneyi yapılmamışsa kalibrasyonun bu aşamasında herhangi işlem yapılmasına gerek yoktur. Çünkü tanelerin çekme dayanımı değerinin değiştirilmesi diğer dayanım ve deformasyon parametreleri üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir etki oluşturmaktadır. Kalibrasyonun 4. aşamasında ise oluşturulan modelin sıkışma dayanımı değerinin laboratuvar koşullarında elde edilen değer ile eşleştirilmesi sağlanır. Bunun için tanelerin kohezyon değeri üzerinde değişiklik yapılarak hedef tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri yakalanmaya çalışılır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta ise modelde meydana gelen birincil çekme çatlaklarının yükleme yönüne paralel bir şekilde meydana gelmesidir. Bu duruma ek olarak yenilmenin meydana gelmesinden hemen önce de az sayıda makaslama çatlağının da gözlenmesi gerekmektedir. Söz

konusu bu iki davranışın gerçekleşmesi modelin yüklemeye olması gerektiği gibi tepki verdiğinin bir göstergesidir.

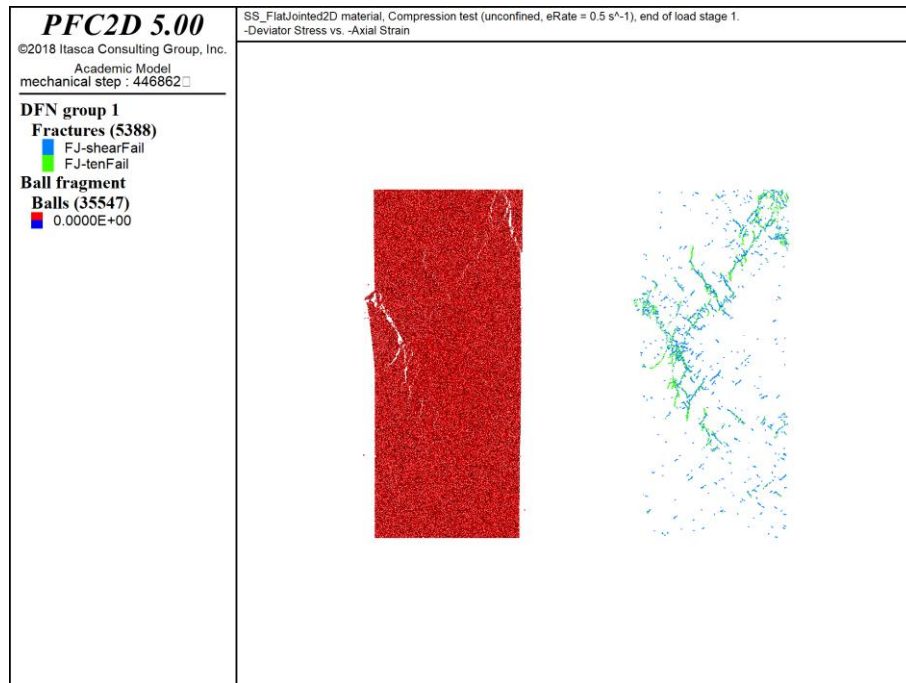
Kaya mekaniği ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda farklı yanal basınç değerleri altında üç eksenli sıkışma dayanımı da gerçekleştirilmektedir. PFC’de oluşturulan modeller üzerinde farklı yanal basınç değerlerinde çalışmalar yapılması da mümkündür. Kalibrasyon aşamasında farklı yanal basınç değerlerinde modelin artan yanal basınçla daha az kırılğan bir davranış göstermesi, oluşturulan yenilme zarfının açısının da tanelerin içsel sürtünme açılarının değiştirilerek yakalanması gerekmektedir. PFC ile oluşturan bir modelin kalibrasyonunda genellikle kumtaşı ve benzeri hemen hemen izotropik yapı gösteren jeolojik malzemeler tercih edildiği için yapısal zayıflıkları bulunan, boşluklu yapıdaki kaya malzemelerinde farklı yanal basınç değerlerinde tek eksenli sıkışma koşullarına göre çok farklı dayanım ve deformasyon değerleri elde edilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında farklı yanal basınç değerlerinde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen dayanım ve deformasyon verileri çok geniş bir aralıkta değişim göstermekte, oluşturulan modellerin nümerik yaklaşımların doğası gereği örneklerin bire bir yansıtmaması nedeniyle üç eksenli yükleme koşulları için modellerin kalibre edilebilmesi mümkün olmamıştır. Buna rağmen tek eksenli yükleme koşulları için model başarıyla kalibre edilmiş ve tek eksenli yükleme koşullarında boşluk özelliklerinin etkisi ile ilgili modeller oluşturulmuştur. PFC’de “*Flat Joint*” bağ modelinin Potyondoy (2017) tarafından önerilen kalibrasyon aşamaları sadeleştirilmiş olarak Çizelge 7.1’de verilmiştir. PFC’de kalibre edilmiş bir model kullanılarak her türlü koşul ve durum için deneyler gerçekleştirilerek kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri araştırılabilmektedir.

Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan örneklerin birçoğunda küçük çapta boşluklar bulunmaktadır. Bazı örneklerin gerçek porozite değeri %5’in altında olmasına rağmen küçük çaptaki boşlukların yüklemeye bağlı olarak örnekte meydana gelen birim deformasyon üzerinde etkisi olabilmektedir. Şekil 7.4’te de görüldüğü üzere L-4’den alınan ve gerçek porozite değeri %3 olan örneklerde yüklemeye bağlı olarak basamaklı olarak tanımlanabilecek şekilde bir gerilim-birim deformasyon grafiği elde edilmiştir. Bu şekilde bir grafik elde edilmesinin en önemli nedeni yüklemeye bağlı olarak küçük boşlukların kapanması, belirli bir aşamadan sonra ise yüklemeye karşı direnç göstermesidir. Bu döngü kaya malzemesi için yenilmeye kadar birkaç defa meydana gelmektedir. Aslında kaya malzemesi kendi içinde yenilme noktasına ulaşana kadar birkaç defa küçük yenilmeler yaşamakta ve yüklemeye karşı direnmeye devam etmektedir. Kaya malzemeleri temel alınarak oluşturulan nümerik modellerin kaya malzemeleri kadar detaylı olması mümkün değildir.

%3 oranında gerçek porozite değerine sahip olan kaya malzemeleri sağlam kaya malzemesi olarak tanımlanabilir olsa dahi içlerinde binlerce küçük boşluk barındırmaktadır. Nümerik modeller oluşturulurken boşlukların tek tek tanımlanması gerekmektedir. Ancak bu yöntemin uygulanması mümkün olmadığı için en düşük gerçek porozite değerine sahip olan kaya malzemesinin gerçek porozite değerinin modelin porozite değeri olmasına karar verilmiştir. Bu nedenle L-4'ten alınan örneklerin gerçek porozite değeri %3 civarında olanları boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması temel model olarak kullanılmasına karar verilmiştir. %3 gerçek porozite değerine sahip olan nümerik model oluşturulmuş ve Çizelge 7.1'de verilen adımlar takip edilerek Şekil 7.4'te yer alan ve gerilim-birim deformasyon grafiği yeşil doğru ile temsil edilen model elde edilmiştir. Laboratuvar koşullarında yapılan deneylerden elde verilere göre N-1, N-3 ve N-5 örneklerinin ortalama elastisite modülü değerlerinin ortalaması 1,32 GPa olarak bulunmuş ve PFC'de oluşturulan nümerik modelin de elastisite modeli değeri 1,32 GPa olarak kalibre edilmiştir. Yine bu örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin ortalaması 39 MPa iken, PFC'de oluşturulan nümerik modelin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri de 41,50 MPa olarak kalibre edilmiştir. Kalibre edilen modelin tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrasındaki görüntüsü ise Şekil 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.5'te yenilmeye neden olan çatlakların daha rahat gözlenebilmesi için modeli oluşturan taneler ile ayrıştırılmıştır. Şekil 7.5'te yer alan model kullanılarak farklı boşluk özelliklerini içeren yeni modeller hazırlanmış ve nümerik deneyler gerçekleştirilmiştir. Kalibre edilen modelde 35547 adet tanecik bulunmaktadır. Daha düşük tanecik sayısı ile de %3 porozite koşulu sağlanabilmesine rağmen tanecik sayısı özellikle yüksek değerlerde tutularak modelin çok küçük oranda da olsa yüklemeye karşı daha iyi bir davranış sergilemesine çalışılmıştır.



Şekil 7.4. N-1, N-3, N-5 ve PFC modelinin gerilim-birim deformasyon grafikleri.



Şekil 7.5. PFC’de kalibre edilen modelin (n: %3) yenilme sonrası görünümü (mavi: makaslama çatlakları, yeşil: çekme çatlakları).

7.5. PFC’de Oluşturulan Boşlukların Seçimi ve Yenilme Davranışı Üzerindeki Etkisi

Kalibre edilmiş olan model üzerinde boşluk özelliklerinin etkisinin araştırılabilmesi amacıyla dairesel, elipsoit, dikdörtgen ve kare şekilli boşlukların oluşturulmasına karar verilmiştir. Oluşturulan boşlukların çapları ve geometrik boyutlarının ise model boyutları ile orantılı ve arazi koşullarında da gözlenebilir olması gerektiği de göz önüne alınarak Çizelge 7.2’de verildiği şekilde modeller oluşturulmuştur. Arazi koşulları ve kaya malzemelerinde yer alan boşlukların geometrik yapıları da göz önüne alınarak PFC’de oluşturulan modellerin büyük bölümünde dairesel ve elipsoit şekilli olanlara odaklanılmıştır. Modeller içinde oluşturulan boşlukların geometrik boyutlarına karar verilmesi sırasında ise ilk aşamada karot çapının %5 ile 50 arasında değişen çapta/genişlikte boşluklar oluşturulmuş ve yenilme davranışında artık bir farklılığın gözlenmediği çap/genişlik sınır kabul edilmiştir. Bununla birlikte bir sonraki bölümde detayı verilen boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisi de göz önüne alınarak boşluk çapının/genişliğinin karot çapının %5’i ve %10’u olan değerler kritik sınırlar olarak belirlendiği için detay modellerde bu aralıklarda oluşturulmuştur.

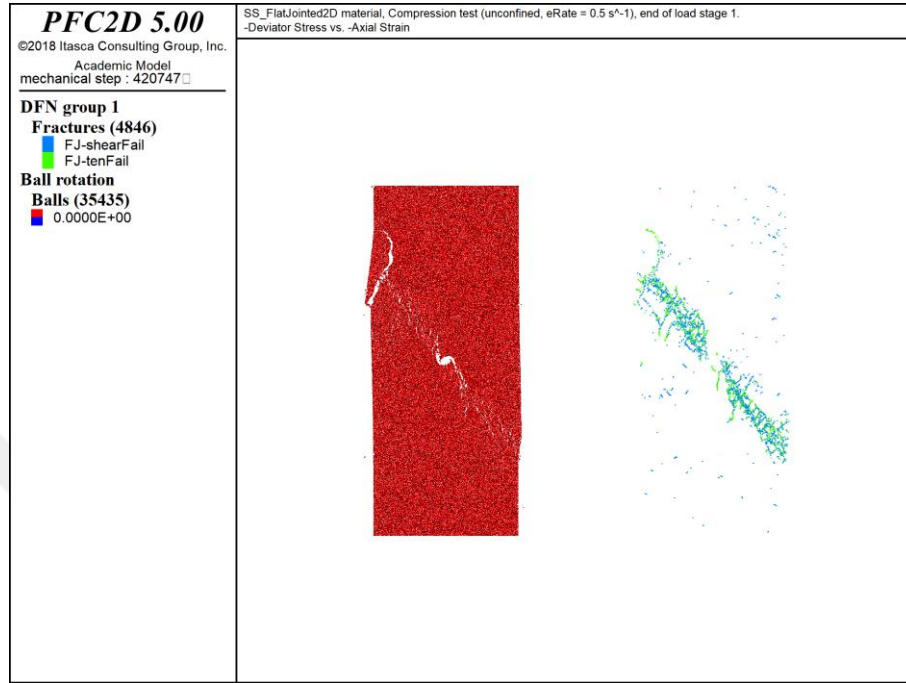
Çizelge 7.2. PFC’de oluşturulan modeller ve boşluk özellikleri.

Tipi	Geometrik Boyutları	Boşluk Sayısı ve Özelliği
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40, 10,80, 16,20, 21,60, 27,00	1
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	3 (Dizilim açısı 0°, Uzaklık: 2r)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	3 (Dizilim açısı 90°, Uzaklık: 2r)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	3 (Dizilim açısı 45°, Uzaklık: 2r)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	9 (Grid şeklinde)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	15 (Grid şeklinde)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	27 (Grid şeklinde)
Dairesel	Çap (mm): 2,70, 5,40	4 (Rasgele)
Elipsoit	Genişlik (mm) : 2,70, 5,40, 10,80, 16,20, 21,60, 27,00	1
Kare	Genişlik (mm) : 2,70, 5,40, 10,80, 16,20, 21,60, 27,00	1
Dikdörtgen	Genişlik (mm) : 2,70, 5,40, 10,80, 16,20, 21,60, 27,00	1

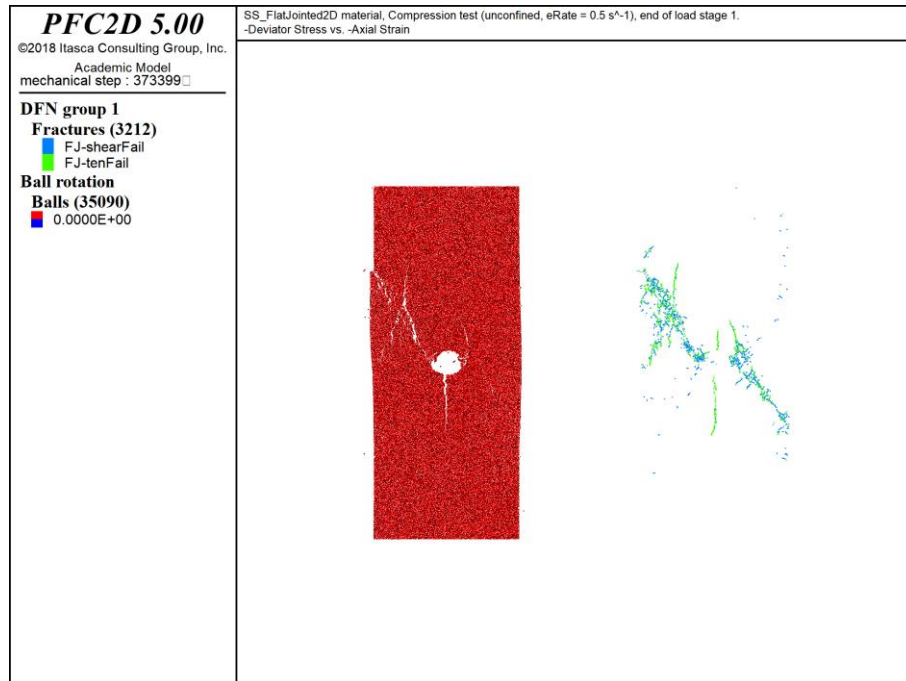
7.5.1. Dairesel şekilli boşlukların etkisi

