

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇATLAKLI KAYA KÜTLESİ DAYANIMININ SÜREKLİ YENİLME
DURUMUNDA ÜÇ EKSENLİ DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Mert ÖZKARSLI

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

OCAK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇATLAKLI KAYA KÜTLESİ DAYANIMININ SÜREKLİ YENİLME
DURUMUNDA ÜÇ EKSENLİ DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan Mert ÖZKARSLI
(505181334)**

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU

OCAK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505181334 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan Mert ÖZKARSLI , ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇATLAKLI KAYA KÜTLESİ DAYANIMININ SÜREKLİ YENİLME DURUMUNDA ÜÇ EKSENLİ DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yalçın KOCA
Dokuz Eylül Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 20 Ocak 2021





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında çatlaklı kaya kütlesi dayanımının sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerle araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, tane sınırları önceden ısıtıl işlem sonucunda örselenmiş ve kısmen koparılmış Muğla-Kavaklıdere mermeri çatlaklı kaya için model malzemesi olarak seçilmiştir. Başlangıçta, farklı sayıda periyodik ısıt döngüye sahip örnek kategorilerinde ısıtıl işlem sonucu oluşan fiziksel değişiklikler belirlenmiş, daha sonra aynı örnek kategorilerine mekanik deneyler uygulanmıştır. Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden her bir örneğin yenilme sonrasındaki dayanımlarına karşılık gelen yenilme zarfları normal gerilme düzleminde (σ_1 , σ_3) çizilerek elde edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen deneysel sonuçlar uygulamada kabullenilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle gerek yüksek lisans derslerini aldığım gerekse tez konusu tavsiyesi vermesi bakımından bilgi ve tecrübesine güvendiğim, gelişime açık bir tez konusunu bana layık gören, laboratuvarı kullanmama imkan sağlayan, her konuda elinden geldiği müddetçe yardımlarını esirgemeyen ve her daim iş ve hayat tecrübelerini aktaran tez danışmanım Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU'na, değerli bilgi ve katkıları için Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL'e ve Prof. Dr. Yalçın KOCA'ya, Roclab 1.0 yazılımını kullanmama imkan sağlayan ve konu hakkında bilgi alış verişinde bulunduğum Arş. Gör. Gökhan ŞANS'a, Optik Mineraloji laboratuvarında ince kesitleri incelememde yardımları dokunan Arş. Gör. Ali Tuğcan ÜNLÜER'e, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardım, bilgi ve tecrübesiyle katkı sağlayan tekniker Yüksel ILGAR'a, ince kesitlerin hazırlanmasında yardımcı olan tekniker Mehmet Ali ORAL'a, yüksek lisans eğitimime gelinceye kadarki süreçlerde desteklerini sunan hocalarıma, doğumumdan bugünlere gelinceye değin her konuda maddi ve manevi yardımlarını, tavsiyelerini, yaşanmışlıklarını, bilgilerini, tecrübelerini esirgemeyen ve her zaman yanında olduğum hissini her daim yaşatan, yüksek lisansımı İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yapmam konusunda da tavsiyede bulunan sevgili annem Nermin ÖZKARSLI, babam Erol ÖZKARSLI ve kardeşime teşekkürlerimi borç bilirim.

10 Ocak 2021

Hasan Mert ÖZKARSLI
(Jeoloji Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Konunun Önemi ve Literatür Araştırması	2
2. TEMEL KAVRAMLAR	3
2.1 Kayacın Tanımı	3
2.2 Kayanın Tanımı	4
2.3 Kayaç Özellikleri	7
2.2.1 Jeolojik özellikler	7
2.2.2 Kimyasal özellikler	7
2.2.3 Fiziksel özellikler	8
2.2.4 Mekanik özellikleri	12
2.2.4.1 Dayanım	13
2.2.4.2 Deformasyon	14
2.2.4.3 Kayaçların davranışları	19
2.3 Gerilme-Deformasyon Eğrisinin Yenilme Öncesi ve Sonrası Durumu	22
2.4 Kayacın Davranışını Etkileyen Çevre Koşulları ve Madde Özellikleri	22
2.4.1 Çevre Basıncı	22
2.4.2 Sıcaklık	23
2.4.3 Boşluk Suyu Basıncı	24
2.4.4 Zaman	24
2.4.5 Yönsellik (Anizotropi)	25
2.4.6 Mineralojik Bileşim	25
3. YENİLME ÖLÇÜTLERİ	27
3.1 Teorik Yöntemler	27
3.1.1 Griffith ölçütü	27
3.1.2 Tresca ölçütü	27
3.1.3 Von Mises ölçütü	27
3.1.4 Mohr-Coulomb ölçütü	28
3.2 Görgül (Ampirik) Yöntemler	29
3.2.1 Franklin ölçütü	29
3.2.2 Kim-Lade ölçütü	30
3.2.3 Bieniawski ölçütü	30
3.2.4 Hoek ve Brown ölçütü	30

4. HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜNDE YAPILAN DEĞİŞİKLİKLER	33
4.1 Tarihsel Gelişim	33
4.2 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün Esasları ve 1980-1988 Yılları Arasındaki Durumu.....	33
4.3 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1988-1990 Yıllarındaki Durumu.....	35
4.4 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1992 Yılındaki Durumu	36
4.5 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1995-1997 Yıllarındaki Durumu.....	38
4.6 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1997-1999 Yıllarındaki Durumu.....	38
4.7 Ölçütün 2002 Yılındaki Durumu.....	40
4.8 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 2006 Yılındaki Durumu	43
4.9 Ölçütün 2018 Yılındaki Güncellenmiş Hali	43
5. ISIL İŞLEMLE TANE SINIRLARI ÖRSELENEN MERMERİN YENİLME SONRASI DAYANIMI	45
5.1 Malzeme ve Metod	45
5.2 Deney Malzemesi	46
5.3 Laboratuvar Deneyleri.....	48
5.3.1 Karot alma	48
5.3.2 Karot düzeltme	48
5.3.3 Isıl işlem öncesi kuru birim hacim ağırlık belirleme.....	50
5.3.4 Isıl işlem öncesi doymuş birim hacim ağırlık belirleme.....	53
5.3.5 Isıl işlem öncesi örneklerin hacminin belirlenmesi	55
5.3.6 Isıl işlem öncesi örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranlarının belirlenmesi.....	55
5.3.7 Isıl işlem öncesi örneklerin sonik dalga hız deneyi ile belirlenmesi.....	58
5.3.8 Deney örneklerinin ısıtılma tabii tutulması.....	61
5.3.9 Isıl işlem sonrası örneklerin kapiler su emmesi	62
5.3.10 Isıl işlem sonrası kuru birim hacim ağırlığı	63
5.3.11 Isıl işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlığı.....	63
5.3.12 Isıl işlem sonrası örneklerin hacmi.....	64
5.3.13 Isıl işlem sonrası örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranları	64
5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları	64
5.3.12 Isıl işlem sonrası örneklerin hacmi.....	64
5.3.13 Isıl işlem sonrası örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranları	64
5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları	64
5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları	65
5.3.15 İnce kesit ve epoksi ile parlatılmış kesitlerin görünümü ve yorumlanması	70
5.3.16 Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneyler ve sonuçları.....	79
5.3.17 Tek eksenli basınç deneyi sonuçları.....	85
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞILMASI	87
6.1 Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Fiziksel Özelliklerdeki Değişimler	87
6.1.1 Kuru birim hacim ağırlık.....	87
6.1.2 Doymuş birim hacim ağırlık	88
6.1.3 Örneklerin hacmindeki değişim	89
6.1.4 Yoğunluk.....	92
6.1.5 Görünür porozite, boşluk oranı ve doluluk oranı	92
6.1.6 Kapiler su emme.....	95
6.1.7 Sonik hız.....	98

6.1.8 Isıl işlem sonrası tek eksenli basınç dayanımı	103
6.1.9 Kayalarda ısıt işlem sonrası üç eksenli deneyler ile yenilme durumunun gözlenmesi	106
KAYNAKLAR	133
EKLER	139
ÖZGEÇMİŞ.....	175





KISALTMALAR

GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
SRC	: Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (pürüzlülük, bozunma, dolgu)
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
UCS	: Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
RMR	: Kaya Kütlesi Sınıflaması
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
MTS	: Materyal Test Sistemi
Syf	: Sayfa
Bkz	: Bakınız
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Ca	: Kalsit Minerali



