



Kayalarda Mikro Çatlaklanma Sürecine Bağlı Deformasyon Evriminin Sayısal Analizi

Numerical Analysis of Rock Deformation Evolution Regarding Microcracking Process

ÖZGE DİNÇ GÖĞÜŞ^{1*}, ELİF AVŞAR², KAYHAN DEVELİ¹, AYTEN ÇALIK³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Geliş (received): 24 Kasım (November) 2022 Kabul (accepted): 13 Şubat (February) 2023

ÖZ

Gerilmeye maruz kalan bir kayanın yenilme ve deformasyon karakteri mikro ölçekteki çatlaklanma sürecine bağlıdır. Bu sürecin nasıl evrildiğinin anlaşılması konusunda farklı laboratuvar ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada söz konusu yöntemlere bir alternatif olarak mikro çatlaklanma sürecinin sayısal modelleme tekniği ile tespit edilebilirliği araştırılmıştır. İgnimbirit, mermer ve diyabaz olmak üzere üç farklı kaya türü üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen makro mekanik parametreler, ayrık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı sayısal kaya modellerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde model tahminleri ile laboratuvar verilerinin uyumlu olduğu belirlenmiş ve bu durum sayısal çatlaklanma analizlerinin kaya ortamını temsil edecek şekilde yürütülebileceğini göstermiştir. Laboratuvar deneylerinin simülasyonlarında, sıkışma gerilmesi altındaki model örneklerde mikro çatlaklanmanın başladığı (σ_{ci}) ve ilerleyerek biriktiği (σ_{cd}) kritik eşik gerilme seviyeleri tespit edilmiştir. Bu gerilme seviyeleri sırasıyla ignimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyabaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olarak belirlenmiştir. Tüm kaya modellerinde mikro çatlaklanma çekme mekanizması tarafından kontrol edilirken her üç kaya türü de gevrek bir davranış sergilemektedir. Elde edilen tüm veriler, kayalardaki mikro çatlaklanma sürecinin araştırılmasında DEM tabanlı sayısal modelleme tekniğinin diğer yöntemlere alternatif olarak güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Deformasyonu, Kritik Gerilme Eşik Değeri, Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), Mikro Çatlaklanma

ABSTRACT

The failure and deformation characteristics of rock under stress are controlled by microcracking process. There are various laboratory and analytical methods for understanding the evolution of this phenomenon. In this study, the applicability of the numerical modeling technique for detecting the microcracking process is investigated as an alternative method among the other techniques. Macro mechanical parameters derived from the laboratory tests, performed on three different rock types such as ignimbrite, marble, and diabase are used in the calibration of the numerical rock models which are generated based on the discrete element

method (DEM). According to the results, model predictions and laboratory measurements are in good agreement that verifying cracking analysis can be performed as being representative of the rock domain in the numerical platform. During the simulations of laboratory tests, the initiation (σ_{ci}) and propagation (σ_{cd}) stress thresholds of microcracking are determined in the model samples under compressive loading. These stress levels are $\sigma_{ci} = 25$ MPa and $\sigma_{cd} = 37$ MPa for ignimbrite, $\sigma_{ci} = 21$ MPa and $\sigma_{cd} = 30$ MPa for marble, and $\sigma_{ci} = 38$ MPa and $\sigma_{cd} = 55$ MPa for diabase, respectively. Microcracking in all rock models is controlled by extensional mechanisms, and all rock types present brittle behavior. Overall, our insights show that the numerical modeling technique based on DEM can be used reliably as an alternative methodology to the other techniques for the investigation of the microcracking process in rocks.

Keywords: Rock Deformation, Critical Stress Threshold, Discrete Element Method (DEM), Microcracking

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1209614>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: dincgogus@itu.edu.tr

GİRİŞ

Kayalar gerilmeye maruz kaldıklarında deformasyona uğramakta ve yüklemeler devam ettikçe bu deformasyonun miktarı zamanla artmaktadır. Bu sürecin evrimi ise öncelikle kayanın iç yapısında oluşan mikro çatlaklarla başlamaktadır (Dyskin and Germanovich, 1993; Holcomb vd., 2007; Nicksiar ve Martin, 2012). Gerilmeyle tetiklenen çatlakların zamanla büyümesi, ilerlemesi veya kayanın içinde belirli kısımlarda birikmesi, o kayanın nihayetinde yenilmesiyle ve dolayısıyla makro ölçekte kırıkların oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Mikro çatlaklanma sürecinin araştırılması, ilk olarak Griffith (1921) ile başlamış ve ilerleyen yıllarda çok sayıda çalışmaya konu olmuştur (örn. Brace, 1964; Bieniawski, 1967; Peng ve Johnson, 1972; Germanovich vd., 1994; Martin ve Chandler, 1994; Eberhardt vd., 1998; Diederichs, 2007; Nicksiar ve Martin, 2012; Moradian vd., 2015; Yang vd., 2019; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022). Araştırmacılar söz konusu sürecin bir kayanın yenilme ve deformasyon karakteri üzerinde önemli bir rol oynadığını belirterek mühendislik operasyonlarının etkili bir şekilde yürütülmesi için kapsamlı bulgular sunmuşlardır.

Bilindiği gibi kayalardaki çatlaklanmanın yüklemenin hangi aşamasında başladığı ve kritik yoğunluğa ulaştığının belirlenmesi için laboratuvarında akustik emisyon (AE) ölçümleri yapılmaktadır (Lockner vd., 1991; Lei vd., 2000; Zang vd., 2000; Baud vd., 2004; Lei, 2006; Zhao vd., 2013; Cheng vd., 2021). Ancak bu yöntem yüksek dayanımlı kayalarda çok fazla gürültü oluşturduğundan veya özellikle heterojen kayalarda düşük çözünürlükten dolayı doğru gerilme seviyelerinin belirlenmesinde kısıtlamalar yaratmaktadır (Locker vd., 1991; Schubnel vd., 2007). Bu nedenle giderek yaygınlaşan X-Ray tomografi ve dijital görüntü korelasyonu tekniğinin laboratuvar deneylerine entegre edilmesi söz konusu kısıtlamaların önemli ölçüde giderilmesini sağlamıştır. Yüksek çözünürlük özelliği artan eksenel gerilmeyle çatlaklanmanın ilerleyişinin detaylı olarak izlenebilmesine olanak tanımıştır (Besuelle vd., 2000; Louis vd., 2007; Zhang vd., 2013; Desrues ve Andò, 2015; Ji vd., 2015; Renard vd., 2017; Zhu vd., 2018; Shirole vd., 2020). Diğer taraftan bu tekniğin laboratuvarlarda kolaylıkla ve uygun maliyetle tedarik edilmesi ise çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Son yıllarda literatürde yaygın olarak yer bulan ve laboratuvar deneylerini destekleyici veya kimi zaman bu deneylere alternatif olarak kullanılan sayısal modelleme yöntemleri mikro çatlaklanmayla ilgili araştırmaların yürütülmesinde kullanılmaktadır. Kayaların süreksiz bir ortam olması sebebiyle bu yöntemlerden ayrık elemanlar metoduna (DEM) dayalı modelleme teknikleri sıklıkla çalışılmakta, çatlaklanmaya bağlı deformasyon/hasar miktarının ölçülmesinde ayrıntılı veriler sunmaktadır. Özellikle sıkışma rejimi altında bir kayanın yenilme öncesindeki birim deformasyon birikmesinin yenilme sonrasında açığa çıkan makaslama bantlarına (kırıklara) dönüştüğü sürecin izlenebilmesi, kayaların yenilme ve hasar süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına da ışık tutmaktadır (Wang vd., 2008; Shimizu vd., 2010; Dinç ve Scholtès, 2018; Wu vd., 2018; Zhang vd., 2019; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022).