Kaya malzemelerinin birçoğunda erime, gaz veya çok düşük dayanıma sahip dolgu malzemeleri tarafından doldurulmuş olan boşluklar gibi yapısal unsurlar bulunmaktadır. Bu boşlukların büyük bir bölümü iki boyutta dairesel veya dairesele yakın, üç boyutta ise küresel veya küresele yakın şekilli olmaktadır. Doğal koşullarda gözlenen bu davranış nedeniyle PFC kullanılarak oluşturulan modellerde de ağırlık olarak dairesel ve dairesele yakın şekilli olarak elipsoit şekilli boşlukların yenilme davranışı üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Dairesel şekilli boşluklar

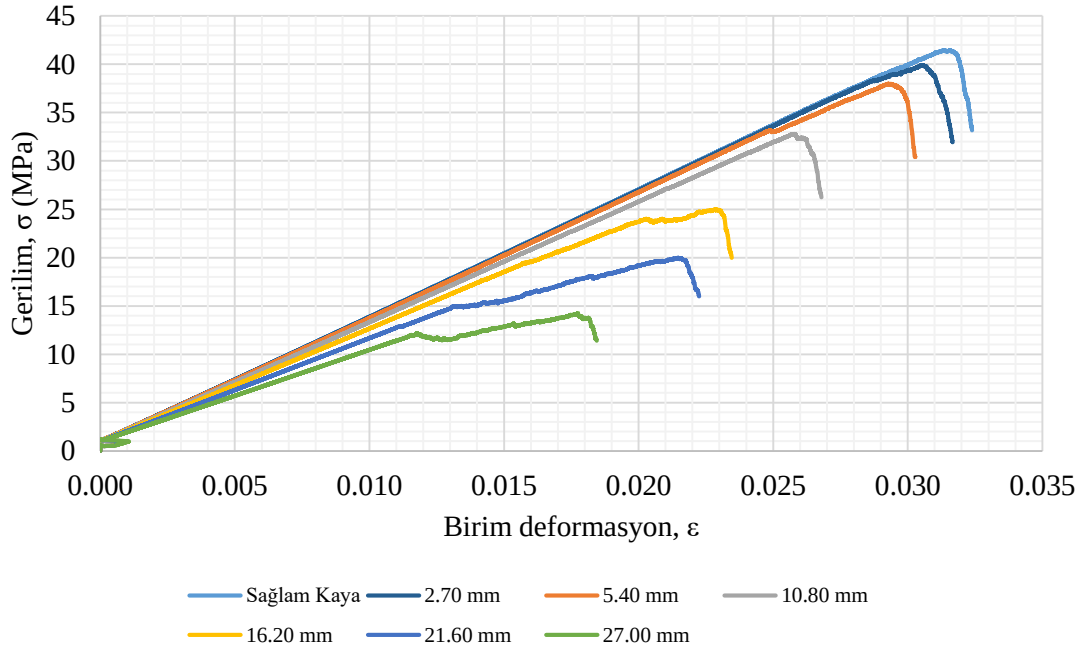
oluşturulurken modelin oluşturulma aşamasında seçilen ve optimum iterasyon süresine imkan veren en düşük tane çapı da dikkate alınarak en düşük dairesel şekilli boşluğun çapının 2,70 mm (karot çapının %5'i) olmasına karar verilmiştir. Daha küçük çaptaki boşlukların oluşturulabilmesi ve bunların yenilme davranışı üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi için tane çapının düşürülmesi gerekmektedir. Bu durumda da PFC'de oluşturulan modelin içerdiği tanecik sayısı çok fazla artmakta, iterasyon süresi uzamaktadır. Bu durumun nümerik çalışmaların doğasına ve kullanılma amacına ters olması nedeniyle boşluk çapında alt sınır olarak karot çapının %5'i olan 2,70 mm değeri belirlenmiştir. Dairesel boşluk içeren modellerde yenilme davranışı karot çapının %20'sine denk gelen 10,80 mm çaptaki boşluğa kadar makaslama çatlaklarının kontrolünde iken bu değerden itibaren çekme çatlaklarının etkisi altında meydana gelmektedir (Şekil 7.6-7.7). Bu sonuçlar göz önüne alındığında dairesel şekilli boşluklar için yenilme davranışı boşluk çapının karot çapının %20'sine ulaştığı nokta olarak söylenebilir. Dairesel şekilli boşlukların çaplarındaki artışa bağlı olarak modellerden elde edilen gerilim-birim deformasyon eğrilerinde karot çapının %20'sine denk gelen boşluk çapına kadar orantılı bir azalma mevcuttur. Bu kritik değerden sonraki değerlerde ise gerilim-birim deformasyon eğrilerinde meydana azalma oransal olarak daha fazladır. Şekil 7.8'de de görüldüğü üzere boşluk çapındaki artışa bağlı olarak modellerin elastisite modülü değerleri boşluksuz modelden başlamak üzere 1,32 GPa, 1,31 GPa, 1,27 GPa, 1,26 GPa, 1,08 GPa, 0,93 GPa ve 0,77 GPa olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü değerlerinde sınır koşul olarak kabul edilen ve karot çapının %20'si (10.80 mm) olan boşluk çapından sonraki değerlerde %19'a varan azalma meydana gelmektedir.



Şekil 7.6. Dairesel şekilli (R: 5,4 mm) tek bir boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



Şekil 7.7. Dairesel şekilli (R: 10,8 mm) tek bir boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.

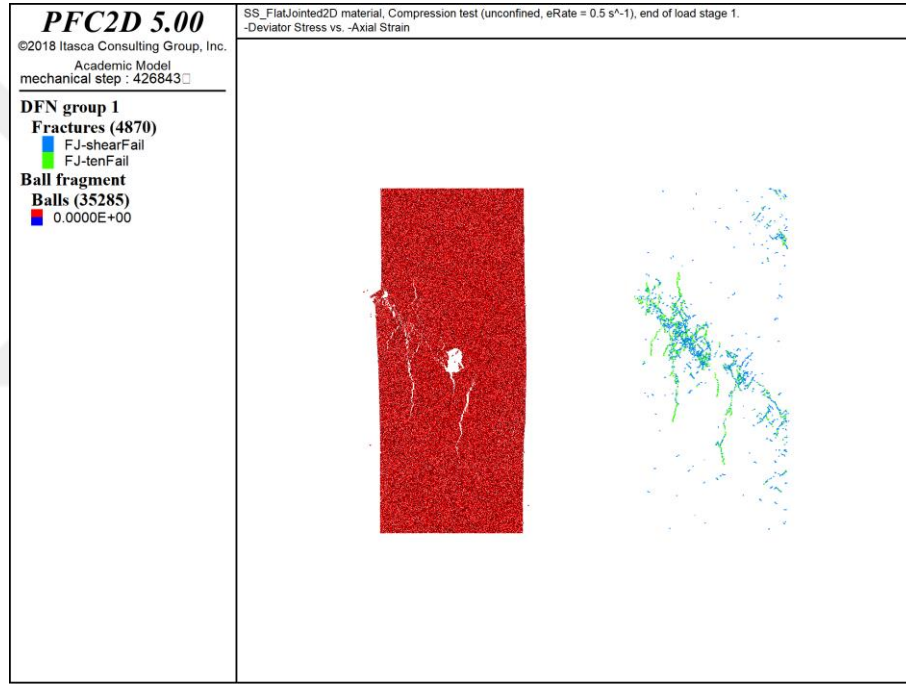


Şekil 7.8. Dairesel şekilli boşluğunun çapında meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.

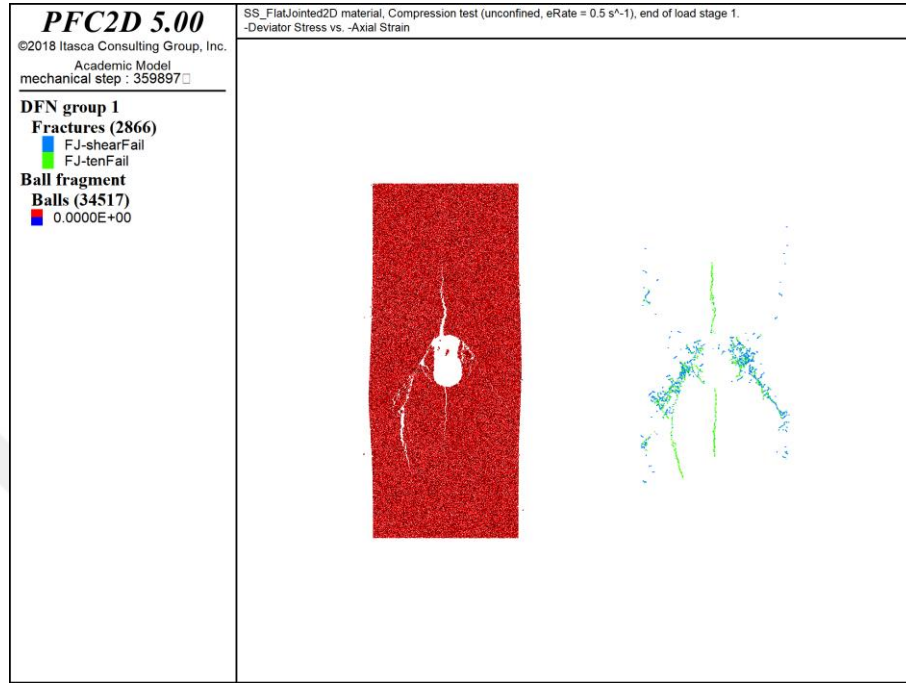
7.5.2. Elipsoit şekilli boşlukların etkisi

Kaya malzemelerinde dairesele en yakın olarak elipsoit şekilli boşluklar da görülmektedir. Bu nedenle dairesel şekilli boşluklara ek olarak elipsoit şekilli boşluklar içeren modeller de oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller dairesel şekilli boşluklar ile benzer şekilde boşluk geometrisine sahiptir. Elipsoit şekilli boşluklarda yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlaklarda boşluk geometrisinin de etkisi görülmektedir. Dairesel şekilli boşluklarda karot çapının %5'i (2,7 mm) ve %10'u (5,4 mm) kadar olan boşluklarda yenilme makaslama çatlaklarının kontrolünde gerçekleşirken bu durum elipsoit şekilli boşluklarda boşluk çapından bağımsız olarak her aşamada çekme çatlaklarının etkisi de görülmektedir (Şekil 7.9 - 7.10). Boşluk şeklinin elipsoite yakın olması durumunda boşluğun çevresinde meydana gelen gerilme koşullarının dairesel olan boşluğa göre farklılık göstermesi bu durumun en önemli nedenidir. Elipsoit şekilli boşluk içeren modellerden elde gerilim-birim deformasyon grafikleri incelendiğinde yenilme davranışının model içinde bulunan boşluğun genişliğinin karot çapının %20'sine denk geldiği boşluk türünden itibaren farklılık gösterdiği söylenebilir (Şekil 7.11). Elipsoit şekilli boşluk içeren modellerde karot çapının %5'i (2,7 mm) ve %10'u (5,4 mm) çapa sahip boşluklarda elastisite modülü değerleri boşluksuz modelin

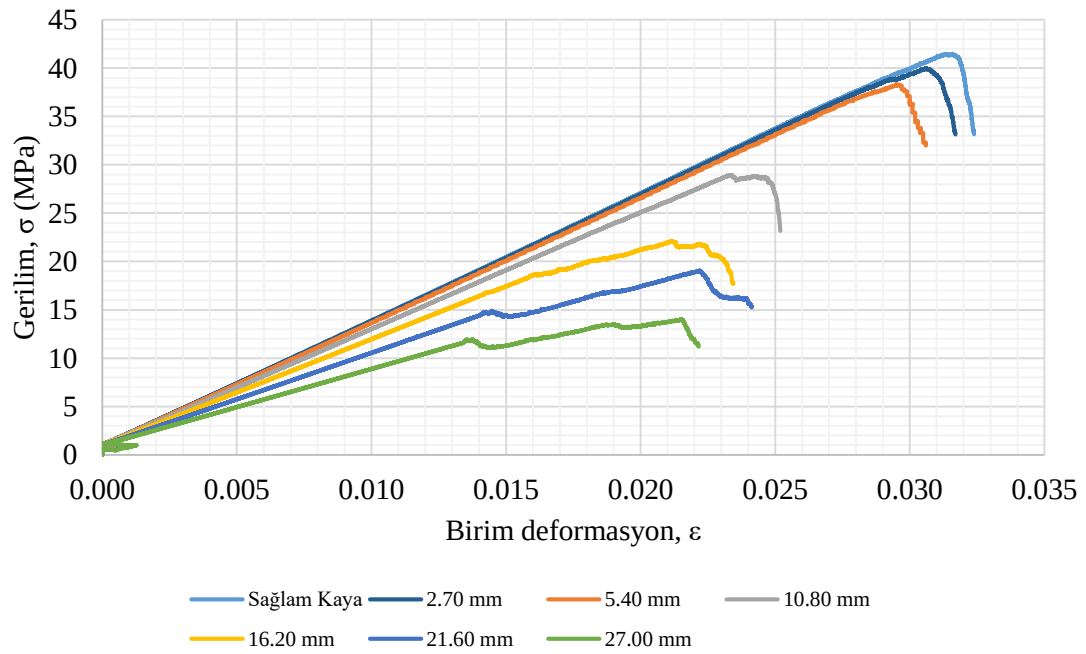
elastisite modülü değeri olan 1,32 GPa değerine yakındır. Ancak boşluk çapının karot çapının %20'sine (10,8 mm) ulaştığı andan itibaren elastisite modülü değeri 1,18 GPa'a düşmektedir. Elipsoit şekilli boşluğun genişliğinin sırasıyla karot çapının %30'u (16,2 mm), %40'ı (21,6 mm) ve %50'si (27 mm) olduğu koşullarda ise elastisite modülü değerleri 1,04 GPa, 0,86 GPa ve 0,65 GPa olarak hesaplanmıştır. Elipsoit şekilli boşluklar için sınır koşulun sağlandığı durumdan itibaren elastisite modülü değerinde %21'e varan azalma meydana gelmektedir.