SEMBOLLER

D	: Örselenme Faktörü
m_b, a, s	: Hoek-Brown Yenilme Sabitleri
E	: Young Modülü (Dinamik Elastisite Modülü)
E_s, E_{av}, E_t	: Elastisite Modülü (Sekant, Ortalama, Tanjant)
m_f, a_f, σ_{cf}	: Sürekli Yenilme Durumunda Üç Eksenli Deneylerden Elde Edilen Yenilme Sonrası Dayanım Parametreleri
σ_c, σ_{ci}	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Normal, Sağlam)
e	: Boşluk Oranı
n	: Görünür Porozite
P, S	: Basınç ve Kayma Dalgası Hızları
v	: Poisson Oranı
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı
c	: Kohezyon
ρ	: Yoğunluk
σ_t	: Çekme Dayanımı
R^2	: Regresyon Sayısı
γ	: Birim Hacim Ağırlık
σ_1, σ_3	: Normal Gerilmeler (En Büyük, En Küçük)
m_i	: Kaya Malzemeleri İçin Hoek-Brown Sabiti
$\dot{\epsilon}$	: Eksenel Yükleme Hızı
τ	: Makaslama (Kesme) Dayanımı
k	: Geçirimsizlik (Hidrolik İletkenlik) Katsayısı
G	: Kayma (Rijidite) Modülü
ϵ	: Eksenel Birim Deformasyon
K	: Hacimce Değişme (Bulk) Modülü
G_s	: Özgül Ağırlık
w	: Su İçeriği
α, β	: Gerçek ve Görünür Eğim
S_r	: Doygunluk Derecesi
S_a	: Ağırlıkça Su Emme
γ_{dry}	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_{sat}	: Doygun Birim Hacim Ağırlık

γ_{wet}	: Islak Birim Hacim Ağırlık
γ_s	: Tane Birim Hacim Ağırlık
V_v	: Boşluk Hacim
V_k	: Katı Boşluk Hacim
V_T	: Toplam Hacim
W_k	: Kuru Ağırlık
W_w	: Islak Ağırlık
W_T	: Toplam Ağırlık
q_x	: X yönündeki Su Miktarı (Debi)
K	: Geçirimsizlik Katsayısı
h	: Hidrolik Basınç
A	: Kesit Alanı
μ	: Viskozite
p	: Sıvı Basıncı
c_i'	: Anlık Kohezyon
τ	: Makaslama Dayanımı
ϕ_i'	: Anlık İçsel Sürtünme Açısı
σ'	: Normal Efektif Gerilme
ω	: Kapiler Su Emme

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kayaların tek eksenli basınç dayanım sınıflaması [2].	6
Çizelge 2.2 : Kayalarda Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri [9].	18
Çizelge 3.1 : Hoek ve Brown tarafından bazı kaya grupları için önerilen “ m_i ” değerleri [15].	32
Çizelge 3.2 : Hoek ve Diğerleri tarafından önerilen bazı kaya türleri için “ m_i ” değerleri [14].	32
Çizelge 4.1 : Eklemlı kaya kütleleri; blok boyu ve süreksizlik aralığı değerleri [14]	37
Çizelge 4.2 : Kaya malzemeleri için önerilen m_i sabitinin değeri [24].	39
Çizelge 5.1 : Deney örneği grupları üzerinde uygulanan ısıtma-soğutma döngülerinin sayıları.	46
Çizelge 5.2 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneğinin her grup için ısıtma işlem öncesi kuru ağırlığı, hacmi, kuru yoğunluğu, kuru birim hacim ağırlığının hesaplanması.	52
Çizelge 5.3 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneğinin her grup için ısıtma işlem öncesi doymuş ağırlığı, hacmi, doymuş yoğunluğu, doymuş birim hacim ağırlığının hesaplanması.	54
Çizelge 5.4 : Isıtma işlem öncesi örneklerin görünür porozite, boşluk oranı ve doluluk oranları.	57
Çizelge 5.5 : Ultrasonik dalga hızı sınıflaması [37].	59
Çizelge 5.6 : Sonik dalga hızlarının ısıtma işlem öncesi sonuçları.	60
Çizelge 5.7 : Deney örneği gruplarının ısıtma işlem sonrası ortalama birim hacim ağırlıkları ve poroziteleri.	62
Çizelge 5.8 : Deney örneklerinin kapiler su emme miktarları.	65
Çizelge 5.9 : Isıtma işlem sonrası deney örneklerinin kuru yoğunluğu, kuru birim hacim ağırlıkları.	66
Çizelge 5.10 : Isıtma işlem sonrası deney örneklerinin doymuş yoğunluğu ve doymuş birim hacim ağırlıkları.	67
Çizelge 5.11 : Isıtma işlem sonrası örneklerin porozite, boşluk oranı ve doluluk oranları sonuçları.	68
Çizelge 5.12 : Sonik dalga hızlarının ısıtma işlem sonrası sonuçları.	69
Çizelge 5.13 : Deney örneklerinin yenilme sonrası dayanım zarflarından elde edilen mekanik büyüklükler.	84
Çizelge 5.14 : Isıtma işlem sonrası tek eksenli basınç deneyi sonuçları.	86
Çizelge 6.1 : Kuru koşullarda görünür porozite, tane boyutu ve P sonik dalga hızlarının [43] ile karşılaştırılması.	102
Çizelge 6.2 : Örnek gruplarının tek eksenli sıkışma deneyi veri sonuçları (Carrara mermeri ve Buchberger kumtaşı ile karşılaştırma) [44].	105
Çizelge 6.3 : 1. ve 2. grup mermer örneklerinin yenilme öncesi (pre-failure) (peak) σ_p , σ_{mp} , σ_c ve σ_{cp} değerlerinin sonuçları.	107
Çizelge 6.4 : 1. ve 2. grup mermer örneklerinin yenilme sonrası (post-failure) (residual) σ_{af} , σ_{mf} , σ_c ve σ_{cf} değerlerinin sonuçları.	108
Çizelge 6.5 : 1. grup örneklerin yenilme öncesi içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ve kohezyon (c_p) değerlerinin sonuçları.	114
Çizelge 6.6 : 2. grup örneklerin yenilme öncesi içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ve kohezyon (c_p) değerlerinin sonuçları.	115

[illegible]

Çizelge D.5 : E1 ve E2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , mb , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.....	171
Çizelge D.6 : F1 ve F2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , mb , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.....	172
Çizelge E.1 : Yenilme öncesi (pre-failure) (peak) örneklerin üç eksenli deney veri sonuçları.....	173
Çizelge E.2 : Yenilme sonrası (post-failure) (residual) örneklerin üç eksenli deney veri sonuçları.....	174





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kaya malzemesi, süreksizlik ve kaya kütlesi kavramlarının şematik gösterimi (Hudson 1989'dan yararlanılarak) [3].	4
Şekil 2.2 : Sistem büyüklüğü kavramına temel teşkil eden benzer ortamların pre- ve post-failure dayanımları [5].	5
Şekil 2.3 : Müler (1963'den hareketle, Yüzer ve Vardar tarafından önerilmiş kaya kütlesi sınıflaması [4] (Yüzer ve Vardar 1986'dan yalınlaştırılarak düzenlenmiştir).	6
Şekil 2.4 : Kazı kesiti (teknik etkileşimin boyutu) büyüklüğünün fonksiyonu olarak kaya dokusundaki değişim [8].	7
Şekil 2.5 : Kaya malzemesinin katı, sıvı ve gaz fazlarına göre farklı durumları.....	8
Şekil 2.6 : Kaya malzemesi içindeki fazlar ve hacim, kütle ve ağırlık diyagramı.	8
Şekil 2.7 : Kayaç örneğinin zamana bağlı olarak kapiler su emme seviyesi (Muğla-Kavaklıdere mermer örneği).	12
Şekil 2.8 : Tek eksenli basınç deneyinden elde edilen davranış eğrisi.	13
Şekil 2.9 : Gerilme türleri (a: Çekme, b: Burulma, c: Basınç, d: Makaslama).	15
Şekil 2.10 : Hooke cisminin gerilme-deformasyon ilişkisi.	16
Şekil 2.11 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi kiriş (sekant) elastisite modülünü belirleme yöntemi.	17
Şekil 2.12 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi ortalama elastisite modülünü belirleme yöntemi.	17
Şekil 2.13 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi teğet (tanjant) elastisite modülünü belirleme yöntemi.	17
Şekil 2.14 : Gerilme-birim deformasyon eğrisinden hareketle elastisite modülü ve Poisson Oranı'nın belirlenmesi.	18
Şekil 2.15 : Elastik davranışa sahip malzemelerin davranış özelliklerini gösteren grafik.	20
Şekil 2.16 : Plastik davranışa sahip malzemenin eğrisi.	20
Şekil 2.17 : Elasto-plastik özellik gösteren malzemenin davranışının grafik ile gösterimi.	21
Şekil 2.18 : Farklı kayaçlardaki gerilme-birim deformasyon davranışlarının grafiklerle gösterimi.	21
Şekil 2.19 : Kayaçlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisinin gösterimi [10].	22
Şekil 2.20 : Çevre gerilmesine bağlı direnç (σ_1), sekant elastisite modülü ve Poisson oranının (ν) değişimi (Grafikte kullanılan değerler % 1 lik eksenel deformasyona karşılık gelmektedir) [45].	23
Şekil 2.21 : Yükleme hızının kayanın mekanik davranışı üzerindeki etkileri a) Luc du Bonnet granitinin statik yorulma eğrisi (statik gerilme kuru haldeki basınç direncinin % 71 olarak alınmıştır) [61], b)Yükleme süresine bağlı direnç düşüm eğrisi ve kritik kırılma direnci [60].	25
Şekil 2.22 : Minerolojik bileşimin kayacın davranışı (a) ve kırılma koşulu (b) üzerindeki etkisi. Kuvarsit (k), granit (g), mermer (m), kumtaşı (kmt) ve kıltaşı (klt) simgeleriyle gösterilmiştir [65].	25
Şekil 3.1 : Mohr-Coulomb yenilme ölçütü, Mohr doğrusal yenilme zarfı [11].	28
Şekil 3.2 : Hoek ve Brown yenilme ölçütünün ampirik şekilde gösterimi [6].	31
Şekil 4.1 : Hoek-Brown yenilme ölçütünün Mohr yenilme zarfı ile açıklanması [19].	34