Bu çalışmanın amacı farklı kaya türlerinde gerilme-deformasyon davranışları incelenerek, mikro çatlaklanmanın kaya içinde ilk kez oluşmaya başladığı (σ_{ci}) ve ilerleyerek biriktiği (σ_{cd}) kritik gerilme seviyelerinin DEM sayısal yöntemiyle belirlenmesidir. Bu amaçla üç farklı kaya türünün makro mekanik parametreleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Bu parametreler daha sonra üç boyutlu (3D) Yade açık kaynaklı DEM kodu (Šmilauer vd., 2015) kullanılarak oluşturulmuş sayısal modellerin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Model verileri laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılmış ve her kaya türü için çatlaklanma eşik gerilme seviyeleri (σ_{ci} ve σ_{cd}) sayısal çözümlerle belirlenmiştir. Üç kaya türünün de dayanım, deformasyon özellikleri ve yenilme mekanizmaları tespit edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında kırık/çatlak içermeyen ve olabildiğince homojen bir iç yapıya sahip

diyabaz (Kayseri), mermer (Mudurnu) ve ignimbirit (Afyon) olmak üzere üç farklı kaya türü kullanılmıştır. Örneklerin öncelikle laboratuvarda jeomekanik özellikleri belirlenmiş ve belirlenen bu parametreler kullanılarak sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Aşağıda kullanılan yöntemler ve elde edilen bulgular alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

Laboratuvar Çalışmaları

Kübik bloklar halinde temin edilen üç kaya türünden ASTM (2000) standartlarına ($2 \leq L/D \leq 2.5$, L: boy ve D: çap) göre karot ve ISRM (2007) standartlarına uygun olarak (t/D : 0.5-1.0, t: kalınlık ve D: çap) disk şeklinde örnekler hazırlanmıştır (Şekil 1). Hazırlanan örnekler kaya mekaniği laboratuvarında tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ve Brazilian dolaylı çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Bilindiği gibi Brazilian deneylerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı değerleri kayaların gerçek (doğrudan) çekme dayanımından (UTS) daha yüksek çıksa da (Gorski et al. 2007; Perras and Diederichs 2014; Briševac et al. 2015; Jensen 2016), örnek hazırlamadaki pratikliği ve sınır koşullarıyla ilgili sorunların kolaylıkla çözümlenebilmesi açısından laboratuvarlarda çoğunlukla bu tür dolaylı çekme dayanımı yöntemleri kullanılmaktadır. Çünkü doğrudan çekme dayanımı deneyinde, iki ucundan metal çenelere bağlı olan kayada, çekme gerilmesiyle tetiklenen bir çatlak oluşturmak hem zaman alıcı olup hem de çenelerle kayanın bağlantı kısımlarında oluşan yenilmelerin minimize edilmesi son derece zordur. Ancak DEM sayısal modelleme platformlarında her türlü laboratuvar koşulunun simülasyonunun gerçekleştirilmesinden ötürü, model kalibrasyonlarında UTS değeri doğrudan çekme dayanımı deneyinin simülasyonundan belirlenmiş ve sayısal modellerin tamamı

Brazilian deneyinden elde edilen dayanım değeri, UTS değerine eşit olacak şekilde kalibre edilmiştir. Simülasyonların ayrıntıları "Model Kalibrasyonu" başlığı altında verilmektedir. Yukarıda bahsi geçen tüm laboratuvar deneylerinden her kaya türüne ait 4 temel mekanik parametre olan tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), çekme dayanımı (UTS), Young (Elastisite) Modülü (E) ve Poisson oranı (ν) belirlenmiş ve kayaların yenilme zarfları elde edilmiştir.



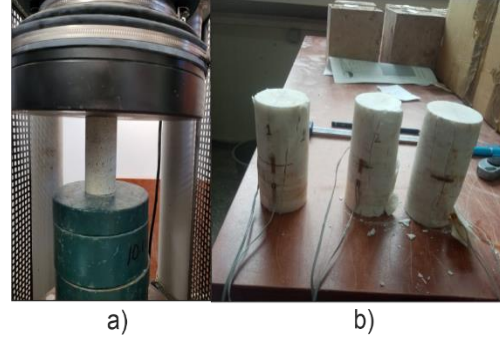
Şekil 1. Blok kayalar ve bunlardan hazırlanan karot ve disk şeklindeki örnekler (a) mermer (b) diyabaz (c) ignimbirit.

Figure 1. Block samples and core and disk shape specimens extracted from these blocks (a) marble (b) diorite (c) ignimbrite.

Kayaların UCS ve E parametrelerinin belirlenmesi için diyabaz ve mermerden 12'şer, ignimbiritlerden 11 adet karot örneği 100 ton yükleme kapasiteli ve deformasyon kontrollü hidrolik preste deneye tabi tutulmuştur (Şekil 2a). Poisson oranını belirlemek için her bir kaya türünden 3'er adet ayrıca karot ayrılmış ve toplam 9 set sıkışma dayanımı deneyi bu parametre için özel olarak uygulanmıştır (Şekil 2b).

Ön analiz testlerindeki sonuçlara bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde, diyabaz 0.005 mm/s, ignimbirit 0.004 mm/s ve mermer örnekleri ise 0.003 mm/s' lik deformasyon hızlarında yüklenmiştir. 1D9,

1D12; 1I3, 1I11; 1M11 nolu örneklerde ise hatalı veri elde edildiği görüldüğünden değerlendirmeye alınmamıştır (Tablo 1).



Şekil 2. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri (a) yükleme presine yerleştirilmiş kaya örneği ve (b) Poisson oranlarının (ν) belirlenmesinde kullanılan ve örnek yüzeylerine yapıştırılmış bulunan yanıl ve düşey deformasyon ölçerlerden görünüm.

Figure 2. Uniaxial compressive strength tests (a) rock sample under loading frame (b) views from the strain gauges attached to sample surfaces along the lateral and vertical axes for determining the Poisson's ratio (ν).

Deney sonuçlarına göre diyabaz, ignimbirit ve mermer örneklerinin mekanik özellikleri $UCS_{diyabaz} = 72.57$ MPa, $E_{diyabaz} = 10.88$ GPa, $\nu_{diyabaz} = 0.25$; $UCS_{ignimbirit} = 54.41$ MPa, $E_{ignimbirit} = 7.23$ GPa, $\nu_{ignimbirit} = 0.15$; $UCS_{mermer} = 41.46$ MPa, $E_{mermer} = 8.32$ GPa, $\nu_{mermer} = 0.14$ olarak belirlenmiş ve ayrıntılar Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Her örneğe ait gerilme-deformasyon eğrisi ise Şekil 3'de verilmiş olup, E parametresi bu eğrilerin doğrusal elastik davranış gösterdiği kısımlar ve doruk dayanım değerlerine (UCS) göre teğetsel modül dikkate alınarak hesaplanmıştır (Şekil 4).

Tablo 1. Tek eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen her kaya türüne ait UCS ve E parametreleri.**Table 1.** UCS and E values obtained from the uniaxial compressive strength tests on each rock type.