Şekil 7.9. Elipsoit şekilli (R: 5,4 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



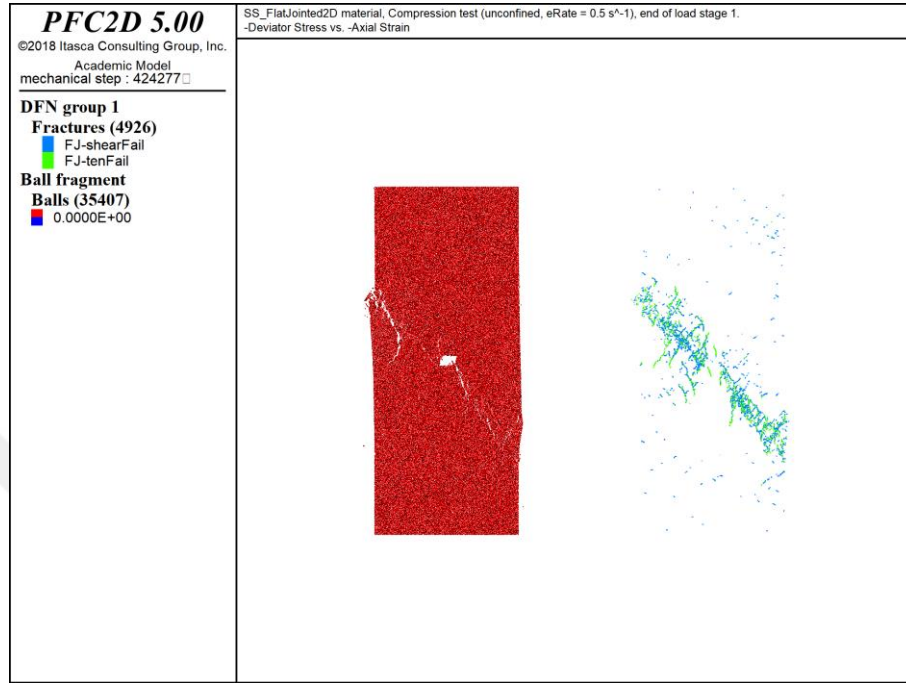
Şekil 7.10. Elipsoit şekilli (R: 10,8 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



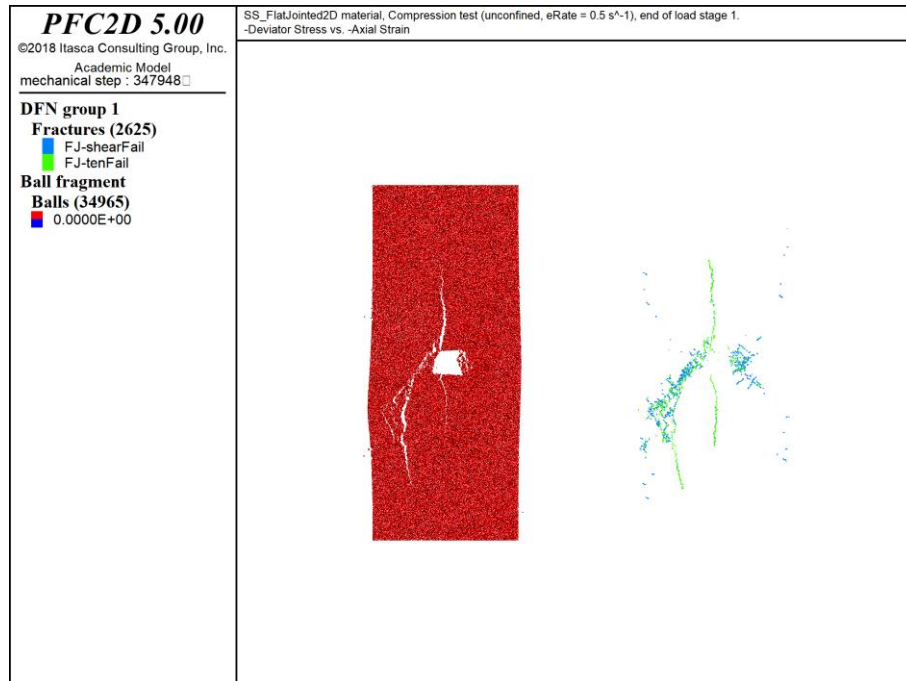
Şekil 7.11. Elipsoit şekilli boşluğunun çapında meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.

7.5.3. Kare şekilli boşlukların etkisi

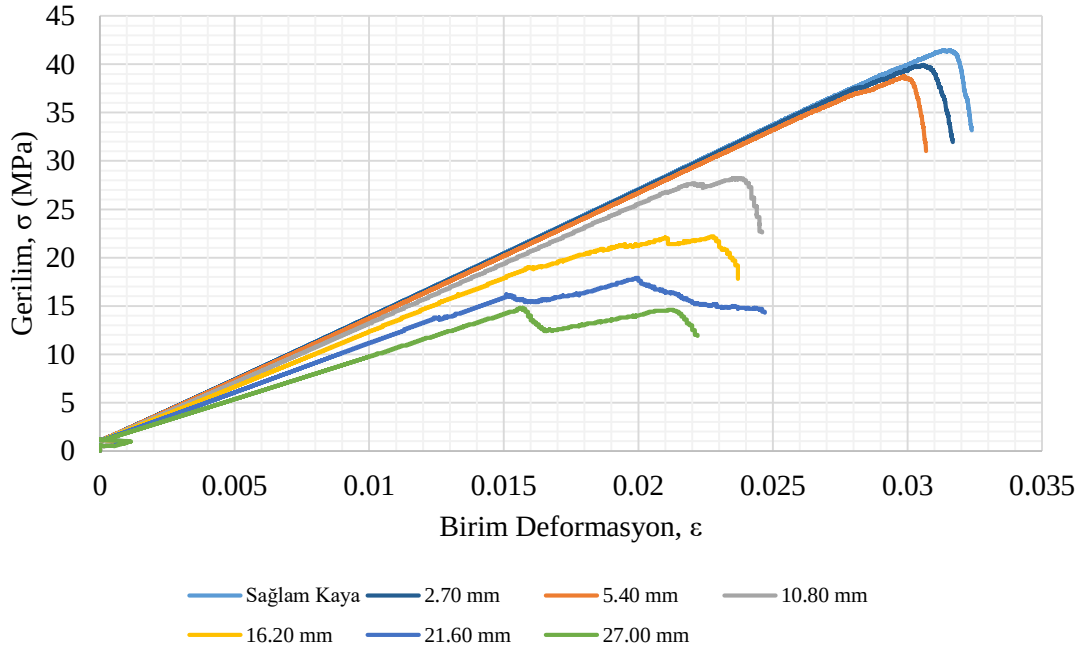
PFC’de oluşturulan ve laboratuvar sonuçlarına göre kalibre edilmiş model üzerinde kare şekilli boşlukların etkisini araştırabilmek amacıyla genişlikleri karot çapının %5’i ile %50’si arasındaki değerlere denk gelecek şekilde 2,7 ile 27 mm arasında değişen genişliğe sahip boşluklar oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerden elde edilen sonuçlara göre kare şekilli boşluklarda, boşluk genişliğinin karot çapının %10’una ulaştığı sınıra kadar olan boşluklarda modelde yenilme ağırlıklı olarak makaslama çatlaklarının kontrolün gerçekleşmektedir. Kare boşlukların genişliğinin karot çapının %10’unu aştığı durumlarda ise yenilme çekme çatlaklarının kontrolünde gelişmektedir (Şekil 7.-12 - 7.13). Kare şekilli boşlukların yenilme davranışı üzerindeki etkisinin model üzerinde meydana gelen çatlak türleri ve yoğunlukları ile gözlenebilmektedir. Bununla birlikte Şekil 7.14’te verilen ve kare şekilli boşlukların dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin gözlenebildiği verilerde kare şekilli boşluğun genişliğinin karot çapının %10’una denk geldiği koşullarda modelin dayanımının yaklaşık olarak %35 düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte meydana gelen birim deformasyon oranı da %40’a varan oranda azalmaktadır. Gerilim ve birim deformasyonda meydana gelen bu düşüslere bağlı olarak kare şekilli boşlukların etkisi ile modelin elastisite modülü değeri boşluksuz koşulda 1,32 GPa iken, en büyük geometriye sahip kare şekilli boşluğun bulunduğu durumda 0,90 GPa değerine kadar düşmektedir. Kare şekilli boşluklar göz önüne alındığında modelde boşluk özelliklerinin yenilme davranışı üzerindeki etkisinin net bir şekilde kare şekilli boşluğun genişliğinin karot çapının %10’u olan değere ulaştığında gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 7.12. Kare şekilli (R: 5,4 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



Şekil 7.13. Kare şekilli (R: 10,8 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.

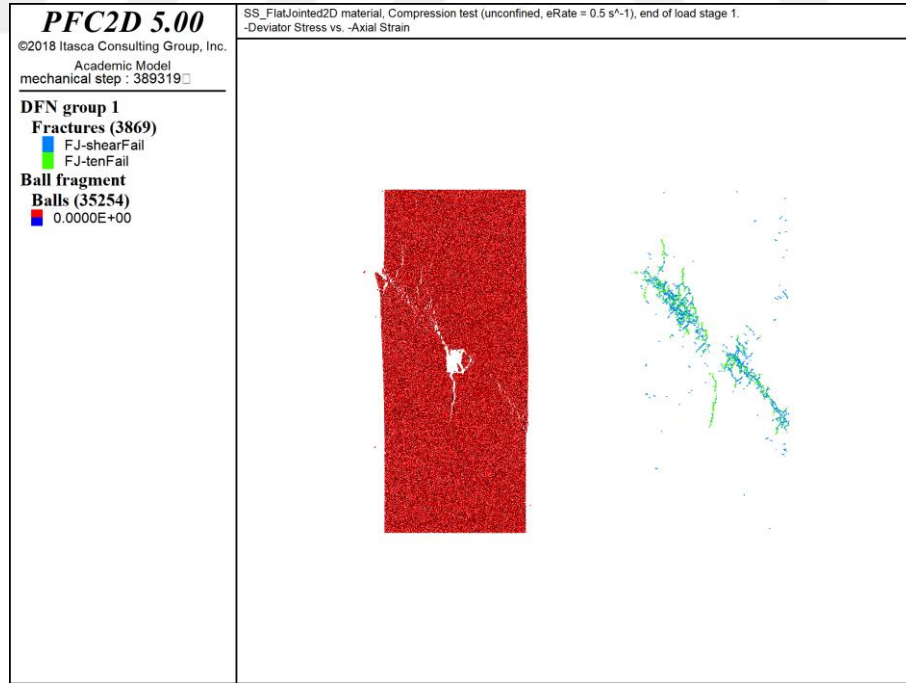


Şekil 7.14. Kare şekilli boşluğunun genişliğinde meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.

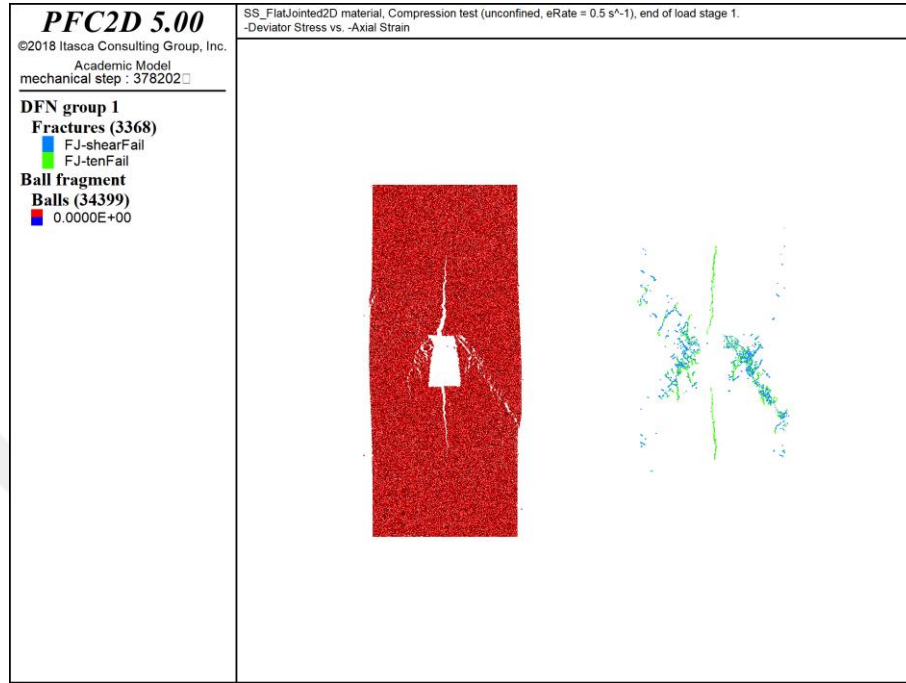
7.5.4. Dikdörtgen Şekilli Boşlukların Etkisi

PFC’de oluşturulan ve laboratuvar sonuçlarına göre kalibre edilmiş model üzerinde kare şekilli boşluklara ek olarak dikdörtgen şekilli boşlukların da modelin yenilme davranışı üzerinde etkisinin araştırılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda model içinde genişlikleri kare şekilli boşluklarda olduğu gibi karot çapının %5’i ile %50’si arasındaki değerlere denk gelecek şekilde 2,7 ile 27 mm arasında değişen genişliğe sahip boşluklar oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda dikdörtgen şekilli boşluklarda da benzer şekilde karot çapının %10’una ulaştığı koşulda model yenilme çekme çatlaklarının etkisinde gerçekleşmektedir. Ancak dikdörtgen şekilli boşluklarda çekme çatlakları kontrolünde meydana gelen yenilme koşullarında meydana gelen çekme çatlaklarının sayısı kare şekilli boşluklarda meydana gelen çekme çatlaklarının sayısına göre çok daha fazladır. Bu durum dikdörtgen şekilli boşlukların geometrilerden dolayı gerilme alanlarının boşlukların üst ve alt bölümlerinde yoğunlaşması olarak açıklanabilir (Şekil 7.15 - 7.16). Dikdörtgen şekilli boşlukların yenilme davranışı üzerindeki etkisi incelendiğinde boşluk genişliğinin karot çapının %10’u ile %20’si arasında olduğu değerlerde dayanım değerlerinde %50’ye varan bir düşüş olduğu görülmektedir. Bununla birlikte modelde meydana gelen birim deformasyon miktarı da boşluk