Şekil 4.2 : Kaya kütlelerinin yapısı ve süreksizlik yüzeyi koşuluna bağlı olarak “mb /mi ” oranları ve “a” sabiti değerleri [14].	37
Şekil 4.3 : Kohezyonun GSI ve <i>mi</i> değerlerine göre değişimi [25].	39
Şekil 4.4 : İçsel sürtünme açısı değerinin GSI ve <i>mi</i> sabitine göre değişimi [25].	40
Şekil 4.5 : Farklı kaya dayanımlarında GSI ile kaya kütlelerinin elastisite modülü ve σ_{ci} arasındaki ilişkisi [26].	40
Şekil 4.6 : Tahmini “D” örselenme faktörü [27].	41
Şekil 4.7 : [28]’ın önerdiği niceliksel GSI Sınıflama Sistem, Abağı’nın “Sağlam ve Masif” kaya grubu da ekledikten sonraki değiştirilmiş son hali [29].	42
Şekil 4.8 : Basitleştirilmiş Hoek ve Diederichs denkleminin Çin’deki ve Tayvan’daki veri değerleri [30].	43
Şekil 4.9 : RocData ile modifiye edilmiş Cuckoo yöntemini kullanan analiz ile Student t dağılımını içeren bir Bayes analizi kullanılarak Coburg kireçtaşı üzerinde üç eksenli deneylerin analizinin gösterimi [33].	44
Şekil 5.1 : Muğla-Kavaklıdere bölgesinin jeoloji haritası (M.T.A. Aydın N20 paftasından alınmıştır) [41].	47
Şekil 5.2 : Muğla Mermeri örneklerinin alındığı ocağın güncel durumu.	47
Şekil 5.3 : İTÜ Jeoloji Mühendisliği örnek alma laboratuvarında yapılan karot düzeltme işlemi.	49
Şekil 5.4 : a.) Deneye hazır hale getirilen örneklerin numaralandırılması ve b.) profil görüntüleri.	49
Şekil 5.5 : Örneklerin boy ve çaplarının kumpas aracılığıyla ölçülmesi.	50
Şekil 5.6 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin kuru ağırlıklarının hassas terazide tartılması.	51
Şekil 5.7 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin 105 ⁰ C’lik etüvde kurutulması.	51
Şekil 5.8 : Deney örneklerinin suya doygunluklarının sağlanması ve doygun ağırlığının hassas terazide tartılması.	53
Şekil 5.9 : D3 mermer örneğinin hacminin belirlenme işlemi.	56
Şekil 5.10 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin suya doygun hale getirilişi, a) A,B,C,D grubu, b.) E ve F grubu.	56
Şekil 5.11 : Sonik dalga hızının çalışma prensibi.	59
Şekil 5.12 : Pundit Lab+ aleti ile ultrasonik dalga hızı tayini.	59
Şekil 5.13 : Muğla-Kavaklıdere mermeri üzerinde yapılan diferansiyel termal analiz (DTA) grafiği [38].	61
Şekil 5.14 : Isıl işlemde kullanılan yüksek sıcaklık fırını (etüv).	62
Şekil 5.15 : D grubu mermer örneklerinin kapiler su emme deneyine tabi tutuluşu.	65
Şekil 5.16 : Mermer örneklerinin optik mikroskopta incelenmesi.	71
Şekil 5.17 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası polarizan mikroskoptaki görüntüsü.	72
Şekil 5.18 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası polarizan mikroskoptaki görüntüsü.	73
Şekil 5.19 : A, B, C, D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası binoküler mikroskoptaki görüntüsü.	74
Şekil 5.20 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası dikey ekseninde optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).	75
Şekil 5.21 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası dikey eksenindeki optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).	76
Şekil 5.22 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası yatay ekseninde optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).	77

Şekil 5.23 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası yatay eksenlerdeki optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).	78
Şekil 5.24 : Sürekli yenilme durumunda üç eksenli eşzamanlı deney verilerinin davranış ve dayanım düzlemlerinde gösterimi [69]......	79
Şekil 5.25 : Üç eksenli deney öncesi örneklerin görüntüleri.	81
Şekil 5.26 : Üç eksenli deney sonrası örneklerin yenilme görüntüleri.	81
Şekil 5.27 : 1. ve 2. grup örneklerin üç eksenli deney sonrası yenilme formları.	82
Şekil 5.28 : Üç eksenli deneyde kullanılan yükleme ve kayıt sistemi.	83
Şekil 5.29 : Üç eksenli deneyde Hoek hücresini yükleme sistemine yerleştirme işlemi.	83
Şekil 5.30 : Mermer örneğinin tek eksenli sıkışma deneyi görüntüsü.	85
Şekil 5.31 : Tek eksenli basınç deneyi sonrası örneklerin görünüşleri.	86
Şekil 6.1 : Isıt işlem öncesi örneklerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	91
Şekil 6.2 : Isıt işlem sonrası örneklerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	91
Şekil 6.3 : 1. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.	96
Şekil 6.4 : 2. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.	97
Şekil 6.5 : 3. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.	97
Şekil 6.6 : Isıt işlem sonrası P-S sonik dalga hızlarının örnek gruplarıyla ilişkisinin grafiksel ifadesi.	101
Şekil 6.7 : Isıt işlem sonrası kapiler su emme ile sonik dalga hızların karşılaştırılması.	101
Şekil 6.8 : Isıt işlem sonrası P ve S sonik dalga hızları ile tek eksenli basınç dayanımının karşılaştırılması.	103
Şekil 6.9 : Örnek gruplarına göre tek eksenli basınç deney verileri.	104
Şekil 6.10 : 1. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme öncesi, pre-failure, peak-doruk zarf).	110
Şekil 6.11 : 1. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme sonrası, post-failure, residual-doruk zarf).	111
Şekil 6.12 : 2. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme öncesi, pre-failure, peak-doruk zarf).	112
Şekil 6.13 : 2. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme sonrası, post-failure, residual-doruk zarf).	113
Şekil 6.14 : 1. grup örneklerin yenilme öncesi C ve σ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.	118
Şekil 6.15 : 2. grup örneklerin yenilme öncesi C ve σ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.	119
Şekil 6.16 : 1. grup örneklerin yenilme sonrası C ve σ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.	119
Şekil 6.17 : 2. grup örneklerin yenilme sonrası C ve σ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.	120
Şekil 6.18 : 1. grup örneklerin içsel sürtünme açısı ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	121
Şekil 6.19 : 2. grup örneklerin içsel sürtünme açısı ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	121
Şekil 6.20 : 1. grup örneklerin kohezyon ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	122
Şekil 6.21 : 2. grup örneklerin kohezyon ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.	122