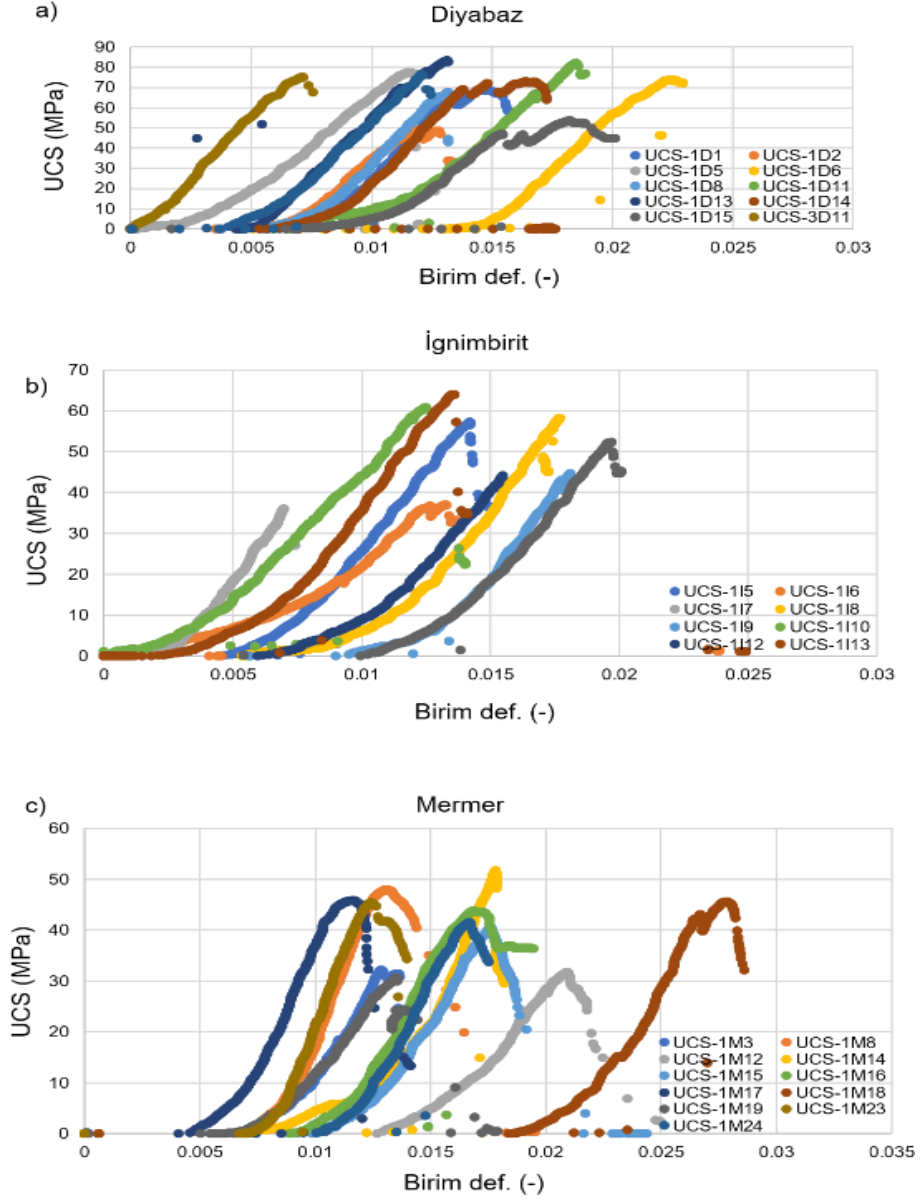
	No	UCS	E	No	UCS	E	No	UCS	E
1	1D1	69.12	12.5	115	57.18	7.5	1M3	32.09	6.7
2	1D2	48.65	10.5	116	36.92	4.2	1M8	47.94	10.0
3	1D5	77.11	8.0	117	36.03	8.7	1M12	31.70	5.0
4	1D6	73.95	12.0	118	58.09	7.5	1M14	51.29	10.8
5	1D8	67.63	11.7	119	44.77	8.9	1M15	40.46	7.0
6	1D11	82.09	10.0	1110	60.35	6.7	1M16	43.78	7.5
7	1D13	82.65	11.0	1112	44.11	6.0	1M17	45.79	9.0
8	1D14	73.00	10.0	1113	64.05	8.0	1M18	45.50	10.0
9	3D11	75.09	13.3	1114	52.31	6.0	1M19	30.73	7.5
10	3D12	76.37	9.8	*113	-	-	1M23	45.39	10.0
11	*1D9	-	-	*1111	-	-	1M24	41.46	8.0
12	*1D12	-	-				*1M11	-	-
Ort		72.57	10.88		54.41	7.23		41.46	8.32
Std (±)		9.68	1.46		7.67	1.07		7.03	1.79

*Hatalı veri kaydı.

Tablo 2. Tek eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen her kaya türüne ait ν parametreleri.**Table 2.** ν parameter of each rock obtained from the uniaxial compressive strength tests.

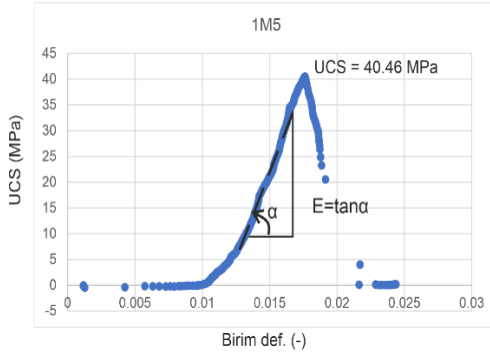
Örnek No	Diyabaz	İgnimbirit	Mermer
1	*	0.20	0.13
2	0.24	0.14	0.19
3	0.27	0.10	0.11
Ort	0.25	0.15	0.14

*Örnek ortalama UCS değerinin 2 katı gerilim seviyesinde yenilmiş ve yanıl deformasyona ait veride hata oluşmuştur.



Şekil 3. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen gerilme- birim deformasyon eğrileri (a) diyabaz (b) ignimbirit (c) mermer.

Figure 3. Stress-strain curves obtained from uniaxial compressive strength tests (a) diabase (b) ignimbrite (c) marble.



Şekil 4. E (teğetsel modülü) parametresinin hesaplanması.

Figure 4. Calculation of the E (tangential modulus) parameter.

Üç eksenli sıkışma deneyleri kayalara ait Hoek-Brown yenilme zarflarının (Hoek et al. 2002) belirlenmesi için yapılmıştır (Şekil 5). Her kaya türü için 2, 5 ve 8 MPa yanal basınç (σ_3) altında

3'er setten toplam 9 adet karot örnek, 200 ton yükleme kapasiteli preste ve 420 bar'a kadar yanal basınç uygulayabilen Hoek hücresi kullanılarak deneye tabi tutulmuş ve yenilme anındaki doruk dayanım değeri olan σ_1 seviyeleri belirlenmiştir (Tablo 3). Elde edilen veri çiftleri kullanılarak Eş. 1 ve 2'den örneklerin Hoek- Brown m parametreleri belirlenmiş ve yenilme zarfları (Hoek et al. 2002) çizilmiştir (Şekil 6).

$$\sigma_1 = (\sigma_3 + m\sigma_c\sigma_c + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad (1)$$

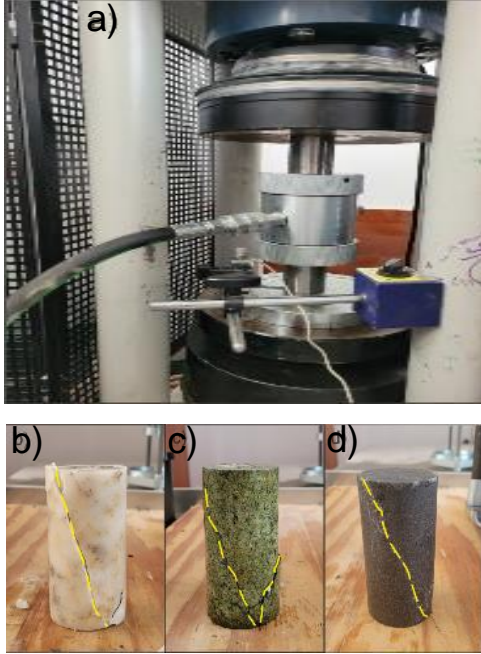
$$y = m\sigma_c x + s\sigma_c^2 \quad (2)$$

Burada, $\sigma_c = \text{UCS}$, $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ ve $x = \sigma_3$ olup, m ve s boyutsuz malzeme sabitidir ve kaya malzemelerinde $s=1$ 'dir. Regresyon analizinden x-y veri çiftiyle elde edilen doğrunun eğiminin, UCS'ye olan oranı m parametre değerlerini vermektedir (Şekil 7). Bu ilişkiden $m_{\text{diyabaz}} = 26.8$, $m_{\text{mermer}} = 17.6$, $m_{\text{İgnimbirit}} = 15.8$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Table 3. The results obtained from triaxial compressive strength tests.