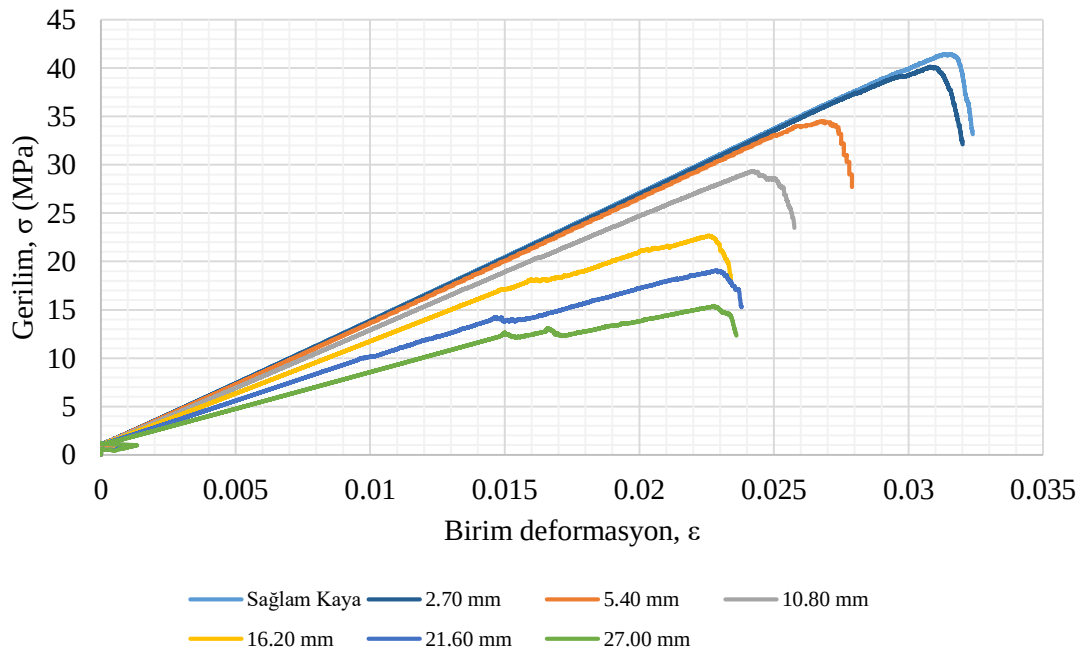
genişliğinin %20'ye ulaştığı noktadan sonra değişmediği, o noktaya kadarsa %40 oranında azaldığı söylenebilir. Model sonuçlarından elde edilen verilerdeki değişimler dikkate alındığında boşluksuz modelin elastisite modülü değeri 1,32 GPa iken, dikdörtgen şekilli boşluk genişliğinin karot çapının %10'u olduğu durumda 1,25 GPa, %20 olduğu durumda 1,20 GPa, %30 olduğu durumda ise 0,95 GPa olarak bulunmuştur. Benzer geometrik yapıda olması nedeniyle dikdörtgen şekilli boşlukların dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisinin kare şekilli olan boşlukların etkisi ile karşılaştırılması daha sağlıklı bir yaklaşım olacaktır. Bu durumda kare şekilli boşluk içeren modellerde boşluk genişliğinin %20'si olan değere ulaşıldığında birim deformasyon bir değişim meydana gelmemekte, boşluk genişliğinin artması ile birlikte sadece dayanımda azalma meydana gelmektedir. Söz konusu bu kritik koşul dikdörtgen şekilli boşluklarda boşluk genişliğinin karot çapının %30'una ulaşıldığı durumda söz konusudur. İki boşluk tipi arasında gözlenen bu temel farkın en önemli nedeni modelde bulunan boşluklarda yükleme bağlı olarak gerilim yoğunlaşmalarının farklı şekilde dağılım göstermesi olarak açıklanabilir.



Şekil 7.15. Kare şekilli (D: 5,4 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



Şekil 7.16. Dikdörtgen şekilli (D: 10,8 mm) boşluk içeren modelin yenilme sonra görünümü.



Şekil 7.17. Dikdörtgen şekilli boşluğunun genişliğinde meydana gelen değişimin modelin gerilim-birim deformasyon grafikleri üzerindeki etkisi.

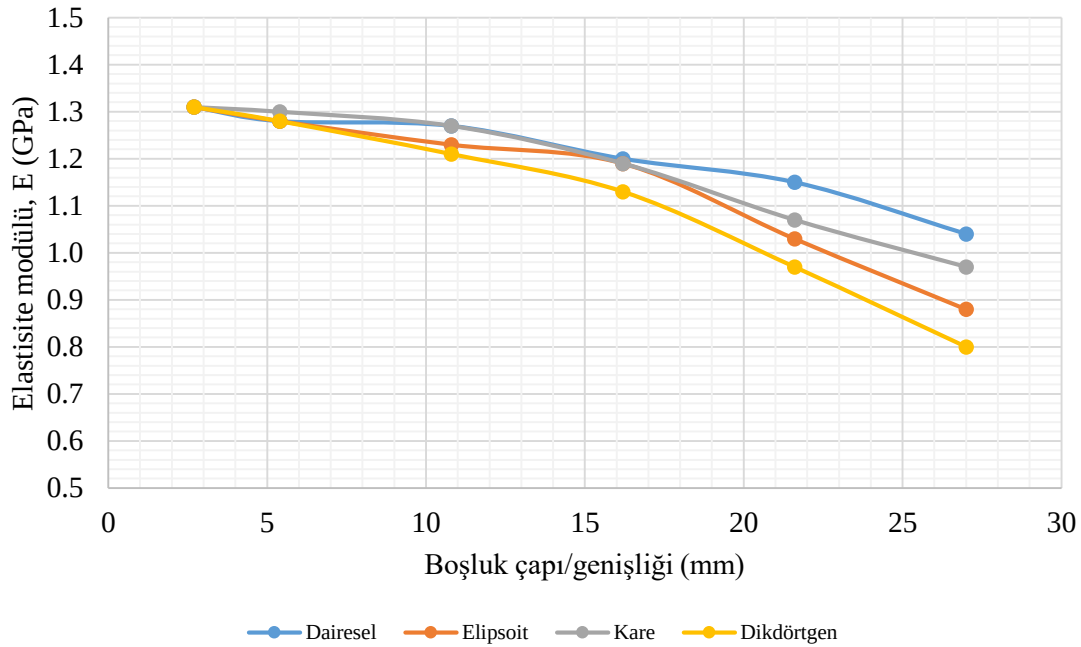
7.5.5. Boşluk Tipinin Etkisi

Kalibre edilmiş model üzerinde dört farklı boşluk tipine ait olmak üzere altı farklı çap/genişlik koşulunda oluşturulan boşlukların elastisite modülü değerleri üzerindeki etkisi Çizelge 7.3’de ve Şekil 7.18’te detaylı olarak verilmiştir. Boşluk tipinin modelin dayanım ve deformasyon parametreleri üzerindeki etkisinin yorumlanması aşamasının iki farklı etkinin söz konusu olduğu söylenebilir. Bu noktada dairesel ve kare şekilli boşluklar ile elipsoit ve dikdörtgen şekilli boşlukları dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisi benzer olarak söylenebilir. Dairesel ve kare şekilli olan, geometrik açıdan kendi içinde homojen bir özellik gösteren boşluklardan kaynaklı olarak modelin elastisite modülü üzerinde meydana gelen azalma elipsoit ve dikdörtgen şekilli olan boşluklara göre daha azdır. Boşluk tipine göre ortaya çıkan bu ayrışmanın en önemli nedeni ise kendi için geometrik açıdan homojen olan dairesel ve kare şekilli boşlukların yükleme bağlı olarak gerilmelerin eş dağılımına imkan sağlaması, elipsoit ve dikdörtgen şekilli boşluklar gibi gerilmelerin ağırlıklı olarak üst ve alt bölgelere aktarılmamasına neden olması söylenebilir.

PFC’de oluşturulan modellerden elde edilen bu veriler kullanılarak doğal koşullar için de yorum yapılması mümkündür. Doğal koşullarda kaya malzemeleri içerisinde kare ve dikdörtgen şekilli boşlukların görülmesi ihtimali çok azdır. Ancak dairesel ve elipsoit şekilli boşluklara sıkça rastlanılabilmektedir. Bu durumda dairesel şekilli boşlukların, elipsoit şekilli boşluklara oranla kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin elipsoit şekilli olan boşluklara göre ortalama olarak %10’a varan oranda daha az olduğu söylenebilir. Dairesel şekilli boşluklarda yüklemeye bağlı olarak meydana gelen gerilim, elipsoit şekilli boşluklara göre gerilim yoğunlaşma alanlarının boşluğun hemen her yerine aktarılabilmesi nedeniyle kaya malzemesinin dayanımının çok fazla düşmesine neden olmamaktadır. Söz konusu bu gerilim dağılımı nedeniyle kaya malzemesinde makaslama çatlakları ağırlıklı olarak oluşmakta ve doğrudan yenilmeye neden olan çekme çatlaklarının hem oluşumu daha geç meydana gelmekte hem de sayıları daha az olmaktadır. Bununla birlikte elipsoit şekilli boşluklarda yüklemeye bağlı olarak gerilim boşluğun üst ve alt bölgelerinde yoğunlaştığı için boşluk genişliği düşük olsa dahi çekme çatlakları oluşmakta bu da kaya malzemesinin daha düşük bir dayanım değerine sahip olmasına neden olmaktadır.

Çizelge 7.3. Boşluk çapı/genişliğinin elastisite modülü üzerindeki etkisi.

Boşluk Çapı/Genişliği (mm)	Boşluk Tipi	Elastisite Modülü (GPa)
2.70	Dairesel	1.31
2.70	Elipsoit	1.31
2.70	Kare	1.31
2.70	Dikdörtgen	1.31
5.40	Dairesel	1.28
5.40	Elipsoit	1.28
5.40	Kare	1.30
5.40	Dikdörtgen	1.28
10.80	Dairesel	1.27
10.80	Elipsoit	1.23
10.80	Kare	1.27
10.80	Dikdörtgen	1.21
16.20	Dairesel	1.20
16.20	Elipsoit	1.19
16.20	Kare	1.19
16.20	Dikdörtgen	1.13
21.60	Dairesel	1.15
21.60	Elipsoit	1.03
21.60	Kare	1.07
21.60	Dikdörtgen	0.97
27.00	Dairesel	1.04
27.00	Elipsoit	0.88
27.00	Kare	0.97
27.00	Dikdörtgen	0.80

**Şekil 7.18.** Boşluk çapı/genişliğinin elastisite modülü üzerindeki etkisi.

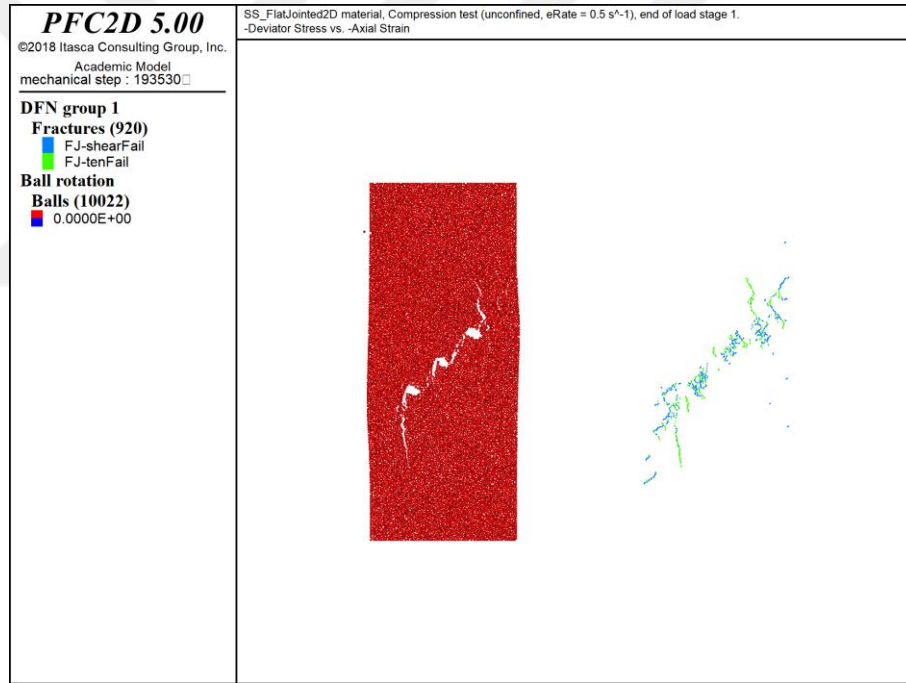
7.5.6. Boşluk sayısı ve yerleşiminin yenilme davranışı üzerindeki etkisi

Kaya malzemelerinde yaygın olarak gözlenen dairesel şekilli boşlukların sayısının birden fazla olmasının dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması için de kalibre edilmiş model kullanılarak farklı boşluk koşulları içeren modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellere ilişkin bilgiler Çizelge 7.1’de detaylı olarak verilmiştir. Boşluk sayısının etkisinin araştırılması sırasında boşluk çapı olarak karot çapının %10’u alınmıştır. Boşluk sayısının yanı sıra boşluk yerleşiminin de etkisinin gözlenebilmesi amacıyla yatay, dikey ve çapraz olmak üzere farklı sayıda boşluk içeren modeller de oluşturulmuştur (Şekil 7.19 - 7.25). Oluşturulan modellerde yenilme davranışı birden fazla boşluğun her durumda boşluk yerleşiminden bağımsız olarak öncelikle boşluklar arasında çatlak düzlemlerinin gelişmesi ile boşlukların birleşmesi sonucunda oluşan ve daha büyük çaplı boşluklar gibi davranan yapısal unsurlardan kaynaklı olarak meydana gelmiştir.