Şekil 6.22	: 1. grup örneklerin GSI 70 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	123
Şekil 6.23	: 1. grup örneklerin GSI 75 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	124
Şekil 6.24	: 1. grup örneklerin GSI 80 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	125
Şekil 6.25	: 1. grup örneklerin GSI 85 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	126
Şekil 6.26	: 2. grup örneklerin GSI 70 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	127
Şekil 6.27	: 2. grup örneklerin GSI 75 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	128
Şekil 6.28	: 2. grup örneklerin GSI 80 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	129
Şekil 6.29	: 2. grup örneklerin GSI 85 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.	130
Şekil A.1	: [28] GSI abağından GSI değeri 70 olarak alındığı durum.....	141
Şekil A.2	: B1 grubu örneğinin (GSI 70 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.	142
Şekil B.1	: [28] GSI abağından GSI değeri 75 olarak alındığı durum.....	149
Şekil B.2	: B1 grubu örneğinin (GSI 75 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.	150
Şekil C.1	: [28] GSI abağından GSI değeri 80 olarak alındığı durum.....	157
Şekil C.2	: B1 grubu örneğinin (GSI 80 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.	158
Şekil D.1	: [28] GSI abağından GSI değeri 85 olarak alındığı durum.....	165
Şekil D.2	: B1 grubu örneğinin (GSI 85 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.	166

ÇATLAKLI KAYA KÜTLESİ DAYANIMININ SÜREKLİ YENİLME DURUMUNDA ÜÇ EKSENLİ DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Çalışmada, çatlaklı kaya kütleli dayanımının sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerle araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, tane sınırları önceden ısıtılacak bir işlem sonucunda örselenmiş ve kısmen koparılmış Muğla-Kavaklıdere mermeri çatlaklı kaya için model malzemesi olarak seçilmiştir. Başlangıçta, farklı sayıda periyodik ısıtılacak döngüye sahip örnek kategorilerinde ısıtılacak işlem sonucu oluşan fiziksel değişiklikler belirlenmiş, daha sonra aynı örnek kategorileri için mekanik deneyler uygulanmıştır. Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden her bir örneğin yenilme sonrasındaki dayanımlarına karşılık gelen yenilme zarfları normal gerilme düzleminde (σ_1 , σ_3) çizilerek elde edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen deneysel sonuçlar uygulamada kabullenilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar, farklı sayıda ısıtılacak işlem döngüsüne tabi tutulan 6 ayrı örnek kategorisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney malzemesinin tane (kalsit minerali) sınırlarını açmak, örnek dokusunu çatlaklı kaya dokusuna benzetmek için uygulanan ısıtılacak işlemde, maksimum sıcaklık diferansiyel termal analiz (DTA) sonuçlarına göre 400 °C ile sınırlandırılmıştır. Deneylerde standart boy/çap oranına sahip silindirik örnekler kullanılmıştır. Deney örneklerinin alt ve üst yüzeyleri arasında paralellik sağlanmış ve parlatılarak pürüzsüz hale getirilmiştir. Üçer numuneden oluşan 6 örnek kategorisinden 5'i farklı sayıda 24 saatlik ısıtılacak-soğutılacak döngüsüne tabi tutulmuştur. Orijinal örnek kategorisi A, diğer örnek kategorileri ise sırasıyla B, C, D, E ve F olarak adlandırılmıştır. A grubu örnekler herhangi bir ısıtılacak işleme tabi tutulmamıştır. Diğer örnek kategorileri (B, C, D, E ve F) ise farklı sayıda ısıtılacak işleme maruz bırakılmıştır.

Isıtılacak işlem sonucunda deney örneği kategorilerinin dokusal ve fiziksel özelliklerinde oluşan değişiklikler rutin deneylerle belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda tane sınırlarında oluşan kalıcı fissürlerin genişliklerinin ve sıklıklarının ısıtılacak işlem döngüsü sayısına bağlı artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, kaba taneli Muğla Mermeri'nden oluşan deney örneği kategorilerinin kuru birim hacim ağırlığı, doymuş birim hacim ağırlığı, görünür porozitesi (gözeneklilik), kapiller su emmesi, sonik hızları, boşluk oranı, yoğunlukları gibi fiziksel özelliklerindeki değişiklikler belirlenmiş ve yorumlanmıştır.

Yukarıda değinilen bazı deneyler doymuş koşullarda tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Aralarındaki farklar karşılaştırılmıştır. Aynı örnekler üzerinde mekanik deneyler son aşamada uygulanmıştır. Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden elde edilen ve yenilme sonrası durumu temsil eden dayanım zarfları Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmış, benzerlikler ve farklılıklar tezin son bölümünde tartışılmıştır. Üç eksenli deneyler sonucunda, özellikle ısıtılacak işleme tabi tutulan örneklerin tümünde yenilmenin taneler arasında geliştiği, örneklerde doku yenilmesinin olduğu görülmüştür. Ayrıca, düşük çevre basınçları altında, yenilme

zarflarının eğiminde önemli artışın olduğu belirlenmiş, bu durum sığ derinliklerde kaya kütlesi dayanımını içsel sürtünme açısı tarafından denetlendiği anlaşılmıştır. Dayanım zarfı üzerinde, farklı çevre basıncı aralıklarına karşılık gelen kısımlar için kesme mukavemeti parametreleri Mohr-Coulomb eşitlikleri yardımıyla belirlenmiş ve çevre basıncına bağlı değişimleri ortaya konmuştur. Sonuç olarak, çatlaklı kaya kütlesi dayanımlarının tanımlanmasında kullanılan kesme mukavemeti parametrelerinin (içsel sürtünme açısı ve kohezyon) sabit birer değer olarak alınmasının doğru olmayacağı, bu büyüklüklerin çevre gerilmesinin fonksiyonu olarak değişeceği belirlenmiştir.



INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF THE FRACTURED ROCK MASS BY TRIAXIAL TESTS IN CASE OF CONTINUOUS FAILURE

SUMMARY

Studies on the design of underground and aboveground structures, rock mass and rock failure criteria are of great importance. As a matter of fact, in order to make the design, it must be analyzed correctly and data must be taken from the experiments correctly. For this reason, one of the reasons affecting the process of rock mass failure is the state of the rock mass being intact or fractured rock. Today, studies on the behavior of fractured rock masses have aroused curiosity in the community. The reason for this is that problems arise before and after geotechnical studies. Both experimental and theoretical approaches on these issues have an important effect on the decision phase against these problems. The Mohr-Coulomb criterion, which has been used in the past and is currently used for some practical solutions, cannot fully explain the failure process in multibody, namely fractured rocks. These issues were expressed in the 1970s.

Both in the world both in Turkey theorems related to the failure behavior of the rock mass in the 1970s and began to be raised prior year. Until the 1970s, the necessary information about the failure behavior of fractured rocks was not at the desired level. After these years, these behaviors were tried to be explained by Mohr-Coulomb's criteria, albeit partially, but there were still deficiencies in terms of applicability. In the 1980s, the Hoek-Brown failure criterion was an important gain for that period in terms of both applicability and practical solutions. The Hoek-Brown failure criterion is an empirical approach, making it more effective than other criteria in terms of applicability. On the contrary, between 1980-1988, according to the criteria proposed by Hoek-Brown, σ_1 found the curvature of the stress and the shear strength with the greatest principal stress and σ_3 the smallest principal stress. In the 1990s, some changes were made and they emphasized that the "m" and "s" parameters were also important.

Between 1997 and 1999, an important change was made and the concept of GSI started to be discussed. During these years, GSI, internal friction angle, deformation and cohesion parameters were developed. In 2002 in the world and many of the researchers and academics in Turkey have made updates to Hoek-Brown failure criterion. The distortion factor "D" has started to be talked about this year. GSI has updated the blocks, SRC and the number of volumetric joints and the massive rock group have been added to the block. The importance of this year is that the changes and updates made this year are still valid today. Finally, the Hoek-Brown failure criterion, updated in 2018, was tried to be explained with an approach based on bayes statistics, that is, the method of probability and frequency. As a result of the advancement of technology and the positive progress in this direction in academic studies, it is essential that there are changes, developments and updates in studies related to this innovation criterion.

The Hoek-Brown failure criterion is an empirical criterion, and its usability is high compared to other criteria in terms of its applicability especially in fractured rocks. In

this respect, in the thesis, the continuous failure of fractured rock samples has been investigated by triaxial strength tests, and the aim is to compare the data obtained with this purpose with the Hoek-Brown failure criterion in the literature.

Firstly, in this study, it is aimed to investigate the strength of fractured rocks by triaxial tests in case of continuous failure. For this purpose, the Muğla-Kavaklıdere marble, whose grain boundaries were previously damaged by a heat treatment and partially detached, was chosen as the model material for the fractured rock. Initially, physical changes resulting from heat treatment were determined in sample categories with different number of periodic thermal cycles, then mechanical tests were applied for the same sample categories.