Diyabaz			İgnimbirit			Mermer		
No	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	No	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	No	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
3D1	2	107.75	3I1	2	71.3	3M1	2	54.82
3D2	5	124.92	3I2	5	93.04	3M2	5	83.23
3D3	8	156.76	3I3	8	79.48	3M12	8	94.58
3D4	2	129.85	3I4	2	104.33	3M4	2	64.69
3D5	5	174.73	3I5	5	84.27	3M5	5	77.44
3D6	8	188.3	3I6	8	108.14	3M6	8	85.42
3D7	2	132.83	3I7	2	79.62	3M7	2	64.2
3D8	5	157.81	3I8	5	90.82	3M8	5	79.23
3D9	8	186.8	3I9	8	109	3M9	8	92.16

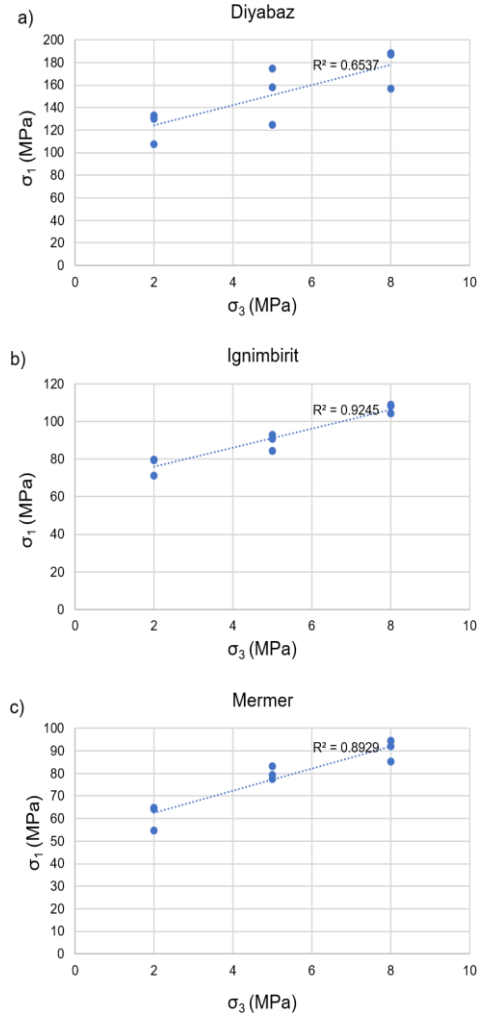


Şekil 5. Üç eksenli sıkışma deneyi düzeneği ve deney sonunda örneklerde oluşan makro çatlaklar a) Hoek hücresi içine yerleştirilmiş bir örneğin yükleme ünitesindeki görünümü b) yenilmiş mermer c) ignimbirit ve d) diyabaz.

Figure 5. Triaxial compressive strength test configuration and macro cracks developed in the samples after the testing (a) a view from the sample in the Hoek cell under loading frame b) fractured marble (c) ignimbrite (d) diabase.

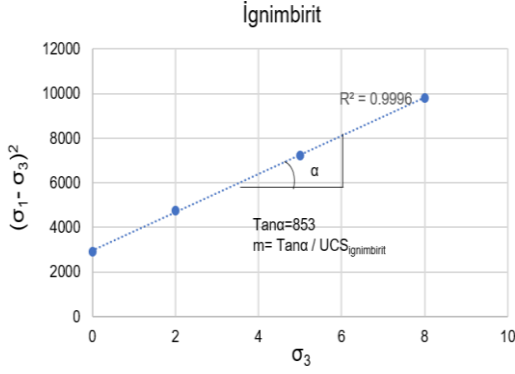
Yukarıda da bahsedildiği gibi Brazilian çekme deneyleriyle belirlenen çekme dayanımı değerleri bu çalışmada tek eksenli çekme dayanımı (UTS) olarak kabul edilmiştir. Örneklerin UTS değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Yenilme anında kaydedilen en büyük yük değeri F (kN) olmak üzere $UTS=0.636 \cdot F / (t \cdot D)$ eşitliğinden hesaplanmaktadır. Deneylerde kalınlık/çap oranı (t/D) 0.5-1.0 olan disk şeklinde örnekler kullanılmış ve bu örneklerle ortalama 25-30 sn

arasında yenilecek şekilde yüklemeler yapılmıştır (Şekil 8). Her kaya türünden 10'ar adet olmak üzere mermer, ignimbirit ve diyabaz örneklerinin ortalama UTS değerleri sırasıyla 4.85 MPa, 6.67 ve 9.14 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4).



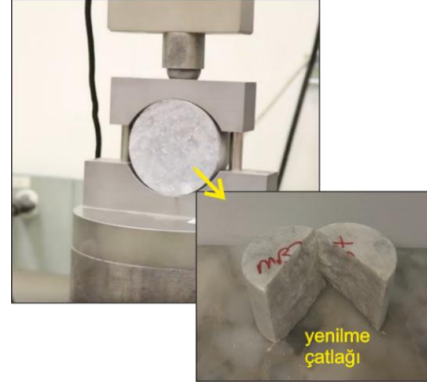
Şekil 6. (a) Diyabaz, (b) ignimbirit ve (c) mermer örneklerine ait Hoek-Brown yenilme zarfları (Yanal basınçlar $\sigma_3= 2, 5$ ve 8 MPa).

Figure 6. Hoek-Brown failure envelopes (confining stresses $\sigma_3 = 2, 5, \text{ and } 8$ MPa) of (a) diabase (b) marble (c) ignimbrite.



Şekil 7. Hoek-Brown m parametresinin hesaplanmasında kullanılan regresyon grafiğinden bir örnek.

Figure 7. An example from the regression curve used in the calculation of the Hoek-Brown m parameter.



Şekil 8. Brazilian deneyine tabi tutulmuş bir örnekten görünüm.

Figure 8. A view from the sample subjected to the Brazilian test.

Tablo 4. Brazilian çekme deneylerinden elde edilen her kaya türüne ait UTS değerleri.

Table 4. The UTS values of each rock type obtained from Brazilian tensile strength.

Örnek No	UTS (MPa)	Örnek No	UTS (MPa)	Örnek No	UTS (MPa)
BM1	4.97	BD2	11.79	Bİ1	7.60
BM2	5.66	BD3	10.03	Bİ2	6.26
BM3	4.36	B1	9.37	Bİ3	5.81
MB1	4.30	B2	8.77	İB1	7.42
MB2	5.24	B3	8.05	İB2	6.13
MB3	4.92	B4	8.24	İB3	7.50
MB4	4.97	B5	9.80	İB4	5.33
MB5	5.19	B6	9.40	İB5	6.21
MB6	4.41	B8	7.61	İB6	6.89
MB7	4.49	B9	8.39	İB7	7.55
Ort	4.85		9.14		6.67
Std (±)	0.43		1.15		0.78