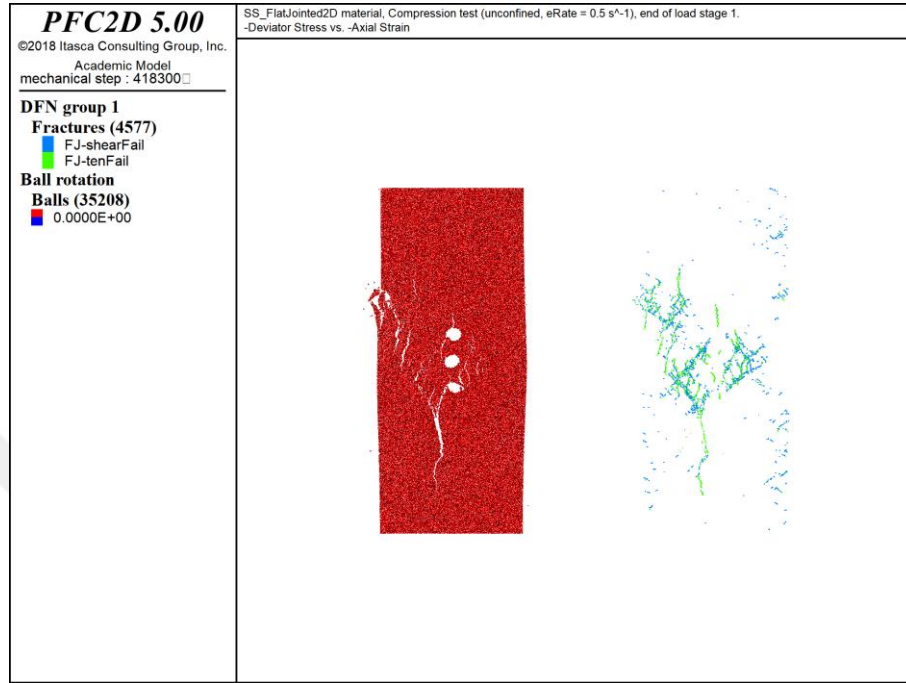
3 boşluk bulunan çapraz, dikey ve yatay olarak yerleşimi yapılmış modellerde yenilme öncelikle boşlukların yerleşimine bağlı olarak boşluklar arasında meydana gelen makaslama ve çekme çatlakları, sonrasında ise çekme çatlaklarının yüklemeye paralel yönde ilerlemesi sonucunda meydana gelmiştir. Boşluk sayısının arttığı ve 9, 15 ve 27 adet boşluğun bulunduğu koşullarda ise yenilme benzer şekilde öncelikle boşluklar arasında meydana gelen makaslama ve çekme çatlakları, sonrasında ise yüklemeye paralel yöndeki çekme çatlaklarının ilerlemesi sonucunda meydana gelmiştir. 4 adet boşluk içeren ve boşluk yerleşiminin rasgele yapıldığı modelde ise yenilme öncelikle boşluklar arasında makaslama ve çekme çatlaklarının meydana gelmesini takip eden ve modelin sınırına en yakın yakın şekilde devam eden makaslama veya çekme çatlaklarının oluşması ve ilerlemesi ile meydana gelmiştir.

Rasgele boşlukların bulunduğu modelde çatlak oluşumu herhangi iki boşluk arasında bir düzlem boyunca meydana gelmiştir. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile bir düzlem boyunca adeta bir çatlak yüzeyinin oluşması ile yenilmeye kadar geçen sürede meydana gelen yeni çatlakların çok büyük bir bölümü de yine bu düzlem üzerinde ve etrafında gözlenmiştir. Kaya malzemeleri açısından göz önüne alındığında birden fazla boşluğun etrafında meydana gelen çatlaklar ile bir zayıflık bölgesi oluştuğu takdirde yüklemeye bağlı olarak yeni oluşan çatlakların çok büyük bir bölümünün bu bölgelerde meydana gelebileceği ön görülebilmektedir. Boşluk sayısının etkisi göz önüne alındığında dayanım değerleri üzerinde en büyük etki 9 adet boşluğun bulunduğu modelde gözlenmiştir. Bu modelde dayanım değeri boşluksuz modelin dayanım değerinden yaklaşık olarak %40 daha azdır. Çok sayıda boşluğun bulunduğu modellerde 9, 15 ve 27 boşluğun bulunduğu modellerin dayanım

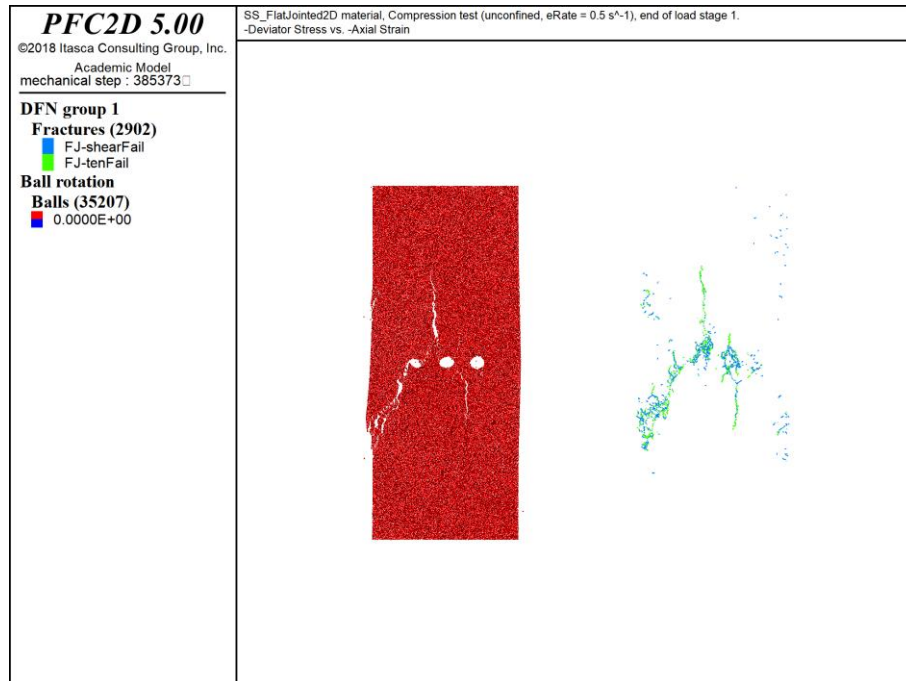
değerleri diğer modellere göre daha azdır. Bu durumun en önemli sebebi ise yüklemeye bağlı olarak çatlak oluşumunun meydana gelebileceği çok sayıda gerilim yoğunlaşması alanının bulunması olarak söylenebilir. Boşluk yerleşimi bakımından dayanım değerleri üzerinde meydana gelişim göz önüne alındığında ise model içerisinde boşlukların dikey yerleşim gösterdiği modelin dayanım değeri yatay olarak yerleşim gösteren modele göre yaklaşık %10 daha fazladır. Bu durumun gözlenmesinin en önemli nedeni ise yüklemeye paralel yönde dizilmiş olan 3 dikey boşluğun etki eden yükleme karşı birlikte direnç göstermesi ve çatlak oluşumunun daha geç başlaması söylenebilir. Oluşturulan tüm modellerden elde edilen gerilim-birim deformasyon grafikleri de Şekil 7.26’da verilmiştir.



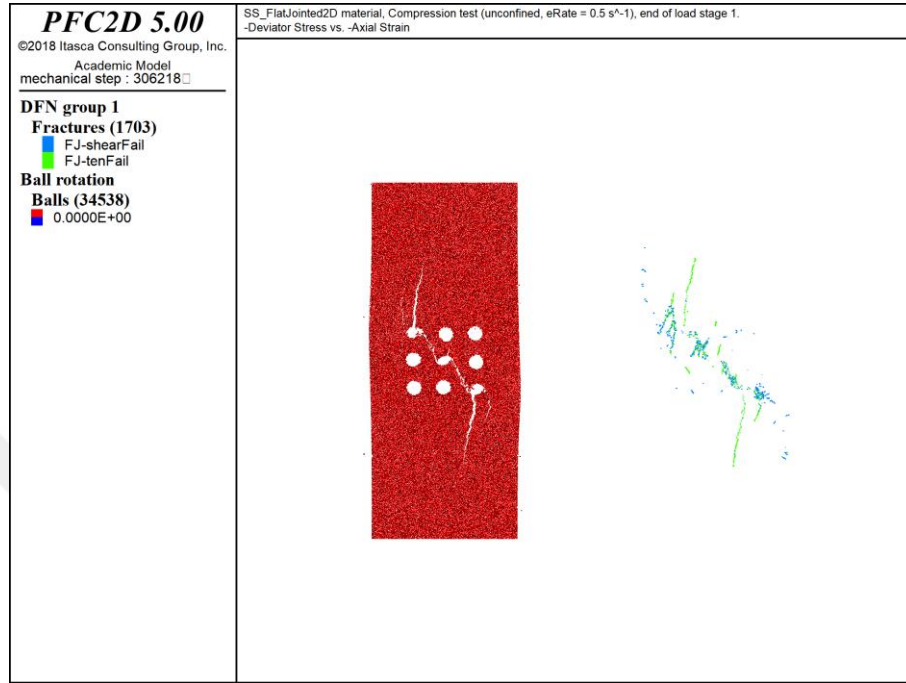
Şekil 7.19. 5,4 mm çaplı, 3 adet çapraz yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



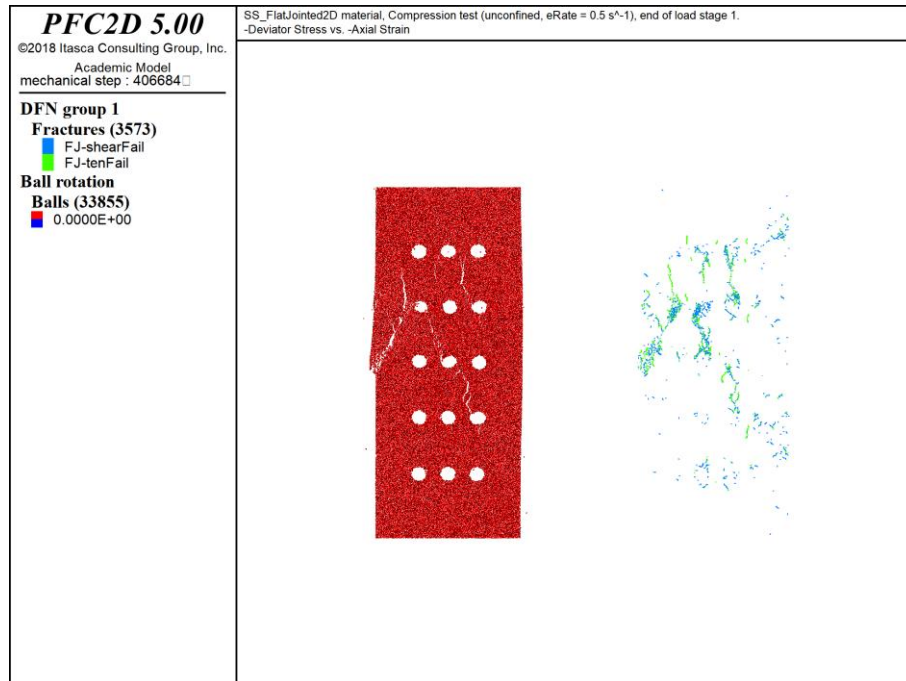
Şekil 7.20. 5,4 mm çaplı, 3 adet dikey yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



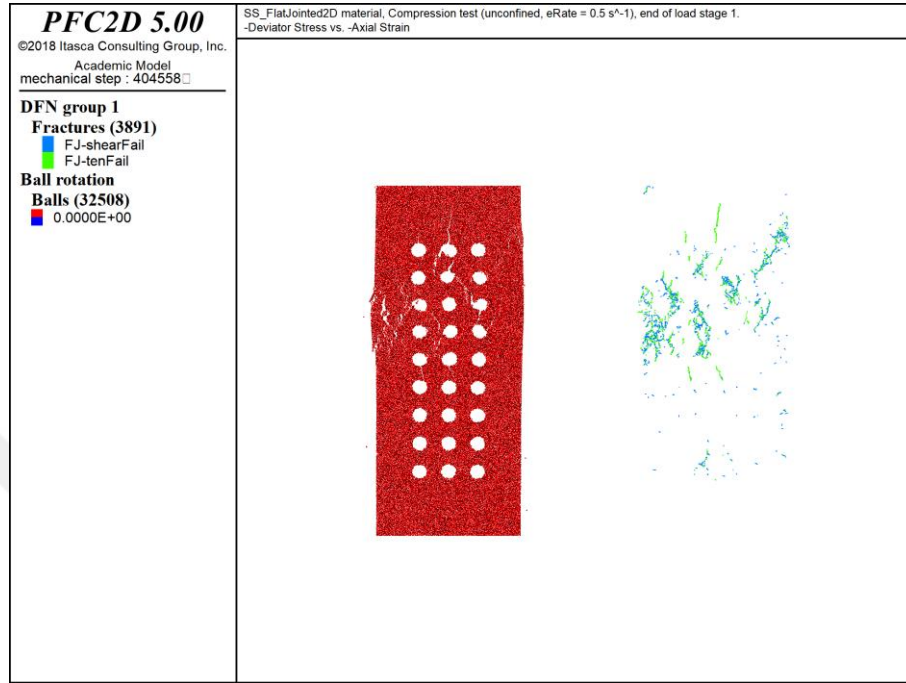
Şekil 7.21. 5,4 mm çaplı 3 adet yatay yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



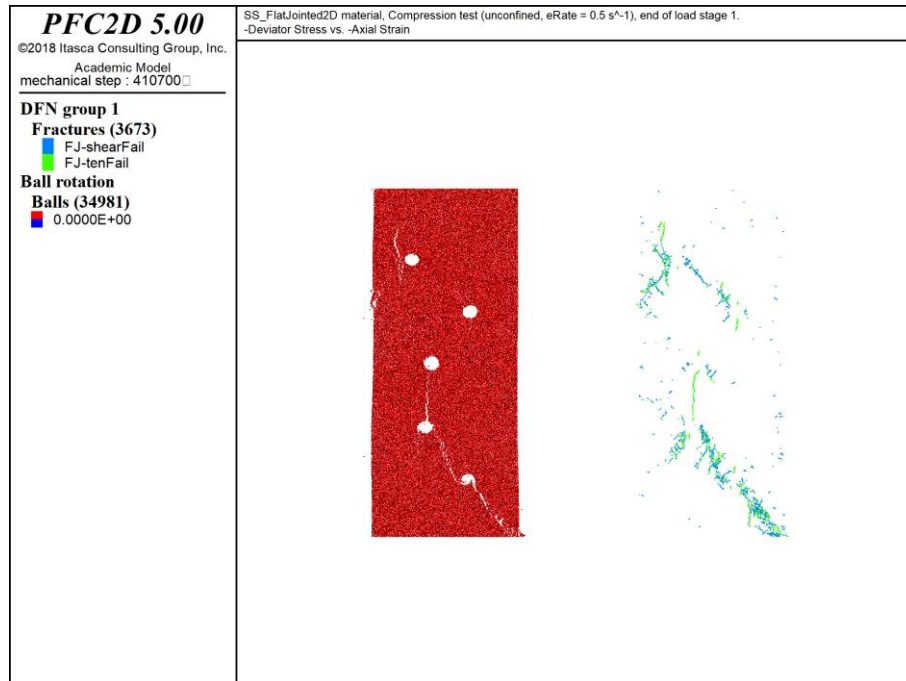
Şekil 7.22. 5,4 mm çaplı, 9 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