The failure envelopes corresponding to the strength after failure of each sample from the triaxial tests in the case of continuous failure were obtained by drawing in the normal stress plane (σ_1 , σ_3). The experimental results obtained in the last part of the study were compared with the Hoek-Brown failure criteria accepted in practice.

Experimental studies were carried out on six different sample categories that were subjected to different numbers of heat treatment cycles. In the heat treatment applied to open the grain (calcite mineral) boundaries of the test material and to simulate the sample texture to the fractured rock texture, the maximum temperature was limited to 400 °C according to the results of differential thermal analysis (DTA).

Cylindrical specimens with standard length/diameter ratio were used in the experiments. Parallelism was provided between the lower and upper surfaces of the test samples and they were polished and smoothed. Five out of six sample categories consisting of three samples were subjected to different number of 24-hour heating-cooling cycles. The original sample category was named A, while the other sample categories were named B, C, D, E and F, respectively. Group A samples were not subjected to any heat treatment. Other sample categories (B, C, D, E and F) were subjected to different number of heat treatments.

Changes in textural and physical properties of the test sample categories as a result of heat treatment were determined and evaluated by routine experiments. As a result of these evaluations, it was determined that the width and frequency of permanent fissures formed at the grain boundaries increased depending on the number of heat treatment cycles. In addition, the changes in the physical properties of the test sample categories consisting of coarse grained Muğla Marble such as dry unit weight, saturated unit weight, apparent porosity, water absorption, capillary water absorption, sonic velocities, void ratio and densities were determined and interpreted.

Some experiments mentioned above were repeated under saturated conditions and the results obtained were examined. The differences between them have been compared. Mechanical tests were applied on the same samples at the last stage. Strength envelopes obtained from triaxial experiments in case of continuous failure and representing the state after failure were compared with Hoek-Brown failure criterion, similarities and differences were discussed in the last part of the thesis.

In thin section samples, it was determined that fracture development after heat treatment was high in all samples except A group sample, and the fracture development of F group samples, which were exposed to heat treatment the most, was the highest. In addition, it was observed that 99% of calcite minerals in CaCO_3 , the chemical composition of the marble sample, were affected by heat treatment and degraded.

In addition, apart from heat treatment, grain size difference in physical properties (coarse and fine) is an important factor in fracture formation. While the porosity, water absorption and fracture formation were more common in the physical experiments of the coarse grained samples, these were observed less in the fine grained samples.

As a result of physical experiments, A group samples were not subjected to heat treatment in any way, so density, porosity, water absorption, micro-fracture development were less common than other groups. In the samples subjected to heat treatment, the water absorption, micro fracture formation, porosity of the samples, which were mostly heat treated according to the degree of heat treatment, increased the parameters listed here.

One of the important inputs regarding the strength and fractured of the samples after heat treatment is the ultrasonic wave velocity test. While the ultrasonic wave velocity classification of the samples before the experiment was high-speed and intact rock, after the experiment, that is, after the heat treatment, the ultrasonic wave velocities of the samples were found to be very low speed and fractured rock and the wave velocities were noticeably reduced in the experiments.

In the mechanical experiments, it was determined that the samples subjected to uniaxial compression test were affected by the processes in heat treatment and other physical experiments and accordingly decreased from group A to group F. Accordingly, uniaxial compression strength, modulus of elasticity and deformation modulus decreased according to the duration of heat treatment. As a result of the triaxial compression test, it was determined that σ_c decreased from A group samples towards F group samples.

As a result of the triaxial experiments, it was observed that in all the samples that were subjected to heat treatment, the defeat developed between the grains and the tissue regeneration occurred in the samples. In addition, under low environmental pressures, it was determined that there was a significant increase in the inclination of the failure envelopes, and this situation was found to be controlled by the internal friction angle at shallow depths. The shear strength parameters for the parts on the strength envelope corresponding to different environmental pressure ranges are determined with the help of Mohr-Coulomb equations and changes depending on the ambient pressure are revealed. As a result, it was determined that it would not be correct to take the shear strength parameters (internal friction angle and cohesion) used in defining the fractured rock mass strengths as a constant value, and these sizes will change as a function of the environmental stress.

We can come to the following conclusion about the values found. When the GSI value increases, the internal friction angle increases and the cohesion value decreases. Increasing the GSI value indicates that the rock has a intact structure or has very few fractures, a low GSI value indicates that the strength of the specimens becomes susceptible to cracks and fractured development increases. It also shows that under low environmental pressures, it was determined that there was a significant increase in the inclination of the failure envelopes, and this situation was found to be controlled by the internal friction angle at shallow depths.



1. GİRİŞ

Yeraltı ve yerüstü yapıların tasarımında, kaya kütlelerinin dayanım ve davranışı belirleyicidir. Bu nedenle, genellikle farklı tür, özellik ve sıklıkta süreksizlikler içeren kaya kütlelerinin yenilme koşullarının bilinmesi gerekmektedir. Günümüze kadar geçen uzun sürede, bu tür ortamların yenilme koşulları önemli bir araştırma konuları arasında yer almış, ya yeni yaklaşımlar ileri sürülmüş ya da mevcut yenilme ölçütleri tartışmaların odağını oluşturmuştur.

Bu tartışmaların esas nedeni uygulamalar sırasında karşılaşılan ve ciddi sonuçlar doğuran stabilite problemleridir. Kaya kütleleri ile etkileşim sonrasında karşılaşılabilecek dayanım ve davranışın yeterli düzeyde doğru olarak önceden kestirilmesi, doğayla teknik etkileşim yönteminin seçimi, sınırlandırılması ve zamanla ilişkilendirilmesi açılarından önemlidir.

Bu konularda gerek deneysel gerekse teorik yaklaşımların, bu sorunları aşmak için sürekli güncellenen yaklaşımlarla aşılmaya çalışıldığı bilinmektedir. Geçmişten günümüze kadar yapılan uygulamalarda, jeoteknik tasarım ve pratik çözümler için Mohr-Coulomb ve Hoek Brown yenilme ölçütleri göz önünde tutulmuş ve yaygın olarak kullanılmıştır. Kaya kütlelerinin yenilme koşulu olan ve 1970'lerde ilk kez dile getirilmiş olan Hoek-Brown yenilme ölçütü, farklı zamanlarda sürekli revize edilmiş olup pratikte kabullenilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütünün ampirik bir ölçüt olduğu, çatlaklı kayaların dayanımını kestirmede pratiklik sağladığı açıktır. Ancak, bu ölçütte önerilen ampirik katsayı ve sabitlerin fiziksel anlamları yeterince açık değildir. Bu çalışmada, önceden fissürlü hale getirilen örnekler üzerinde laboratuvar ölçeğinde uygulanmış deneylerin sonuçları tartışılmıştır. Deney örnekleri üzerinde aynı koşullarda sürekli yenilme durumunun üç eksenli deneyler yapılmış, örneklerin yenilme sonrası aşamadaki dayanım ve davranışları açıklanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmadaki amaç, çatlaklı kayaların dayanım ve davranışlarının özel bir deney yöntemiyle araştırılmasıdır. Bu amaca yönelik olarak, deney öncesi ısıl işleme tabi

tutulan mermer örneklerinin tane sınırları boyunca kısmen fissürlü hale getirilmiş ve yenilme durumunda üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Nihai hedef olarak, deneysel çalışmada kullanılan farklı örnek kategorileri için elde edilecek yenilme sonrası dayanım zarflarının pratikte yaygın kullanılan Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılmasıdır.

1.2 Konunun Önemi ve Literatür Araştırması

1970’li yıllardan itibaren kaya kütlelerinin yenilme davranışı ile ilgili öneriler dile getirilmeye başlanmıştır. Bu tarihe gelinceye değin kaya kütlesi özelliklerini tümüyle dikkate alan ve yenilme davranışlarını önceleyen yeterli, gerekli ve ayrıntılı çalışmalara pek rastlanılmamaktadır. Bu yıllarda, genellikle Mohr-Coulomb kırılma hipotezi ve yenilme ölçütü göz önünde tutulmuştur. Özellikle, 1980’lerden itibaren kaya kütlelerinin çatlaklı yapısını dikkate alan yaklaşımlar benimsenmeye başlanmış, Hoek-Brown tarafından sürekli geliştirilen yenilme ölçütü uygulamalar açısından önemli bir kazanım olarak ortaya çıkmıştır. 1980-1988 yılları arasında Hoek-Brown’un önerdiği ölçütte, yenilme koşulunun bir eğri ile temsil edilebileceği, diğer bir ifade ile Mohr-Coulomb yenilme koşulunda öngörülen kesme dayanımı parametrelerinin sistem büyüklüğü ve çevre basıncının fonksiyonu olarak değişebileceği anlamındadır. Bu saptama kaya mekaniğinde modern anlamda önemli bir gelişmedir. Ancak, bu ölçütte önerilen ve sınırlı sayıda deneye dayandırılan ampirik parametreler (m ve s) sorgulamaya açık olduğundan, 1990’lı yıllardan itibaren bu parametrelerin de üzerinde durulmuştur.