Üç Boyutlu Sayısal Modelleme

Her kaya türünün makro mekanik davranışını temsil edecek sayısal modeller oluşturmak ve oluşturulan bu modellerde mikro çatlakların oluşmaya başladığı (σ_{ci}) ve birleşerek ilerlediği (σ_{cd}) eşik gerilme değerlerini belirlemek için toplamda 149 adet tek eksenli ve üç eksenli sıkışma ile çekme dayanımı deneyi simülasyonu laboratuvarındaki gerilme koşullarıyla aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kaya örneklerinin mekanik davranışını belirleyebilmek için 3 boyutlu Yade açık kaynaklı DEM platformu (Šmilauer vd., 2015) kullanılmıştır. İlk kez Potyondy ve Cundall (2004) tarafından önerilen ve daha sonra Scholtès ve Donzé (2013) tarafından modifiye edilmiş bağlı partikül modeli (BPM) bu platforma uygulanmıştır. Söz konusu sayısal ortamda bir kaya malzemesi birbirinden ayrık, rijit ve küresel tanelerin/partiküllerin dağılımıyla oluşmaktadır (Şekil 9). Oluşturulan kaya modelinde partiküller bir etkileşim oranı (γ_{int}) ve "temas kanuna (constitutive contact law)" göre bir aradadırlar;

$$D_{eq} = \gamma_{int} * (R_a + R_b) \quad (3)$$

Burada; D_{eq} : iki partikül arasındaki ilksel uzaklık ve $\gamma_{int} \geq 1$ olmak üzere, R_a ve R_b : a ve b partiküllerinin yarıçapını göstermektedir. Tanelerin birbiriyle olan kenetlenme derecesi simülasyonun başlangıcında belirlenir. Her bir partikül başına düşen ortalama bağ sayısı (N) bu kenetlenme derecesine göre atanır. γ_{int} değeri ne kadar 1'e yaklaşırsa, malzeme o kadar az kenetlenmiş demektir ve bu durum onun zayıf bir kaya kütesini temsil ettiğini göstermektedir. Partiküller arasındaki etkileşim kuvvetleri, normal kuvvet (F_n) ve makaslama kuvveti (F_s) olarak ikiye ayrılmaktadır. Normal doğrultuda F_n ;

$$F_n = k_n * u_n \quad (4)$$

$$k_n = 2Y[(R_a * R_b)/(R_a + R_b)] \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada k_n , eşdeğer elastik modülün (Y) bir fonksiyonu olan normal rijitlik değeridir ve u_n ise normal rölatif yer değiştirmedir. Sıkışma rejimi altında F_n sınırsız artarken, çekme anında ise çekme dayanımının (t) bir fonksiyonu olan $F_n^{max} = t * A_{int}$ eşik değerine (izin verilebilir maksimum normal kuvvete) kadar artış gösterebilir. A_{int} , iki partikül arasındaki yüzey ($A_{int} = \pi * (\min(R_a; R_b))^2$) olmak üzere, $F_n \geq F_n^{max}$ olduğu anda partiküller arasındaki bağ kopmakta ve bu bağın olduğu yerde çekme çatlakları oluşmaktadır.

Makaslama yönünde ise F_s tetikleyici kuvvettir ve giderek artan bir eğilimle:

$$F_s = F_s^{t-\Delta t} + k_s * \Delta u_s \quad (6)$$

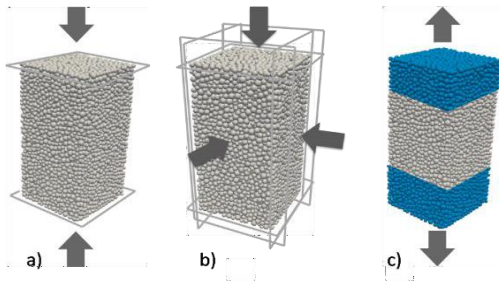
eşitliğinden hesaplanır. Eşitlikteki makaslama rijitliği (k_s), $k_s = P * k_n$ ilişkisinden belirlenmektedir. P model bir sabiti olarak $0 < P < 1$ aralığında değişmektedir. Δu_s , rölatif artan yerdeğiştirme ve $F_s^{t-\Delta t}$, bir önceki zaman aralığındaki makaslama kuvvetini gösterir. Bu durumda maksimum izin verilebilir makaslama kuvveti olan F_s^{max} , Mohr-Coulomb kriterine göre;

$$F_s^{max} = c * A_{int} + F_n * \tan(\varphi) \quad (7)$$

ilişkisinden belirlenir. Bu eşitlikte c: mikro kohezyon ve φ : taneler arasındaki içsel sürtünme açısıdır. Eğer $F_s \geq F_s^{max}$ olursa, model kayada makaslama yenilmesi meydana gelir ve bu kez partiküller arasındaki bağın olduğu yerde makaslama çatlakları gelişmektedir.

Yukarıda bahsedilen her bir mikro-parametre (Y, P, t, c, φ ve N) kayaların mekanik davranışını kontrol eden bir makro özelliği temsil etmektedir. Örneğin Y doğrudan kaya malzemesinin Young (teğetsel) modülünü (E) kontrol ederken, P, k_n / k_s değerine eşit olup Poisson oranını (ν) etkilemektedir. Her iki makro-parametre tek eksenli ve üç eksenli sıkışma ile doğrudan çekme dayanımı deneyi simülasyonlarından belirlenmektedir. Diğer taraftan t, partiküllerin çekme dayanımı olup UTS değerini kontrol ederken, c ise UCS'yi

etkilemektedir. ϕ kayanın yenilme zarfının eğimini kontrol eder ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarından belirlenir. Son olarak, N parametresi ise UCS/UTS oranına göre simülasyon başlamadan önce atanmakta ve doğrudan etkileşim oranı (ν_{int}) ile ilişkili içerisindedir (bkz. Ayrıntılar için Scholtès ve Donzé, 2013). Kullanılan yöntemde yarı-statik yükleme koşullarının simülasyonu için sönümlenme oranı (damping ratio) 0.4 olarak seçilmiştir. Her parametrenin makro özellikler üzerindeki etkisi ise ayrıntılı olarak Dinc Göğüş (2021)'de ulaşılabilir.



Şekil 9. DEM sayısal modeli (a) tek eksenli sıkışma (b) üç eksenli sıkışma (c) tek eksenli çekme dayanımı deneyleri için simülasyon şekilleri.

Figure 9. DEM numerical model (a) uniaxial compressive (b) triaxial compressive (c) uniaxial tensile strength test simulations' configurations.

Model Kalibrasyonu

Kalibrasyon süreci, söz konusu kayanın yenilme ve deformasyon davranışını temsil edinceye kadar tekrarlanmış ve toplamda 149 adet tek eksenli – üç eksenli sıkışma, çekme dayanımı deneyinin simülasyonu yapılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi tüm simülasyonlar laboratuvardaki gerilme koşullarıyla aynı şekilde yürütülmüştür (aynı yanal basınçlar, sürtünmesiz plakaların yerleştirilmesi vb.). Bu kapsamda öncelikle 1 x 2 x 1 (model birim) boyutlarında ve her biri 10,000 partikül (ayrık eleman) içeren sayısal örnekler oluşturulmuştur.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonunda iki adet rijit sürtünmesiz plaka arasında sınırlandırılmış olan sayısal model örneklere, örnek eksenine dik yönde yük uygulanmıştır (Şekil 9a). Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarında ise örnekler 6 adet rijit ve sürtünmesiz plaka arasında konumlandırılmış olup (True triaxial deney düzeneği), istenilen yanal basınca ulaşıldığı anda üst ve alt plakalar sabit bir birim deformasyon oranında düşey olarak hareket etmeye başlamaktadır (Şekil 9b). Bu sırada yanal gerilme, yan duvarların konumuyla kontrol edilmektedir. Doğrudan çekme dayanımı deneyi simülasyonunda ise, örneklerin üst ve alt sınırlarındaki partiküller düşey eksen boyunca zıt yönlü olarak hareket etmektedir (Şekil 9c). Hareket hızı sıkışma deneyi simülasyonlarındakiyle aynı hızda olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm simülasyonlar için yükleme oranı (hızı) yapılan ön hassasiyet analiz sonuçlarına göre 0.025 m/s olarak seçilmiştir. Modelleme çalışmalarının karmaşık hale gelmemesi açısından tüm örneklerin herhangi bir süreksizlik içermediği ve mikro çatlakların etki eden gerilmelerin tetiklenmesiyle oluştuğu kabul edilmektedir.

Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre kaya modellerinin mikro özellikleri (N, Y, P, t, c, ϕ) Tablo 5'de sunulmuş olup, bu mikro özelliklerle donatılan modellerin sahip olduğu makro mekanik parametreler (UCS, UTS, E ve ν) laboratuvar verileriyle karşılaştırmalı olarak Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü gibi sayısal model analizlerinden elde edilen mekanik parametreler, laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle oldukça uyumludur. Yalnızca diyabaza ait ν parametresi laboratuvar deneylerinden elde edilen değerden daha düşük çıkmıştır. Deformasyon ölçerlerin hassas olması diyabazın ν parametresinin belirlenmesinde sınırlamalar yaratmış olabilir. 1 nolu diyabaz

örneğinden veri alınamamasının, bu hassasiyetten de kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Ancak sayısal modellerden elde edilen Hoek-Brown yenilme zarfları (Hoek vd., 2002), laboratuvar verilerine göre üretilmiş yenilme zarflarıyla örtüştüğü için (Şekil 10), diyabaz

örneklerinin v_{lab} parametresinin sayısal model analizlerinden elde edilen $v_{dem}=0.15$ değerine yakın bir değerde olduğu varsayılmaktadır. Buna ilave olarak, söz konusu parametrenin 0.15-0.20 aralığında yer alması diğer mikro parametre değerlerinin kalibrasyonunu değiştirmeyecektir.

Tablo 5. Ayrık elemanlar yöntemine (DEM) göre kalibre edilen sayısal modellerin mikro parametreleri.

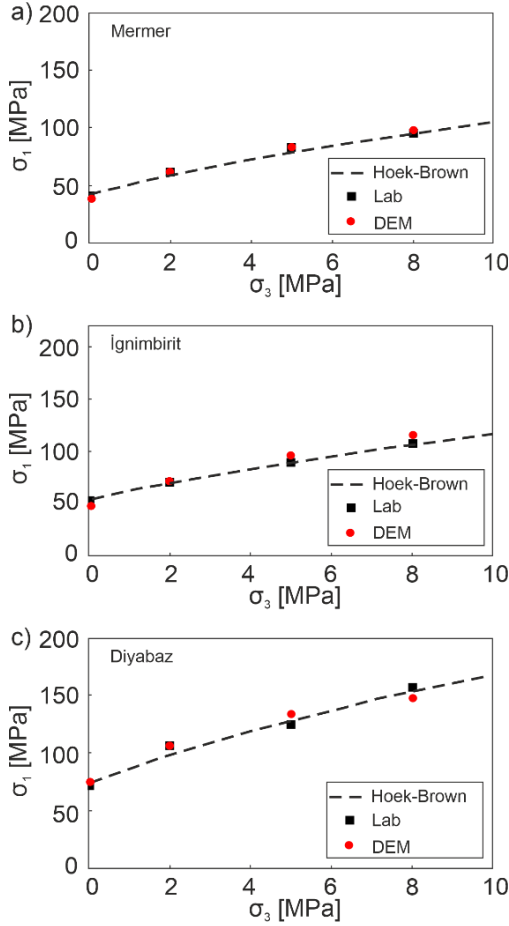
Table 5. Calibrated microparameters of the numerical modes based on the discrete element method (DEM).

Parameter	Diyabaz	Mermer	İgnimbirit
Elastik Modül Y (GPa)	13	12	10
Rijitlik oranı P (-)	0.4	0.4	0.4
Partiküller arası çekme dayanımı t (MPa)	11	7	9
Mikro Kohezyon c (MPa)	77	56	74
Mikro içsel sürtünme açısı ϕ (°)	1	1	1
Koordinasyon sayısı N (-)	10	9	9

Tablo 6. Laboratuvar deneyleri ve ayrık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı sayısal simülasyonlardan elde edilen her kaya türüne ait makro mekanik parametreler.

Table 6. Macro mechanical parameters of each rock type obtained from laboratory tests and numerical simulations based on the discrete element methods (DEM).

Kaya	Diyabaz				Mermer				İgnimbirit			
	UCS (MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	v (-)	UCS (MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	v (-)	UCS (MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	v (-)
Lab	72.57 ±9.68	9.14 ±1.15	10.88 ±1.46	0.25	41.46 ±7.03	4.85 ±0.43	8.32 ±1.79	0.14	54.41 ±7.67	6.67 ±0.78	7.23 ±1.07	0.15
DEM	75.5	9.2	9.68	0.15	38.5	5.1	7.5	0.13	47	6.53	6.4	0.13



Şekil 10. Laboratuvar ve DEM sayısal model analizlerinden elde edilen her kaya türüne ait Hoek-Brown yenilme zarfları.

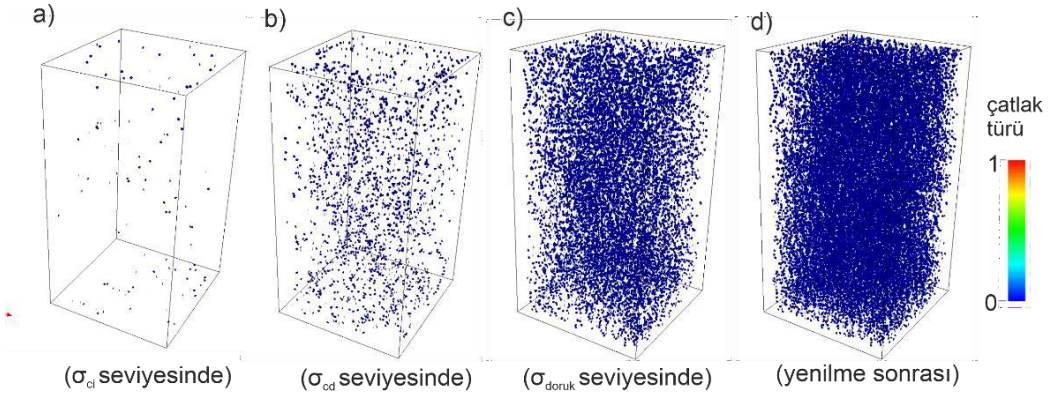
Figure 10. Hoek-Brown failure envelopes of each rock type derived from laboratory and DEM numerical model analyses.

AYRIK ELEMENLER ANALİZİ ve TARTIŞMA

Kaya mühendisliği operasyonlarında yük altındaki kayalar çoğunlukla UCS (doruk dayanımına) değerine henüz gelmeden yorularak yenilmektedir. Bu durum kayanın σ_{cd} gerilme seviyesine ulaşmış olmasından kaynaklanmaktadır (Martin ve Chandler, 1994;

Eberhardt vd., 1998). Dolayısıyla yenilme öncesi deformasyon davranışının tespit edilmesi, yenilmeyle ortaya çıkacak hasarın tahmin edilmesi açısından son derece önemlidir (Lockner vd., 1991; Lei vd., 2000; Zhang vd., 2000, Lei vd., 2006). Bu davranış ise tamamen kayanın yenilme öncesinde mikro çatlaklanma karakterine bağlıdır. Mikro çatlaklanmanın ne zaman ve ne türde geliştiğini anlamak için tek eksenli sıkışma gerilmesi altındaki model örneklerin analizi ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Yapılan DEM sayısal analizlerinde σ_{ci} ve σ_{cd} gerilme seviyelerini belirlemek için modeller Paraview adı verilen açık kaynaklı bir arayüz programında incelenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarında her örnek için 150,000 iterasyon yapılmış ve yüklemenin başlangıcından itibaren çatlak oluşumları incelenmiştir. Söz konusu gerilme seviyelerine kadar modellerde yalnızca çekme mikro çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Yüklemenin başından sonuna kadar incelendiğinde ise kaya modellerinde mikro çatlaklanmanın yine baskın olarak çekme mekanizması tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir (Şekil 11). Makaslama çatlakları ise toplam mikro çatlaklanmanın yalnızca %1'lik kısmını oluşturmuştur. Bu durum her üç kaya türünün de gevrek (rijit) bir kaya davranışı sergilenmesinden kaynaklanmaktadır. Analizlerde, her iterasyon adımına karşı modellerdeki çatlak miktarı tespit edilmiş ve o adımdaki birim deformasyona karşılık gelen gerilme seviyesi belirlenmiştir. Örneğin diyabaz kaya türünün mekanik davranışını temsil eden bir sayısal kaya modelinde σ_{ci} ve σ_{cd} değerlerinin iterasyonun 35,000 ve 50,000. zaman adımıdaki birim deformasyona karşılık gelen gerilmeler olduğu saptanmıştır (Şekil 11). Bu şekilde sayısal modellerde çatlakların türü, sayısı ve alansal dağılımı net bir şekilde gözlenebilmektedir.