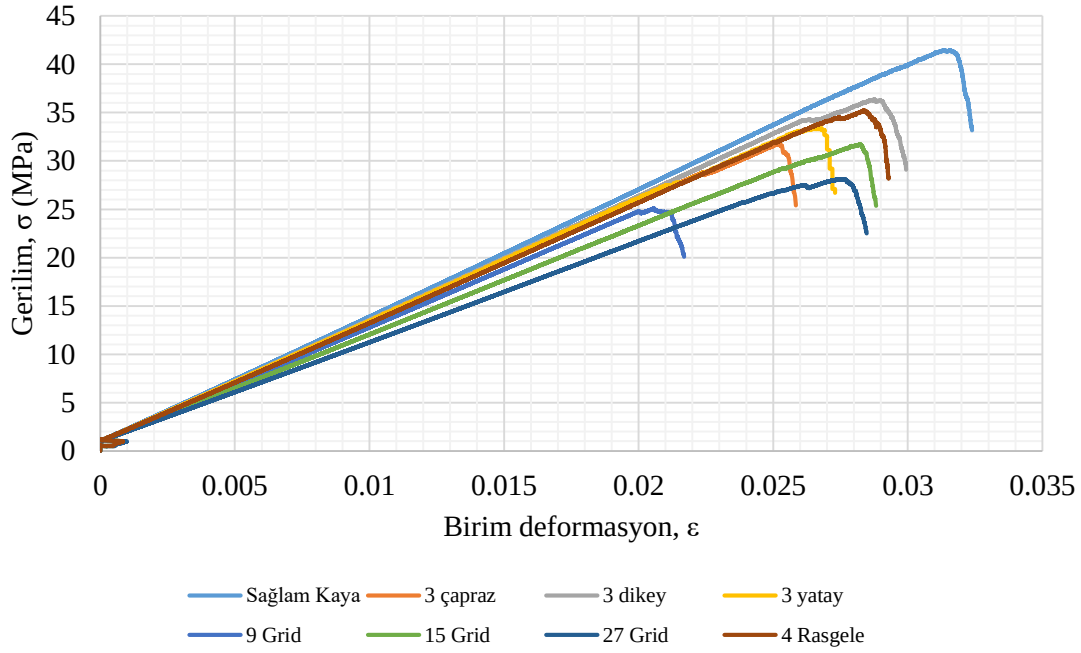
Şekil 7.23. 5,4 mm çaplı 15 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



Şekil 7.24. 5,4 mm çaplı, 27 adet grid yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



Şekil 7.25. 5,4 mm çaplı 4 adet rasgele yerleşimli dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



Şekil 7.26. Boşluk sayısı ve yerleşiminin gerilim-birim deformasyon üzerindeki etkisi.

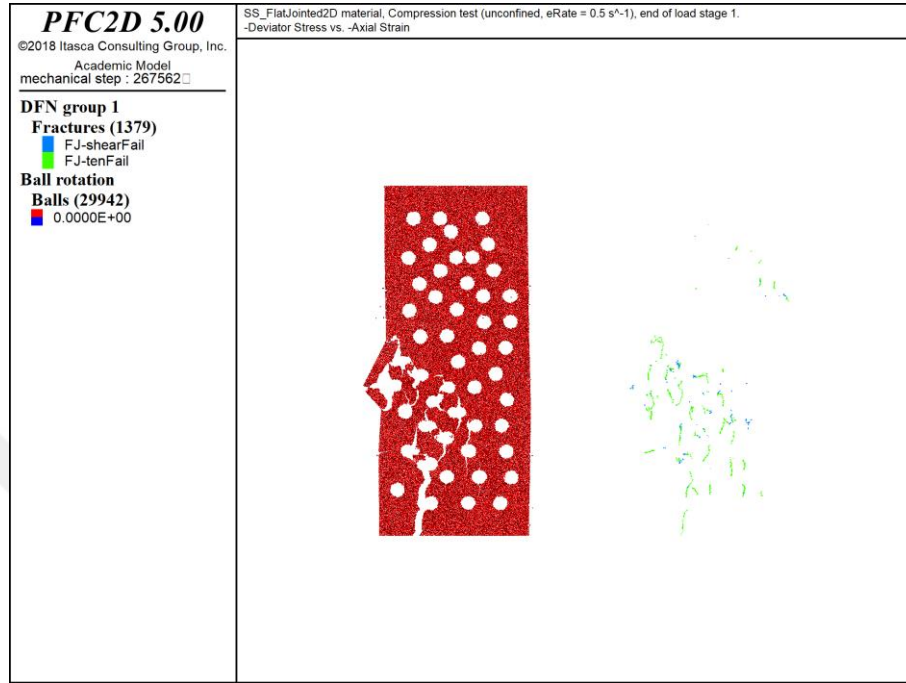
7.5.7. Deneysel ve nümerik verilerin karşılaştırılması

Sağlam kayayı temsil ettiği kabul edilen ve gerçek porozite değeri %3 olan temel modele her biri 5,4 mm çapa sahip yeni boşluklar eklenerek arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında elde edilen geniş aralıktaki gerçek porozite değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir (Şekil 7.27). Bu amaçla temel modele porozite değeri %25'e ulaşana kadar sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 ve 70 adet dairesel şekilli ve 5,4 mm çaplı boşluk içeren modeller oluşturulmuş ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen veriler çatlak davranışı, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülü verileri olmak üzere 3 başlıkta incelenmiştir. Hem karot örneklerde hem de nümerik modellerde gerçek porozite değerinin düşük olduğu koşullarda yenilme yüklemeye paralel yönde gelişen birincil (çekme) çatlaklarının kontrolünde meydana gelmiştir. Artan gerçek porozite değeri ile birlikte çatlaklar öncelikle büyük çaplı boşluklar arasında oluşmaktadır. Bu koşullarda birbirine yakın olan boşluklar varsa ilk olarak bu boşluklar arasında çatlak sistemleri gelişmekte ve bu boşluklar tek, daha büyük bir boşluk gibi davranmaktadır. Özellikle boşluk sayısı ve dolayısıyla gerçek porozite değerlerinin artması ile birlikte modellerde meydana gelen çekme çatlaklarının sayısı makaslama çatlaklarının 6 katına kadar ulaşmıştır. Hem karot örneklerde hem de nümerik modellerde yenilme davranışı ağırlıklı olarak çekme çatlaklarının

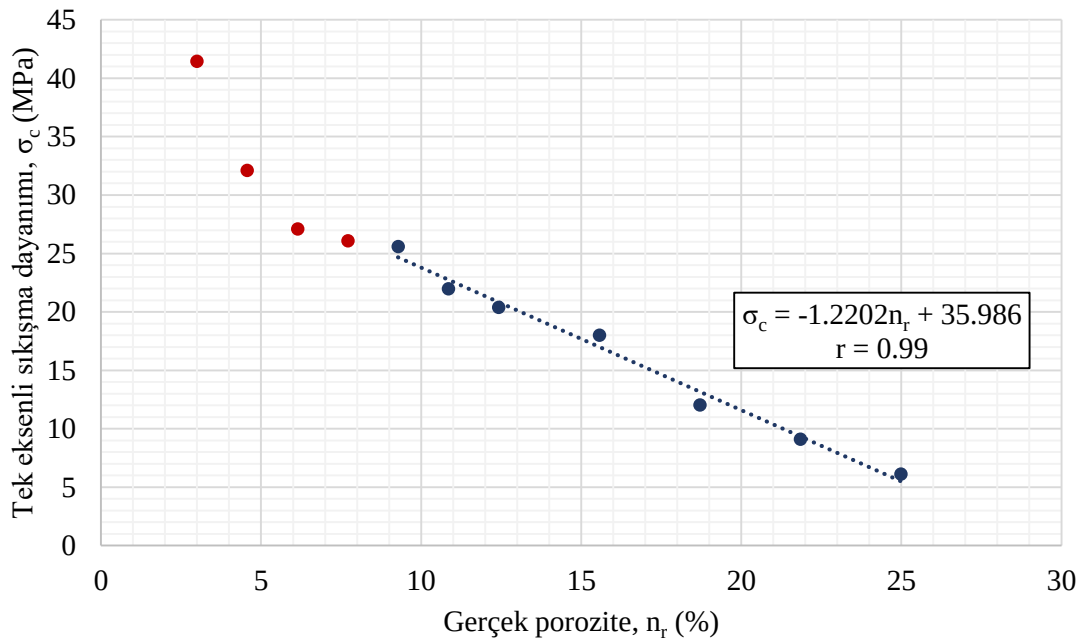
kontrolünde meydana gelmiştir. Bu noktada modelin yenilme davranışı temsil ettiği kabul edilen ve çekme çatlaklarının sayısının makaslama çatlaklarına oranını ifade eden çatlak oranı parametresi önerilmiştir. Çatlak oranı değerinin 1'in üzerine çıkması ile birlikte model hem çekme çatlaklarının kontrolünde yenilmekte hem de gerçek porozite değeri %10'un üzerinde bir değer olmaktadır (Çizelge 7.4). Şekil 7.27'de verildiği şekilde yeni boşluklar oluşturularak modelin gerçek porozite değeri arttırılmıştır. Boşluk oluşturma işlemine modelin gerçek porozite değeri %25'e ulaşana kadar devam edilmiştir. Modellerden elde edilen verilere göre Şekil 7.28 ve Şekil 7.29'da verilen ilişkiler elde edilmiştir. Özellikle gerçek porozite değerinin yaklaşık olarak %10'un üzerine çıktığı koşullarda modellerin tek eksenli sıkışma dayanımı verileri ile gerçek porozite değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ($r: 0,99$) doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Karot örneklerdeki benzer ilişki incelendiğinde doğrusal yerine istatistiksel olarak anlamlı ($r: 0,87$) üstel bir ilişki söz konusudur. Aynı parametreler arasındaki farklı istatistiksel kökene ait bir ilişki olmasının en önemli nedeninin modellerin karot örneklerin doğal özelliklerini tam olarak içermemesi olduğu düşünülmektedir. Bir diğer önemli parametre olan elastisite modülü değerleri ile modellerden elde edilen veriler karşılaştırılırken sadece kiriş elastisite modülü verilerinin karşılaştırılmasına karar verilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen gerilim-birim deformasyon grafiklerinde karot örneklerde olduğu gibi yüklemenin ilk aşamasında meydana gelen deformasyon yansıtılamamaktadır. Deformasyon yükleme ile eş zamanlı olarak ilerlemektedir. Bu nedenle karot örneklerin ve nümerik modellerin kiriş elastisite modülü değerleri ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu iki parametre arasında ise istatistiksel olarak anlamlı ($r: 0,99$) üstel bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Bu ilişkide gerçek porozite değeri için %10 sınır koşulu ise bulunmamaktadır.

Çizelge 7.4. PFC'de yapılan deneylerden elde edilen parametreler.

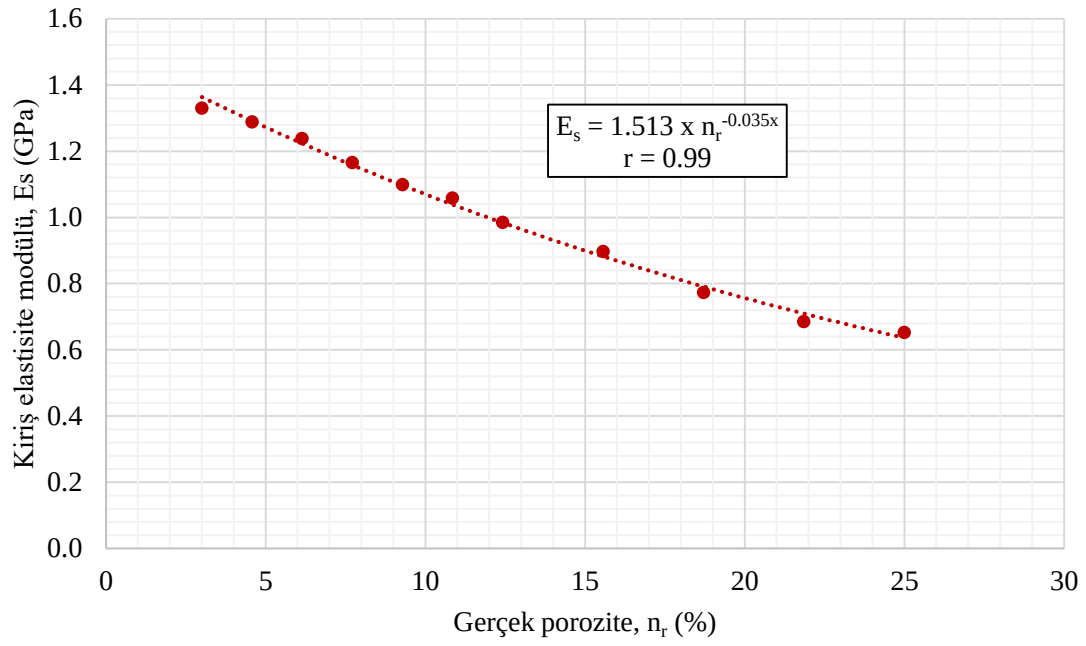
Boşluk Sayısı	n_r (%)	σ_c , MPa	Toplam Çatlak Sayısı	Çekme Çatlaklarının Sayısı	Makaslama Çatlaklarının Sayısı
0	3,00	41,46	5388	1969	3419
5	4,57	32,11	3767	1905	1862
10	6,14	27,09	2914	1414	1490
15	7,71	26,07	2076	1112	964
20	9,28	25,60	2144	1196	948
25	10,85	21,97	2069	1255	814
30	12,42	20,39	2378	1453	925
40	15,57	18,00	1972	1570	402
50	18,71	12,04	1379	1196	183
60	21,85	9,09	797	660	137
70	24,99	6,11	714	614	100



Şekil 7.27. 5,4 mm çaplı, 50 adet dairesel boşluk içeren modelin yenilmesi.