1995 ile 1999 yılları arasında önemli bir değişikliğe gidilmiş olup Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kavramı ortaya atılmıştır. Bu yıllarda GSI; içsel sürtünme açısı, elastisite modülü ve basınç dayanımı gibi büyüklüklerle ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. 2000’li yıllardan itibaren ise, çok sayıda araştırmacı Hoek-Brown yenilme ölçütü ve GSI kavramı için güncelleme önermiştir. Örselenme faktörüne “D” bu dönemde dikkat çekilmiştir. GSI abakları güncellenmiş, süreksizlik ve yapısal özelliklere dayalı ölçeklendirme abağı eklenmiştir. Bu dönemde modifiye edilen GSI abağı üzerinde güncel tartışmalar sürmesine rağmen, bu sınıflandırma uygulamadaki geçerliliğini sürdürmüştür. Son olarak 2018 yılında güncellenen Hoek-Brown yenilme ölçütü Bayes Teoremi’ne (olasılık ve sıklık yöntemi) dayanan bir yaklaşımla açıklanmaya çalışılmıştır.

2. TEMEL KAVRAMLAR

Bu başlık altında, tezde kullanılan kavram ve büyüklüklerin kısaca tanımlanması ve tanıtılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle; kayaç, kaya, kaya malzemesi (sağlam kaya maddesi), çatlaklı kaya, süreksizlik, kaya kütlesi gibi terimler açıklanacaktır.

2.1 Kayacın Tanımı

Kayaç terimi, minerallerden oluşan doğal katı maddeleri tanımlar. Kayaçlar genel olarak üç kökene sahiptir. Magmatik kayaçlar; magmanın -magmadan türeyen malzemenin- yükselmesiyle yer kabuğunun içinde veya yeryüzünde soğuyup katılaşması sonucu oluşur. Volkanik patlamalarda ise katılaşma süreci kısmen veya tamamen atmosferde başlar. Tortul veya sedimanter kayaçlar; ayrık veya çimentolu olabilir. Çimentolu tortul kayaçlar, birikme, çökme ve sıkışma süreci sonrasında tanelerin matriks veya çimento ile bağlanması şeklinde meydana gelir. Metamorfik kayaçlar ise bu iki kayaç türünün (magmatik ve sedimanter) çeşitli etkilere (yüksek basınç ve sıcaklık gibi) maruz kalması sonucu, ilksel mineral parajenezi veya yapı/doku değişimine uğraması sonucunda oluşmuştur. Kayaçlar kökenlerine ve oluşum şartlarına göre farklı özellikler göstermektedir.

Magmatik kaya, kristallenme olsun veya olmasın eriyik/erimiş kayanın soğuması ve katılaşması sonucu oluşur. Katılaşma yerin derin kısımlarında oluşmuş ise intrüzif (plütonik) , sığ kısımlarında oluşmuş ise damar veya yarı derinlik, yüzeyde oluşmuş ise ekstrüzif yani yüzey kayacı (volkanik) olarak adlandırılır. Sınıflama mineralojik bileşim, doku ve renklerine dayandırılır. Plütonik kayaçlarda yavaş soğumanın, katılaşma süresinin uzun olması nedeniyle mineraller genellikle iri ve öz şekillidir. Volkanik kayaçlar ise hızlı soğuma nedeniyle ince taneli ve bazı hallerde boşluklu yapıdadır.

Çimentolu sedimanter kayaçlar parçalanma, kırıntı veya çözelti şeklinde taşınma, birikme-çökme, diyajenez (taşlaşma) evreleri sonucunda oluşur. Sedimanter kayaçlar genellikle üç ana alt sınıfta toplanır. Kırıntılı tortul kayaçlar katı parçaların konsolidasyonu sonucu, kimyasal tortul kayaçlar çözelti içindeki maddelerin çökmesi sonucu, organik kayaçlar ise canlı kavrıların –biyokimyasal canlıların- yığılması sonucunda oluşur.

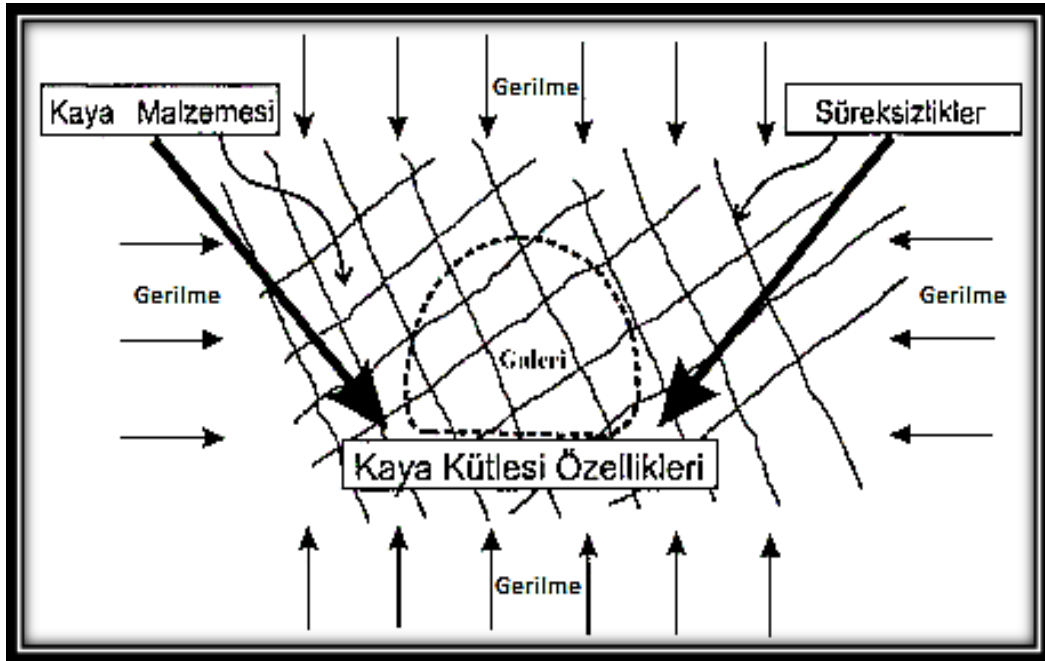
2.2 Kayanın Tanımı

Mühendislik açısından kaya, homojen, elastik, izotrop olmayan, dayanımı 1 MPa ‘dan daha büyük doğal ortam olarak tanımlanabilir. Jeolojik özellik ve kökenlerine bağlı olarak doku ve yapılarında değişiklikler söz konusudur.

Kaya malzemesi; makro primer ve sekonder süreksizlik (tabaka, kırık, çatlak ve zayıflık düzlemleri) içermeyen farklı boyutlardaki doğal malzemedir [1]. Sağlam kaya tanımlanırken kaya maddesi özellikleri kullanılır. Başlıca madde özellikleri, renk, tür, tane boyu, doku, yapı, dayanıklılık, yoğunluk, sertlik, bozunma derecesi, porozite, dayanım, geçirimsizlik vb. şeklinde sıralanabilir.

Çatlaklı kaya ise yapısında mikro veya makro süreksizlik içeren dayanımı kaya maddesine göre çok daha düşük doğal ortamı tanımlar. Kaya maddesi genellikle dayanımına göre sınıflandırılmaktadır [2].