Şekil 11. Tek eksenli sıkışma deneyi simülasyonlarında diyabazı temsil eden bir sayısal kaya modelinde mikro çatlak dağılımı (a) σ_{ci} seviyesinde (b) σ_{cd} seviyesinde (c) σ_{doruk} seviyesinde (d) yenilme sonrasında (mavi (0): çekme mikro çatlakları, kırmızı (1): makaslama mikro çatlakları).

Figure 11. Microcrack distribution during the uniaxial compressive strength test simulation (a) at the σ_{ci} level (b) at the σ_{cd} level (c) at the σ_{peak} level (d) after failure in diabase model sample (blue (0): tensile microcracks, red (1): shear microcracks).

Yüklemenin ilksel aşamalarında σ_{ci} değerine kadar tüm kaya örnekleri doğrusal-elastik davranış sergilemiştir (Şekil 12). Eksenel gerilmelerdeki artışla beraber mikro çatlaklanma yoğunluğu da artmış ve bu durum malzeme rijitliğini bozarak gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusallıktan sapmasına neden olmuştur. Önceki çalışmalarla (Guo vd., 2017; Dinc ve Scholtes, 2018; Zhang vd., 2021; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022) uyumlu olarak doğrusallıktan sapılan bu nokta söz konusu kayanın σ_{cd} gerilme seviyesine de işaret etmektedir. Hem Paraview programındaki çatlak analizlerinde hem de modellerin gerilme-birim deformasyon eğrileri incelendiğinde yaklaşık olarak ignimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyabaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olduğu bulunmuştur. Bu verilerden σ_{cd} değerleri UCS parametresiyle normalize edildiğinde her üç kaya türü de düşük poroziteli olan rijit kaya türlerini temsil etmektedir (Xue vd., 2014). Her üç kayada da yaklaşık olarak

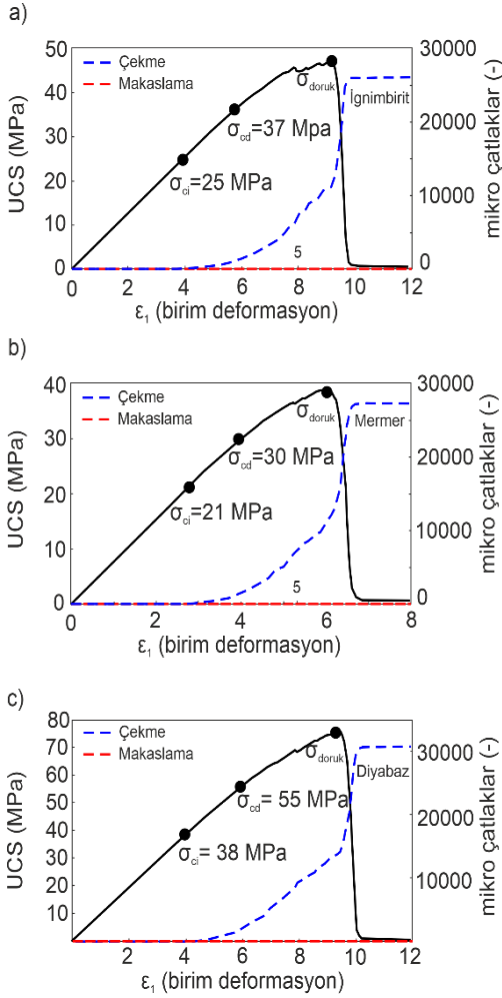
UCS'nin %50'sine denk gelen gerilmelerde çatlaklanma başlamıştır (σ_{ci}). UCS'nin %75'i ise çatlaklanmanın kayada kalıcı hasara neden olduğu ve plastik deformasyona geçtiği gerilme seviyesine (σ_{cd}) denk gelmektedir.

Tüm kaya türlerine ait σ_{ci} ve σ_{cd} gerilme seviyeleri ve kayaların mekanik davranışını gösteren gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 12'de sunulmaktadır. Burada her iki türdeki mikro çatlaklanma mekanizması mavi ve kırmızı (çekme ve makaslama) eğrilerle gösterilmiş olup, yükleme boyunca çekme mikro çatlaklarının sayısı giderek artarken, makaslama mikro çatlaklarının çok az sayıda geliştiği görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada gerilmeyle tetiklenen kaya deformasyonu 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmiştir. Mikro çatlaklanma sürecinin ayrıntılı olarak analiz edildiği araştırma kapsamında ignimbirit, diyabaz ve mermerden oluşan üç farklı kaya türüne ait örnekler

kullanılmıştır. Bu örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış ve deneylerden belirlenen mekanik özellikler 3 boyutlu DEM modellerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Araştırmadan elde edilen tüm sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:



Şekil 12. Sayısal model analizlerinde elde edilen her kaya türüne ait gerilme-birim deformasyon ve mikro çatlak yoğunluk eğrisi.

Figure 12. Stress-strain and microcrack intensity curves derived from numerical model analyses for each rock type.

i. Model sonuçları, laboratuvar ölçümlerinden elde edilen UCS, UTS, E ve ν parametreleriyle ve Hoek-Brown yenilme zarflarıyla karşılaştırılmış ve her iki yöntemden belirlenen bulguların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum sayısal modelin kaya deformasyon karakterini etkili bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

ii. Tek eksenli sıkışma deneyi simülasyonları ayrıntılı olarak incelendiğinde yenilme öncesinde mikro çatlaklanmanın temel olarak çekme mekanizması tarafından kontrol edildiği görülmüştür. Toplam mikro çatlaklanma yoğunluğunun %99'u çekme, %1'i makaslama çatlaktır. Bu sonuç her üç kaya türünün de kırılğan (gevrek) kaya davranışı sergilediğinin de bir göstergesidir. Dolayısıyla kayalarda mikro çatlaklanma evriminin belirlenmesinde DEM tabanlı model örnekler üzerinde sayısal analizler güvenli bir şekilde uygulanabilir.

iii. Tek eksenli sıkışmayla yüklenen örneklerde kritik çatlaklanma gerilme seviyeleri sırasıyla İgnimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyarbaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olarak tespit edilmiştir.