Şekil 7.28. PFC’de oluşturulan modellerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ile gerçek porozite değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 7.29. PFC’de oluşturulan modellerin kiriş elastisite modülü değerleri ile gerçek porozite arasındaki ilişki.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında Kütahya, Manisa ve Van illerinde bulunan 4 farklı yerden benzer jeolojik kökene sahip ancak boşluk özellikleri bakımından farklı 12 blok alınmıştır. Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan 12 bloktan çıkarılan karotlar üzerinde yapılan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak uygulanan nümerik yöntemler ve modelleme çalışmaları ile boşluklu kaya malzemelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin araştırılması amacıyla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan blokların kaya türlerinin belirlenmesi için yapılan X-Işını Difraktometresi (XRD), X-Işını Flüoresans (XRF) ve ateşte kayıp analizleri ile her bloğun kaya türü tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile literatürde aynı bölgelerde gerçekleştirilen çalışmalar ile uyumludur.
2. Kaya malzemelerinin laboratuvar koşullarında porozitelerinin belirlenmesi için önerilen genellikle atmosferik basınç koşullarında örneğin suya doyurulması yöntemi tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemde örneğin içindeki bağlantısız boşluklar ile birlikte suyun geçişine izin vermeyecek ölçüde küçük çaplı olan boşlukların etkisi hesaplanamamakta ve elde edilen porozite değerlerinde ciddi hatalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle örneği bir bütün olarak değerlendiren “görgül boşluk hacmi” yaklaşımı ile karotun çıkarıldığı bloğun boşluk özellikleri de dikkate alınarak, karotun geometrik ölçüleri aracılığı ile gerçek porozite değerine ulaşılmıştır. Elde edilen gerçek porozite değerleri ile tez çalışmasının başlangıç aşamasında Van’da (Muradiye) gerçekleştirilen arazi ve örnekleme çalışmaları sırasında alınan örnek üzerinde yapılan bilgisayarlı tomografik tarama (CT-Scan) yöntemi ile ulaşılan porozite değerlerinin de birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.
3. Tek eksenli yükleme koşullarında boşluk özelliklerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkisi göz önüne alındığında en önemli sınırlayıcı parametre gerçek porozite değeri öne çıkmıştır. Gerçek porozite değerinin %10 olduğu koşul, yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen verilerin dağılımı göz önüne alındığında sınır koşulu oluşturmaktadır. Gerçek porozite değeri %10’un üzerinde olan örneklerin, gerçek porozite değerleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı, kiriş elastisite modülü, tanjant elastisite modülü

ve ortalama elastisite modülü değerleri istatistiksel olarak anlamlı ve yüksek korelasyon katsayısına sahip bağıntılar elde edilmiştir. ($r(\sigma_c)$: 0.88, $r(E_s)$: 0.86, $r(E_t)$: 0.71, $R(E_{ort})$: 0.70).

4. Tek eksenli yükleme koşullarında gerçek porozite değeri %10'un altında olan örneklerin doğal koşullarda dayanım değerlerinin, gerçek porozite değerleri %10'un üzerinde olan örneklerden daha yüksek dayanım değerlerinde olması beklenirken örneklerin genel dağılımları incelendiğinde tam tersi bir davranış söz konusudur. Bu durumun ortaya çıkmasının en önemli nedeni ise kaya malzemesinin yenilme davranışı üzerinde boşluk özelliklerinin doğrudan etkili olmasıdır.
5. Tek eksenli yükleme koşullarında L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4'den (Naşa bölgesi) alınan örneklerin gerilim-birim deformasyon grafiklerinde tekrarlı olacak şekilde birkaç defa azalma ve artmanın meydana geldiği basamak olarak tanımlanan davranış gözlenmiştir. Söz konusu bu davranışın nedeni örneklerin küresel ve elipsoit olarak tanımlanabilecek düzenli şekilli boşluklara sahip olması ve bu boşlukların örneklerin içinde dağılım göstermesidir. L-1 (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) ve L-2'ye (Kula Volkanik Jeoparkı) ait olan örneklerdeki boşlukların düzensiz şekilli olması, birbirileri ile çok yakın konumlarda bulunması, boşlukların örneklerin belirli bölgelerinde yoğunlaşması, birbirine yakın konumda bulunan birden fazla boşluğun tek bir ve büyük bir boşluk gibi davranması, boşluk dizilimlerinin genellikle yükleme yönüne dik yönde veya vevv konumda olması nedeniyle gerilim-birim deformasyon grafiklerin basamak olarak tanımlanan davranış meydana görülmemiştir. Basamaklı yapının gözlendiği deneylerde deformasyon örneklerdeki boşlukların yüklemeye bağlı olarak kapanması ve bu döngünün birkaç defa tekrarlanması ile yenilme meydana gelen kadar devam etmiştir.
6. Basamaklı yapının görüldüğü L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4 (Naşa bölgesi)'e ait örneklerin tek eksenli yükleme koşullarında her basamağın kendi içinde bir küçük yenilme davranışı sergilediği, 1. basamağın örneğin bir bütün olarak yükleme karşı gösterdiği davranışı, sonraki her basamağın ise boşluk özelliklerini temsil ettiği söylenebilir. Basamakların elastisite modülü değerleri ayrı ayrı hesaplandığında ise basamakların hemen hemen tamamında elastisite modülü değerlerinin 1. basamakta en yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun en

önemli nedeni ise boşlukların oturması veya kapanması nedeniyle meydana gelen yeni koşulun yüklemeye karşı deney başlangıç koşullarındaki kadar direnç gösterememesidir.

7. İçinde eş çaplı, küresel ve elipsoit şekilli boşluklar bulunan örneklerde yenilme davranışı tamamen çekme çatlaklarının kontrolünde meydana gelmektedir. Ancak boşluk çapının değişmesi, farklı çapta boşlukların bulunması durumunda ise yükleme sonucunda ilk olarak büyük çaplı boşluklar arasında birincil çatlaklar olarak tanımlanan makaslama ve çekme çatlakları meydana gelmektedir. Daha sonraki aşamada ise büyük çaplı boşlukların örnek içindeki konumlarına bağlı olarak yenilme ikincil çatlaklar olarak tanımlanan çekme ve makaslama çatlaklarının kontrolünde meydana gelmektedir. Boşluklu kaya malzemelerinde yenilme davranışının meydana gelmesi üzerinde boşlukların çapları ve benzerliği ile dağılımları etkili olmaktadır. Boşluk çapının arttığı ve farklı çaptaki boşlukların bulunduğu örneklerde meydana gelen birim deformasyonları arasında %60'a varan farklar meydana gelmiştir.
8. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilirken her bir lokasyon kendi içinde benzer gerçek porozite değerine sahip olan örnekler gruplandırılarak yorumlanmıştır. Boşlukların homojen bir dağılım göstermediği, ağırlıklı olarak düzensiz şekilli boşlukların bulunduğu L-1 (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) ve L-2 (Kula Volkanik Jeoparkı) lokasyonlarında gerçek porozite değerindeki artışın kohezyon ve içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisi oldukça sınırlı kalmıştır. Elastisite modülü değerleri dikkate alındığında ise L-1'de gerçek porozite değerinin artışı ile birlikte %40'a varan bir düşüş meydana gelirken aynı durum L-2'de meydana gelmemiştir. Bu durumun en önemli nedeni ise L-2'ye ait olan örneklerde boşlukların yanı sıra üç eksenli sıkışma koşullarında dayanım ve deformasyonu etkilemesi muhtemel olan akma izlerinin hakim olmasıdır. L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4'te (Naşa bölgesi) ise gerçek porozitede meydana gelen artış ile birlikte kohezyon değerlerinde %40-75 arasında azalma meydana gelmiştir.
9. Üç eksenli yükleme koşullarında küresel ve küresele yakın şekilli boşluklar bulunan L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4 (Naşa bölgesi) örneklerinin dayanım değerleri tek eksenli yükleme koşullarına göre 4-10 kat daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Tek ve üç eksenli yükleme koşullarında arasında meydana gelen bu fark düzensiz şekilli boşlukların bulunduğu L-1

(Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanları) ve L-2'ye (Kula Volkanik Jeoparkı) ait örneklerde görülmemektedir. Bu verilerden hareketle küresel ve küresele yakın şekilli boşlukların üç eksenli yükleme koşullarında kaya malzemelerinin dayanım değerlerinin yüksek oranda artmasına neden olduğu söylenebilir.

10. Kaya malzemelerinde yenilmenin gerçekleşebilmesi için çatlakların oluşması, ilerlemesi ve birleşerek yenilme düzlemlerini oluşturması gerekmektedir. Söz konusu bu davranış gerçek porozite oranı %10'un üzerinde olan boşluklu kaya malzemelerinde tamamen boşluklar tarafından kontrol edilmektedir. Ancak gerçek porozite değeri %10'un altında olan örneklerde ise söz konusu yenilme davranışının meydana gelmesinde mineralojik yapı da etkili olmaktadır. Özellikle L-2'den alınan örneklerin ince kesitleri üzerinde yapılan incelemelerde hamur malzemesinin yüksek oranda bulunduğu, L-3 ve L-4'den alınan örneklerin ince kesitleri incelendiğinde ise iri taneli minerallerin kesitin tamamında hakim olduğu, hamur malzemesinin çok az miktarda bulunduğu görülmüştür. Söz konusu bu farklılığın yüklemeye nedeniyle meydana gelen çatlakların sabit yükleme hızında dayanım değeri farklı herhangi bir mineralojik unsurun etkisine maruz kalmadan ilerleyebilmesi nedeniyle meydana geldiği düşünülmüştür. Lokasyonlar arasındaki söz konusu bu mineralojik farklılığın gerilim-birim deformasyonlarında özellikle düşük gerçek porozite değerlerinde elde edilen basamaklı olan ve olmayan davranışın ortaya çıkmasında kısmen de olsa etkili olduğu düşünülmektedir.
11. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan farklı çaplarda (2,7 mm, 5,4 mm, 10,8 mm, 16,2 mm, 21,6 mm ve 27 mm) ve geometriye (dairesel, elipsoit, kare ve dikdörtgen) sahip tek bir boşluk içeren nümerik modellerde boşluk çapının/genişliğinin örnek çapının %10'u (5,4 mm) olduğu durumunda hem dayanım hem de deformasyon değerlerinde %30'a varan azalma meydana gelmiştir. Söz konusu bu sınır koşuluna kadar nümerik modellerde yenilme makaslama, sınırı aşan koşullarda ise çekme çatlakları sonucunda meydana gelmiştir.
12. Kaya malzemelerinde bulunan boşlukların genellikle küresel ve küresele yakın şekilli olmaları nedeniyle nümerik modellerde yapılan detay çalışmalar dairesel boşluklar üzerinden yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda gözlenen %10 sınır koşulunun nümerik

çalışmalar ile de doğrulanabilmesi amacıyla 5,4 mm çapa sahip olan boşluklar eklenerek modelin gerçek porozite değeri %3 ile %25 arasında değişen modeller oluşturulmuştur. Nümerik modeller üzerinde de gerçek porozite değerinin %10'un üzerinde olduğu koşullarda da istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

13. Nümerik modellerde yenilme davranışının tanımlanabilmesi için meydana gelen makaslama ve çekme çatlaklarının sayılarının faydalı olabileceği düşünülerek, çekme çatlaklarının sayısının makaslama çatlaklarının sayısına oranını temsil eden “çatlak oranı” değeri önerilmiştir. Önerilen bu değer 1'in üstünde olduğu koşulda nümerik modelin yenilmesi davranışı çekme çatlaklarının kontrolünde olmakta ve modelin gerçek porozite değeri de %10'un üzerindedir.

Yukarıda elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak gelecekte boşluk özelliklerinin kaya malzemelerinin dayanım ve birim deformasyon özellikleri üzerindeki etkisine yönelik olarak çalışma yapmayı planlayan araştırmacıların aşağıda verilen noktaları dikkate alması önerilmektedir.

1. Tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı verilerinden elde edilen dayanım, elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı verileri ile gerçek porozite değerleri arasında elde edilen ilişkinin örnek sayısı ve kaya türü artırılarak geliştirilmesi literatür açısından oldukça önemlidir.
2. Örneklerde meydana gelen çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşimi davranışın mineralojik özellikler ile olan ilgisinin detaylı bir şekilde araştırılabilmesi için deney sonrasında örnek üzerinden çatlakların olduğu bölgelere ait olan ince kesitlerin yapılması ve değerlendirilmesinde yenilme davranışı üzerinde mineralojik yapının etkisinin ortaya konulabilmesi için yararlı olacaktır.
3. PFC kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen gerilim-birim deformasyon eğrilerinin L-3 (Köşk bölgesi) ve L-4 (Naşa bölgesi) örneklerindeki gibi basamaklı yapıya sahip olmamasının en önemli nedeni olan jeolojik malzemelerinin detay özelliklerinin modellere yansıtılamaması problemine yönelik olarak yapılacak her değerlendirme ve çalışma literatür ve uygulama açısından kritik değere sahiptir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akdeniz, N., ve Konak, N., (1979). Simav-Emet-Dursunbey-Demirci yörelerinin jeolojisi. *MTA Derleme Raporu*, Ankara, Türkiye.

Al-Harhi, A.A., Al-Amri, R.M. ve Shehata, W.M., (1999). The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 54, 313-320.

Baud, P., Wong, T. ve Zhu, W., (2014). Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 202-211.

Bobet, A. ve Einstein, H.H., (1998). Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7), 863-888.

Bompard, P. ve Francois, D., (1984). Effect of porosity on fatigue crack propagation in sintered nickel. *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture (ICF6)*, New Delhi, India.

Broan, T., Türkecan, A., Dinçel, A. ve Erdoğan, G., (1983). Kula-Selendi (Manisa) Dolaylarının Jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 17, 3-28.

Bubeck, A., Walker, R.J., Healy, D., Dobbs, M. ve Holwell, D.A., (2017). Pore geometry as a control on rock strength. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 457, 38-48.

Carter, B.J., (1992). Size and stress gradient effects on fracture around cavities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Volume 25(3), 167-186.

Carter, J.B., Emery, E.Z. Lajtai ve Y., Yuan, (1992). Tensile fracture from circular cavities loaded in compression. *International Journal of Fracture*, 57, 221-236.

Chang, C., Zoback, D.M. ve Khaksar, A., (2006). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51, 223-237.

Chen, L. ve Liu, J., (2015). Numerical analysis on the crack propagation and failure characteristics of rocks with double fissures under the uniaxial compression. *Petroleum*, 1, 373-381.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Cheng, C., (2011). Influence of homogeneity of rock material on rockburst based on numerical analysis. *Mechanic Automation and Control Engineering*, 2241-2444.

Cundall P. A., (1987). Distinct element models of rock and soil structure. *In: Brown ET, editor, Analytical and computational methods in engineering rock mechanics*, 129-163.