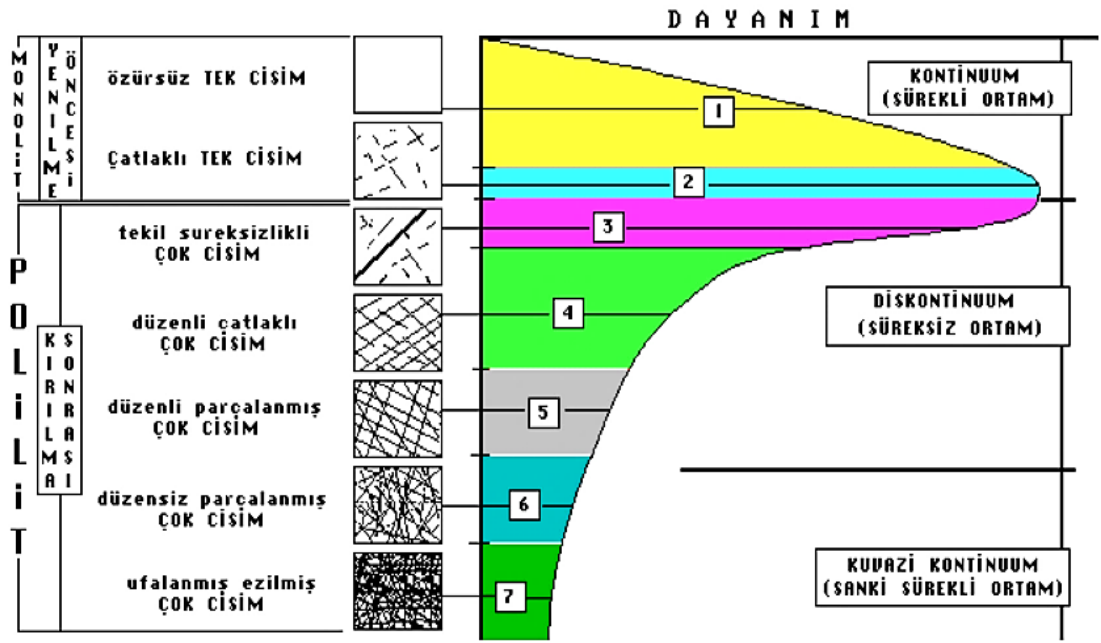
Genel anlamda süreksizlik kavramı kaya kütlelerinde kesiklik oluşturan, ya çekme dayanımı olmayan ya da çok düşük olan tabaka, şizozite, eklem, kırık, fay vb. gibi jeolojik olarak zayıflık düzlemlerine karşılık gelir [1]. Süreksizliklerin tamamı primer (oluşumla yaşıtlı) yada sekonder (sonradan oluşmuş) düzlemsel yüzeylerdir. Ayrıca, jeolojik kökenli süreksizliklere ilave olarak, kazı ve patlama işlemi gibi nedenlerle oluşmuş süreksizlikler de söz konusudur.



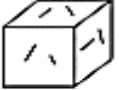
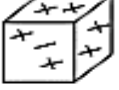
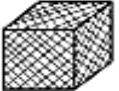
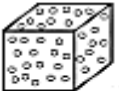
Şekil 2.1 : Kaya malzemesi, süreksizlik ve kaya kütlesi kavramlarının şematik gösterimi (Hudson 1989’ dan yararlanılarak) [3].

Kaya kütlesi, kaya malzemesi ile süreksizlik ağının oluşturdukları sistemin adıdır [3] (Şekil 2.1) ve doğal koşulların etkisi altında bulunur. Kütle içerisinde bloktan, kile kadar çok değişik boyutta elemanlar bulunur. Kaya kütlelerinde zayıflık ve dayanım kaybına neden olan süreksizlikler sıvı ve gazların kütle içerisinde hareket etmesine ve dolaşımına imkan tanır. Süreksizlik duvarları çoğu durumda pürüzlü, düzensiz veya sistematik, farklı düzeyde ayrılmış olup, değişik bileşimde dolgu veya sıvaya sahiptir.

Kaya kütleleri ile ilgili Müller [4] tarafından önerilmiş kavramlar, geçmişte olduğu gibi günümüzde de öne çıkarılmaktadır. Şekil 2.3 'de Müller, süreksizliklerle ilgili kayanın tek cisim ortamından çok cisim ortamına doğru değişen varyasyonlardaki ortamların davranışının farklı olduğunu söylemiştir. Bu ifadeyi biraz daha genişletecek olursak eğer Müller, masif ya da daha az süreksizlik içeren ortamların sıklığa ve süreksizlik sayısındaki artışa bağlı olarak kayanın dayanım ve davranışında büyük farklılaşmalar olabileceğine işaret etmiştir. Vardar, Müller'in ileri sürdüğü bu tezi daha da geliştirerek ortam adlandırmalarında bulunmuştur [5] (Şekil 2.2). Kaya ortamının adlandırılması, sistem büyüklüğü, gerilme–deformasyon ilişkisi, kayanın yenilme ya da kırılma öncesi, sırası ve sonrasındaki davranışını temsil eden bütüncül anlatım Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi ifade edilmiştir. Müller'in bu yaklaşımı 1980'lere doğru kaya kütleleri için Hoek-Brown yenilme ölçütünün [6,7] gelişmesine temel oluşturmuştur.



Şekil 2.2 : Sistem büyüklüğü kavramına temel teşkil eden benzer ortamların pre- ve post-failure dayanımları [5].

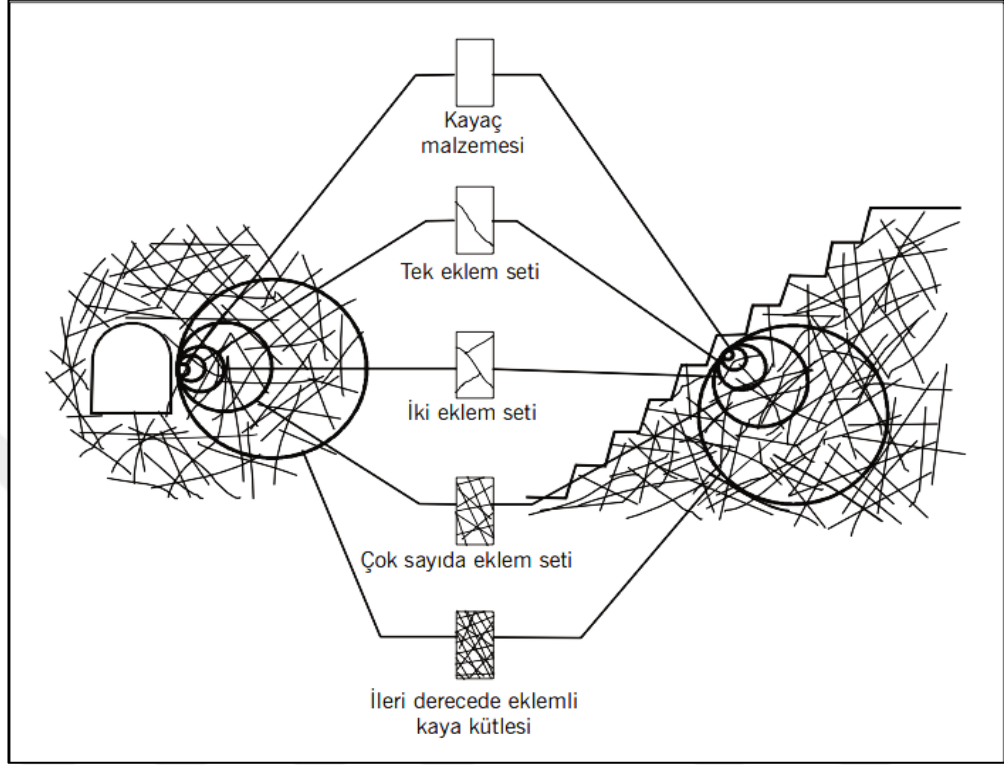
DOKUSU-NİTELİKLERİ		ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞLARI	
		DEFORMASYON	DEFORMASYON MEKANİZMASI
TEK CİSİM ORTAMI	 Çatlaksız-Masif Tek parça Yapı ve oluşumdan kaynaklanan ilksel anizotropi	Elastik, plastik, vizkoz	Kırılma, akma
KIRIKLI TEK CİSİM ORTAMI	 Çatlaklanmış, ancak parçalanmamış, çatlaklar arasında malzeme köprüleri, çok cisim ortamına geçiş ilksel anizotropi, tektonizma, kazı ve patlatma sonucu oluşan anizotropi	Elastik Psödoelastik	Kırılma, kırılma akması, basamaklı kırılma
SÜREKSİZ PARÇALANMIŞ ORTAM	 İri parçalı ve tam kırıklı sistem. Çatlak cisimlerinin oluşturduğu tuğla yapısı. Gerçek süreksiz ortam. İstatistiksel anlamda sürekli ortam Tektonik kökenli anizotropi	Makaslama sürtünmesi, yapışma sürtünmesi, psödoplastik kenetlenme	Kırılma akması, doku deformasyonu
TANELİ AYRIK ORTAM	 Ezilmiş, kırılmış, yontulmuş yığma malzeme. Ayrık kütle, sürekli ortam Anizotropi mümkün, ancak araştırılmamış.	Elastik, plastik	Tanelerin ötelenmesi, dönmesi ve deformasyonu

Şekil 2.3 : Müler (1963'den hareketle, Yüzer ve Vardar tarafından önerilmiş kaya kütlesi sınıflaması [4] (Yüzer ve Vardar 1986'dan yalınlaştırılarak düzenlenmiştir).