iv. DEM tabanlı bu modelleme tekniği çatlaklanmanın alansal dağılımını ve yoğunluğunu net bir şekilde göstermesi açısından AE laboratuvar ölçümlerine alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Ayrıca yöntem, çözümlene akışının kolaylıkla takip edilebilmesi ve hızlı sonuçlar üretmesiyle kullanıcıya bağımlılığı en aza indirerek kolay ve pratik bir analiz platformu sunmaktadır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK 121Y031 no'lu Kariyer Geliştirme Projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar yapıcı eleştirileri için hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- ASTM, 2000. Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction vol. 04.08. ASTM Publications, Philadelphia.
- Baud, P., Klein, E., and Wong, T., 2004. Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity. *Journal Structural Geology*, 26:603–624.
- Besuelle, P., Desrues, J., and Raynaud, S., 2000. Experimental Characterisation of the Localisation Phenomenon Inside a Vosges Sandstone in a Triaxial Cell. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (8): 1223-1237.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. Part I: Theory of fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4: 395-430.
- Brace, W.F., 1964. Brittle fracture of rocks. *State of Stress in the Earth's Crust*, edited by W.R. Judd. American Elsevier Publishing Company, New York, 111–180.
- Briševac, Z., Kujundžić, T., Čajić, S., 2015. Current cognition of rock tensile strength testing by Brazilian test. *Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, <https://doi.org/10.17794/rqn.2015.2.2>.
- Cheng, H., Yang, X., Zhang, Z., Li, W., and Ning, Z., 2021. Damage evaluation and precursor of sandstone under the uniaxial compression: Insights from the strain-field heterogeneity. *Plos One*, 16(12): e0262054. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262054> PMID: 34965268
- Desrues, J., and Andò, E., 2015. Strain localisation in granular media. *Comptes Rendus. Physique, Académie des sciences*, Paris, 16 (1): 26-36.
- Diederichs, M.S., 2007. The 2003 CGS Geocolloquium Address: Damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 9: 1082-1116.
- Dinç Göğüş Ö., 2021. Mikro Parametrelerin Makro Mekanik Kaya Davranışı Üzerindeki Etkisi: Ayrık Elemanlar Yöntemiyle Model Kalibrasyonu. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45: 67-82.
- Dinç Göğüş Ö., and Avşar, E., 2022. Stress levels of precursory strain localization subsequent to the crack damage threshold in brittle rock. *Plos One*, 17(11): e0276214. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276214>.
- Dinç, Ö., and Scholtès, L., 2018. Discrete Analysis of Damage and Shear Banding in Argillaceous Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51:1521–1538.
- Dyskin, A., and Germanovich, L.N., 1993. A model of crack growth in microcracked rock. *International Journal of Rock Mechanic Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30(7): 813-820.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., and Read, R.S., 1998. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 222–233.
- Germanovich, R.N., Salganik, R.L., Dyskin, A.V., and Lee, K.K., 1994. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression. *Pure Applied Geophysics*, 143:117–149.
- Gorski, B., Conlon, B., Ljunggren, B., 2007. Determination of the direct and indirect tensile strength on cores from borehole KFM01D. Forsmark site investigation, <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-07-76.pdf>, Swedish Nuclear Fuel and

- Waste Management Co, SKB Rapport P-07-76, 28.
- Griffith, A.A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 221:163-198.
- Guo, S., Qi, S., Zou, Y., and Zheng, B., 2017. Numerical Studies on the Failure Process of Heterogeneous Brittle Rocks or Rock-Like Materials under Uniaxial Compression. *Materials (Basel)*, 1; 10(4):378. <https://doi.org/10.3390/ma10040378> PMID: 28772738.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. 2002. Hoek–Brown failure criterion 2002 edition, *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC)*, Toronto: 267–273.
- Holcomb, D., Rudnicki, J.W., Issen, K.A., and Sternlof, K., 2007. Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the research and research directions. *Acta Geotechnica*, 2(1):1–15. doi:10.1007/s11440-007-0027-y.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods*, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group. Kozan Publishing, Ankara, Turkey.
- Jensen, S.S., 2016. Experimental study of direct tensile strength in sedimentary rocks. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 95.
- Ji, Y., Stephen, A.H., Baud, P., and Wong, T.F., 2015. Characterization of pore structure and strain localization in Majella limestone by X-ray computed tomography and digital image correlation. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), 700-719.
- Lei, X., 2006. Typical phases of pre-failure damage in granitic rocks under differential compression. *Fractal Analysis for Natural Hazards*, Geological Society, London, Special Publications, 261, 11–29.
- Lei, X.L., Kusunose, K., Nishizawa, O., Cho, A., and Satoh, T., 2000. On the spatio-temporal distribution of acoustic emissions in two granitic rocks under triaxial compression: the role of pre-existing cracks. *Geophysical Research Letters*, 27, 13:1997-2000.
- Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A., and Sidorin, A., 1991. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 350:39–42.
- Louis, L., Wong, T.F., and Baud, P., 2007. Imaging strain localization by X-ray radiography and digital image correlation: Deformation bands in Rothbach sandstone. *Journal of Structural Geology*, 29:129-140.
- Martin, C.D., and Chandler, N.A., 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31(6): 643-659.
- Moradian, Z., Einstein, H.H., and Ballivy, G., 2015. Detection of Cracking Levels in Brittle Rocks by Parametric Analysis of the Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 785–800.
- Nicksiar, M., and Martin, C.D., 2012. Evaluation of Methods for Determining Crack Initiation in Compression Tests on Low-Porosity Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45:607–617.
- Nicksiar, M., and Martin, C.D., 2012. Evaluation of Methods for Determining Crack Initiation in Compression Tests on

- Low-Porosity Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45:607–617.
- Peng, S., and Johnson, A.M., 1972. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9:37-86.
- Perras, M.A., Diederichs, M.S., 2014. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32:525–546.
- Potyondy, D.O., and Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8):1329–1364.
- Renard, F., Cordonnier, B., Kobchenko, M., Kandula, N., Weiss, J., and Zhu, W., 2017. Microscale characterization of rupture nucleation unravels precursors to faulting in rocks. *Earth Planet Science Letters*, 476: 69–78.
- Scholtés, L., and Donzé, F.V., 2013. A DEM model for soft and hard rocks: role of grain interlocking on strength. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 61:352–369.
- Shimizu, H., Koyama, T., Ishida, T., Chijimatsu, M., Fujita, T., and Nakama, S., 2010. Distinct element analysis for Class II behavior of rocks under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47: 323–333.
- Shirole, D., Walton, G., and Hedayat, A., 2020. Experimental investigation of multi-scale strain-field heterogeneity in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 127:104212.
- Schubnel, A., Thompson, B.D., Fortin, J., Guéguen, Y., Young, R.P., 2007. Fluid-induced rupture experiment on Fontainebleau sandstone: premonitory activity, rupture propagation, and aftershocks. *Geophys. Res. Lett.* 34, L19307.
- Šmilauer, V., and et al., 2015. *Yade Documentation* 2nd edition. doi:10.5281/zenodo.34073. <http://yade-dem.org>.
- Wang, B., Chen, Y., and Wong, T.F., 2008. A discrete element model for the development of compaction localization in granular rock. *Journal of Geophysical Research*, 113: B03202.
- Wu, H., Guo, N., and Zhao, J., 2018. Multiscale modeling and analysis of compaction bands in high porosity sandstones. *Acta Geotechnica*, 13:575–599. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0560-2>.
- Xue, L., Qin, S., Sun, Q., Wang, Y., Lee, L.M., and Li, W., 2014. A Study on Crack Damage Stress Thresholds of Different Rock Types Based on Uniaxial Compression Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:1183–1195.
- Yang, W., Li, G., Ranjith, P.G., and Fang, L., 2019. An experimental study of mechanical behavior of brittle rock-like specimens with multi-non-persistent joints under uniaxial compression and damage analysis. *International Journal of Damage Mechanics*, 28(10): 1490–1522.
- Zang, A., Christian, W.F., Stanchits, S., Janssen, C., and Dresen, G., 2000. Fracture process zone in granite. *Journal of Geophysical Research*, 105(23): 651-661.
- Zhang, H., Huang, G., Song, H., and Kang, Y., 2013. Experimental characterization of strain localization in rock. *Geophysical Journal International*, 194: 1554–1558.
- Zhang, L., Scholtés, L., and Donzé, F.V., 2021. Discrete Element Modeling of Permeability Evolution During Progressive

Failure of a Low-Permeable Rock Under Triaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54:6351–6372. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02622-9>

Zhang, Y., Shao, J., de Saxcé, G., Shi, C., and Liu, Z., 2019. Study of deformation and failure in an anisotropic rock with a three-dimensional discrete element model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 120:17–28.

Zhao, X.G., Cai M., Wang J., and Ma, L.K., 2013. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64:258-269.

Zhu, J.B., Zhou, T., Liao, Z.Y., Sun, L., Li, X.B., and Chen, R., 2018. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour 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.