Cundall, P. A., (1971). A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, 1, 2-8.

Cundall, P. A., (1988). Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model - Part I: A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 25(3), 107-116.

Cundall, P. A. ve Strack O. D. L., (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechniques*, 29(1), 47-65.

Cundall, P. A. ve Hart, R. G., (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, 9(2), 101-113.

Deng, J.Q., Yang, Q., Liu, Y.R. ve Pan, Y.W., (2015). Stability evaluation and failure analysis of rock salt gas storage caverns based on deformation reinforcement theory. *Computer and Geotechnics*, 68, 147-160.

Dzik, E.J. ve Lajtai, E.Z., (1996). Primary fracture propagation from circular cavities loaded in compression. *International Journal of Fracture*, 79, 49-64.

Dzik, E.J., (1996). Numerical modeling of progressive fracture in the compressional loading of cylindrical cavities. *PhD thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Canada.*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Eberhardt, E., Stimpson, B. ve Stead, D., (1999). Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2), 81-99.

Ercan, T. ve Öztunalı, Ö., (1982). Kula volkanizmasının özellikleri ve içerdiği "Base Surge" tabaka şekilleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Sayı 25, Sayfa 117-125.

Ergüler, Z. A., Zengin, E. ve Öngen, A. S., (2015). Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeoteknik Özellikleri, *Kureyşler Barajı Kurtarma Kazıları 2014*, 11-35.

Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T. ve Labuz, J.F., (2002). Simulation of failure around a circular opening in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 507-515.

Feustel A. J., (1995). Seismic attenuation in underground mines: measurement techniques and applications to site characterization. *Ph.D. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada*.

Gerçek, H., (2007). Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 1-13.

Griffith, A. A., (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 221, 163-197.

Griffith, A. A., (1924). Theory of rupture. *Proceeding of the First International Congress for Applied Mechanics*, Pages 55-63.

Hart, R., Cundall, P. A. ve Lemos, J., (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II: Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3), 117-125.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hatzor, H.Y. ve Palchik, V., (1997). The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flaw length in dolomites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(5), 805-816.

Hazzard J. F., Young R. P. ve Maxwell S.C., (2000). Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*, 105(B7), 16,683-16,697.

Hazzard J. F. ve Young R. P, (2000). Simulating acoustic emissions in bonded particle models of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 37, 867-872.

Hoek, E. ve Brown, E.T., (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 106(GT9), 1013-1035.

Hoek, E. ve Bieniawski, Z.T., (1965). Brittle rock fracture propagation in rock under compression. *International Journal of Fracture Mechanics*, (1)3, 137-155.

Hoek, E., (1964). Fracture of anisotropic rock. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 64, 501-518.

Hoek, E., (1968). Brittle fracture of rock. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, 99-124.

Hoek, E., (2007). Practical rock engineering, *Yellow River Conservancy Press*, Pages 347.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T. ve Corkum, B., (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC)*, University of Toronto, 267-273.

Inglis, C.E., (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Spring Meeting of the Fifty-fourth Session of the Institution of Naval Architects*.

Itasca Consulting Group Inc., (1999). PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions), Version 2.0. Minneapolis.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

ISRM, (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J. A. Hudson (eds.), *Suggested Methods Prepared by the Comission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics*, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, Pages 628.

Itasca Consulting Group Inc., (2011). UDEC (Universal Distinct Element Code), Version 5.0. Minneapolis.

Karakuş, H., Özkul, C., Ergüler, Z.A., Kibici, Y. ve Yanık, G., (2017). Monte Carlo benzetimi ile Simav sahasının jeotermal kaynak potansiyelinin tahmini. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 322-329.

Konak, N., (1982). Simav dolayının jeolojisi ve metamorfik kayaların evrimi. *İstanbul Yerbilimleri*, 3(1-2), 313-327.

Krumbein, W. ve Sloss, L. (1963). Stratigraphy and sedimentation. *W.H. Freeman and Company*, San Francisco, United States of America, Pages 660.

Martini C. D., Read R. S. ve Martino, J. B., (1997). Observations of brittle failure around a circular test tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(7), 1065-1073.

Oyan, V., (2011). Etrüks volkanı ve çevresinin (Van Gölü Kuzeyi) volkanostratigrafisi, petrolojisi ve magmatik Evrimi. *Doktora Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van.

Özburan, M., (2009). Kütahya ve Çevresinin Neotektonik İncelemesi, *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

Palchik, V. ve Hatzor, Y. H., (2002). Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestones. *Engineering Geology*, 63, 233-245.

Palchik, V., (1999). Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(4), 303-309.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Palchik, V., (2006). Application of Mohr-Coulomb failure theory to very porous sandy shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 1153-1162.

Park, C. H. and Bobet, A., (2009). Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: A comparison. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 819-829.

Potyondy, D. (2012a). PFC2D Flat-Joint contact model. *Itasca Consulting Group*, Incorporated, Minneapolis, MN, Technical Memorandum ICG7138-L.

Potyondy, D. O., (2012b). A Flat-Jointed Bonded-Particle material for hard rock. *Proceedings of 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Chicago, United States of America.

Potyondy, D., (2013). PFC3D Flat-Joint contact model (version 1). *Itasca Consulting Group*, Incorporated, Minneapolis, MN, Technical Memorandum ICG7234-L.

Potyondy, D. O., (2015). The Bonded-Particle model as a tool for rock mechanics research and application: Current trends and future directions. *Geosystem Engineering*, 18(1), 1-28.

Potyondy, D. O. ve Cundall, P. A., (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 1329-1364.

Sagong, M. and Bobet, A., (2002). Coalescence of multiple flaws in a rock model material in uniaxial compression. *International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 229-241.

Schöpfer, M. P. J., Abe, S., Childs, C. ve Walsh J. J., (2009). The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 250-261.

Shen, B., (1995). The mechanism of fracture coalescence in compression experimental study and numerical simulation, *Engineering Fracture Mechanics*, 51(1), 73-85.

Tang, C.A. ve Kou, S.Q., (1998). Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 61, 311-324.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Tang, C.A., Tham, L.G., Wang, S.H., Liu, H. ve Li, W.H., (2007). A numerical study of the influence of heterogeneity on the strength characterization of rock under uniaxial tension. *Mechanics of Materials*, 39, 326-339.

TSE, (1978). Doğal yapı taşlarının muayene ve deney metodları. *Türk Standartları Enstitüsü*.

Turichshev, A. ve Hadjigeorgiou, J., (2016). Triaxial compression experiments on intact veined andesite. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 86, 179-193.

Wang, S. Y., Sloan, S. W., Sheng D. C. ve Tang C. A., (2012). Numerical analysis of the failure process around a circular opening in rock. *Computers and Geotechnics*, 39, 8-16.

Wang, S. Y., Sloan, S. W., Sheng, D. C., Yang, S. Q. ve Tang, C. A., (2014). Numerical study of failure behavior of pre-cracked rock specimens under conventional triaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 51, 1132-1148.

Wang, S. Y., Sun, L., Yang, C., Yang, S. Q. ve Tang C. A., (2013). Numerical study on static and dynamic fracture evolution around rock cavities. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 262-276.

Yang, S., Huang, Y., Jing, H. ve Liu, X., (2014). Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression. *Engineering Geology*, 178, 28-48.

Yang, S. Q., Xu, T., He, L., Jing, H. W., Wen, S. ve Yu, Q. L., (2015). Numerical study on failure behaviour of brittle rock specimen containing pre-existing combined flaws under different confining pressure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15, 1085-197.

Yang, X. L. ve Huang, F., (2013). Three-dimensional failure mechanism of a rectangular cavity in a Hoek–Brown rock medium. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 189-195.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhao, X., Zhang, H. ve Zhu, W., (2014). Fracture evolution around pre-existing cylindrical cavities in brittle rocks under uniaxial compression. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 806-815.

Zhong, Z., Deng, R., Lv, L., Fu, X. ve Yu, J., (2018). Fracture mechanics of naturally cracked rock around an inverted U-shaped opening in a biaxial compression test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 242-253.

Zhou, X-P. ve Bi, J., (2016). 3D numerical study on the growth and coalescence of pre-existing flaws in rocklike materials subjected to uniaxial compression. *International Journal of Geomechanics*, 16(4), 1-21.

Zhu, J. B, Zhou, T., Liao, Z. Y., Sun, L., Li, X. B. ve Chen, R., (2018). Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106, 198-212.

Zhu, Y., (2017). A micromechanics-based damage constitutive model of porous rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 91, 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Zengin, Enes
Doğum tarihi ve yeri : 27.09.1986 & Malatya
E-posta : enes.zengin@dpu.edu.tr, eneszengin@gmail.com

Eğitim

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı	2019 (Haziran)
Yüksek Lisans	Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalı	2013 (Ocak)
Lisans	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği	
Lise	Tuzla Süper Lisesi (YDA)	2004 (Haziran)

İş Deneyimi

Yıl	Kurum	Görev
2010 - (Devam)	: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

Tarih	Sınav	Puan
09.07.2017	Yükseköğretim Kurumları Yabancı Dil Sınavı	75

A. Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Celik, I., **Zengin, E.** and Sensogut, C., 2018. Modeling and Production of Solid Model of South Panel, Tuncbilek Open Pit by 3D Printer, International Journal of Economic and Environment Geology, Vol. 9 (1)44-49.
2. Erguler, Z. A., **Zengin, E.** and Kalyoncu Erguler, G., 2016. Time-dependent physicommechanical behavior of ballasts used for railway between Sabuncupinar and Kütahya in Western Turkey, Environmental Earth Sciences, Volume 75, Page: 918.

B. Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Özok, İ. H., **Zengin, E.**, Karakuş, H. ve Erguler, Z. A., 2018. Hidrolik İletkenlik ile İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı 40, Sayfa 1-6.
2. Derman, M., Adıgüzel, Ö., **Zengin, E.** ve Erguler, Z. A., 2015. Sabuncupınar-Kütahya Arasındaki Demiryolların Balast Malzemesi Olarak Kullanılan Volkanik Kayacın Fiziksel, Mineralojik ve Aşınma Özellikleri Üzerinde Bozunma Süreçlerinin Etkisi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı, Sayfa 183-188.

C. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

1. Kibici, Y., **Zengin, E.**, Yanık, G., Özkul, C., Karakuş, H., Demirbilek, M., Aksoy, İ. ve Acar, R. U., 2017. Emet (Kütahya) Yöresindeki Travertenlerin Fiziko-Mekanik Özellikleri ve Petrografik Özellikleri ile Karşılaştırılması. Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve Sergisi, Antalya (Türkiye).
2. Kibici, Y., Demirbilek, M., Yanık, G., Özkul, C., Karakuş, H., Aksoy, İ., **Zengin, E.** ve Acar, R. U., 2017. Yeniceköy, Sefaköy, Uyuzhamamı ve Hamamköy (Emet-Hisarcık/Kütahya-Türkiye) Yöresindeki Travertenlerin Mineralojik ve Petrografik Özellikleri. Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve Sergisi, Antalya (Türkiye).
3. Kibici, Y., Özkul, C., Yanık, G., Demirbilek, M., Karakuş, H., Aksoy, İ. ve **Zengin, E.**, 2017. Emet-Hisarcık (Kütahya-Türkiye) Grabenindeki Travertenlerin

Jeokimyasal Özellikleri, Çukurova Üniversitesi 40. Yıl Jeoloji Sempozyumu, Adana (Türkiye).

4. Celik, I, **Zengin, E.** and Sensogut, C., 2017. Modelling and Production of Solid Model of South Panel, Tunçbilek Open Pit by 3D Printer. International Conference on Mining and Fuel Industries 2017, Karachi (Pakistan).
5. **Zengin, E.**, Ergüler Z. A. and Karakuş, H., 2017. Hydraulic Conductivity Prediction of Fine-Grained Soils based on Grain Size Index (Oral Presentation). European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna (Austria).
6. **Zengin, E.** and Ergüler Z. A., 2017. The Usability of Rock-Like Materials for Numerical Studies on Rocks (Oral Presentation). European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria.
7. **Zengin, E.** and Ergüler Z. A., 2017. Comparison of Crack Initiation, Propagation and Coalescence Behavior of Concrete and Rock Materials (Poster Presentation). European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna (Austria).
8. **Zengin, E.**, Erguler, Z. A. and Karakus, H. The Comparison of Predicted and Measured Hydraulic Conductivities of Soils having Different Physical Properties (Poster Presentation). European Geosciences Union 2015, Vienna (Austria).
9. **Zengin, E.** and Erguler, Z. A., 2014. Assessment of Liquefaction Susceptibility of Kutahya Soils Based on Recent Earthquakes in Turkey (Oral Presentation). European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, Austria.
10. **Zengin, E.**, Erguler, Z. A., Ozburan, M. and Karakus, H. Earthquake Hazard and Risk Assessment of Kutahya Settlement Area Founded on the Kutahya Fault Zone (KFZ) (Oral Presentation). 9th Alexander von Humboldt Conference 2014, Istanbul (Turkey).

D. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

1. **Zengin, E.**, Ergüler, Z. A. ve Karakuş, H. Hidrolik İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesine Yönelik Önerilen Görgül Eşitliklere Genel Bakış ve Uygulanabilirliklerinin Araştırılması, Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu, 7-11 Eylül 2015, Van (Türkiye).

2. **Zengin, E.** ve Ergüler, Z. A., 2012. Kütahya Zeminlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, 65. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 2-6 Nisan 2012, Ankara, Türkiye.
3. Özkul, C. ve **Zengin, E.**, 2012. Kütahya Yerleşim Alanı Ağır Metal Derişiminin Belirlenmesi. 5. Jeokimya Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, Denizli (Türkiye).

E. Kitap Bölümleri

1. Ergüler, Z. A., **Zengin, E.** ve Öngen, A. S., 2015. Kureysler Barajı Kurtarma Kazıları 2014, Bölüm adı: (Höyüktepe ve Attepe Arkeolojik Yerleşim Alanlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeoteknik Özellikleri). Bilgin Kültür Yayıncılık, Editör: Türktüzün, M., Ünan, S., Basım sayısı:1, ISBN:978-605-65601-7-0, Türkçe(Bilimsel Kitap), (Yayın No: 1938609)

F. Yurtdışı Araştırma

1. Doktora sırası araştırma (09.2017-04.2018); Supervisor: Dr. David Healy, School of Geosciences King's College University of Aberdeen Aberdeen AB24 3UE United Kingdom

G. Tez

1. **Zengin, E.**, 2013. Kütahya Yerleşim Alanı Zeminlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.