Çizelge 2.1 : Kayaların tek eksenli basınç dayanım sınıflaması [2].

Kaya Sınıfı	Basınç Dayanımı (σ_c) (MPa)
Çok Düşük Dayanımlı	< 6
Düşük Dayanımlı	6 – 20
Orta Dayanımlı	20 -60
Yüksek Dayanımlı	60 – 200
Çok Yüksek Dayanımlı	> 200

Kaya malzemesinin deformasyon ve dayanım ölçütlerine kullanılan teknik ucuz ve kolayca tespit edilebilmesi, ayrıca süreksizlik sayısı ve sıklığına bağlı olarak tek cisimden çok cisme doğru geçişin açıklaması Şekil 2.4 'de verilmiştir.



Şekil 2.4 : Kazı kesiti (teknik etkileşimin boyutu) büyüklüğünün fonksiyonu olarak kaya dokusundaki değişim [8].

2.3 Kayaç Özellikleri

Kayaçların jeolojik, kimyasal, mühendislik (fiziksel, mekanik ve teknolojik) özellikleri aşağıda alt başlıklar altında açıklanmıştır.

2.2.1 Jeolojik özellikler

Temel kavramlarda da bahsedildiği gibi kayaçlar oluşum şartlarına ve kökenlerine göre magmatik, metamorfik ve sedimanter olmak üzere üç grupta incelenir. Kayaçların jeolojik olarak oluşabilmesi için petrografik özelliklerini (dokusu ve yapısı), zamanını (jeokronolojisini, stratigrafisini ve paleontolojisini), jeohidrolojisini ve ortamını (heterojen özelliği, fasiyesi ve homojenliği) bilmek gerekir.

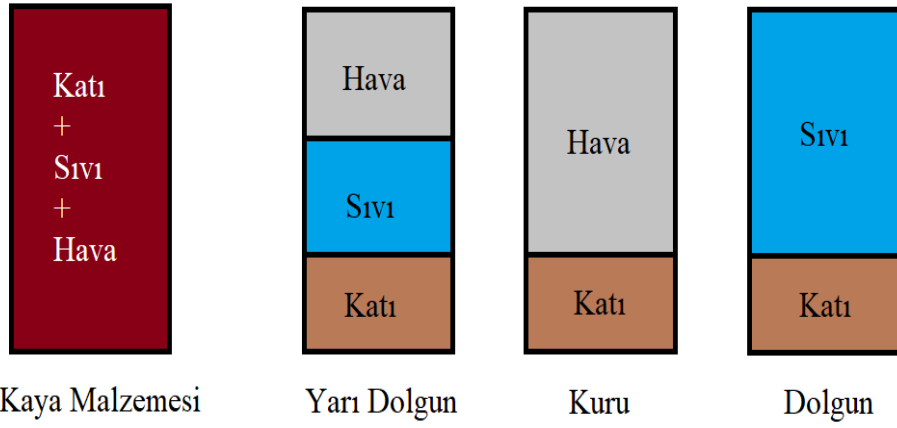
2.2.2 Kimyasal özellikler

Kayacın içerisindeki mineraller, kayacın kimyasal özelliğini belirlemede önemli role sahiptir. Bu minerallerdeki herhangi bir değişim veya bu minerallerin bulunma azlığı

veya çokluğu kayacın yapısının değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca mühendislik açısından da ayrışmanın olması, suya olan tepkisi, alterasyon sonucu bozunma, erime gibi özelliklerde kayacın kimyasındaki değişime sebep olur.

2.2.3 Fiziksel özellikler

Kayaçların yoğunluk, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, geçirgenlik (geçirimsizlik), gözeneklilik (porozite), su içeriği ve su emmesi gibi özellikleri fiziksel özellikler olarak tanımlanır. Kaya malzemesi, kaya taneleri (katı) ve boşluklardan (sıvı + gaz veya sadece gaz ve/veya sadece sıvı) oluşur. Bu fazların madde içerisindeki oranı fiziksel özelliklerle ilişkilidir.



Şekil 2.5 : Kaya malzemesinin katı, sıvı ve gaz fazlarına göre farklı durumları.

Aşağıdaki diyagramda kayanın kuru, doymuş ve yarı doymuş durumlarında; ağırlık, kütle, hacim cinsinden değerleri verilmiştir. Bu diyagramda farklı durumların basit anlatımı şematize edilmiştir.

	Hacim			Temel Öğeler	Kütle		Ağırlık	
Boşluk	V_T	V_V	V_a	Hava	0	M_T	0	W_T
			V_w	Sıvı	M_w		W_w	
		V_s	V_s	Katı	M_s		W_s	

Şekil 2.6 : Kaya malzemesi içindeki fazlar ve hacim, kütle ve ağırlık diyagramı.

Yoğunluk (Density) (ρ) : Kayaç malzemesindeki toplam hacmin, toplam kütle oranına denir. Birimi (kg/cm^3 , g/cm^3 , ton/m^3) ile ifade edilir. Burada genellikle suyun yoğunluğunu karşılaştırmalar açısından baz alınır. Suyun yoğunluğu 1 g/cm^3 dür.

$$\rho = \frac{M_T}{V_T} \quad (2.1)$$

ρ : Yoğunluk, M_T : Toplam kütle, V_T : Toplam hacim

Birim hacim ağırlık (Unit weight) (γ) : Kayaç malzemesinin ağırlığının, toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Birimi genellikle N/m^3 veya kN/m^3 ile ifade edilir. Burada da yoğunlukta olduğu gibi suyun birim hacim ağırlığı baz alınır. Suyun birim hacim ağırlığı 9.81 kN/m^3 dür.

$$\gamma = \frac{W_T}{V_T} \quad (2.2)$$

Ayrıca birim hacim ağırlıkları; doğal, kuru, ıslak ve doymuş haller için de belirlenebilmektedir.

Kuru birim hacim ağırlık (γ_{dry}) : Kayaç örneği kuru ağırlığının (W_k) toplam hacmine (V_T) oranıdır. Kuru ağırlığı belirlemek için örnek genellikle 105°C sıcaklıkta, 24 saat süreyle kurutulduktan sonra, teraziyle tartılarak belirlenir.

$$\gamma_{dry} = \frac{W_k}{V_T} \quad (2.3)$$

Islak birim hacim ağırlık (γ_{wet}) : Boşlukları sıvı ile tamamen doymamış olan kayaç örneğinin ağırlığının, toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_{wet} = \frac{W_W}{V_T} \quad (2.4)$$

Doymuş birim hacim ağırlık (γ_{sat}) : Boşlukların sıvı ve hava ile dolduğu kayaç örneğinin toplam ağırlığının, toplam hacme oranına denir.

$$\gamma_{sat} = \frac{W_T}{V_T} \quad (2.5)$$

Tane birim hacim ağırlığı (γ_s) : Katı kısmın ağırlığının (W_s) katı kısmın hacmine (V_s) oranı olarak tanımlanır.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.6)$$

Özgül ağırlık (Specific gravity) (G_s) : Katı birim hacim ağırlığının, saf suyun birim hacim ağırlığına (γ_w) oranıdır.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.7)$$

Boşluk oranı (Void ratio) (e) : Boşluk hacmin (V_v) katı kısmın hacmine (V_k) oranıdır.

$$e = \frac{V_v}{V_k} \quad (2.8)$$

Görünür Porozite (Porosity) (n) : Toplam boşluk hacminin (V_v) örneğin toplam hacmine (V_T) oranıdır.

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad (2.9)$$

Su içeriği / Nem (Water content) (w) : Kayacın içerdiği suyun ağırlığının (W_w) kuru ağırlığına (W_k) oranıdır.

$$w = \frac{W_w}{W_k} \quad (2.10)$$

Doygunluk Seviyesi (Degree of Saturation) (S_r) : Sıvı hacminin (V_w) toplam boşluk hacmine (V_v) oranıdır.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.11)$$

Permeabilite (Geçirimsizlik) (k) : Kayaçların permeabilitesinin bilinmesi pratik birçok yarar sağlar. Örneğin su, gaz veya petrol gibi akışkanların bu ortamlardan çekilmesi veya depolanması, tünele su gelisinin hesaplanması, susuzlaştırma çalışmaları, barajlardaki su kaçakları gibi önemli uygulamalarda kritik öneme sahip temel bir veri durumundadır. Arazide, çoğu durumda kaya kütlelerinin bütünlüğünü bozan süreksizlikler tarafından büyük ölçüde denetlenir.

Çoğu kayalar Darcy kanununa uyar. Mühendislik uygulamalarında bu kanun aşağıdaki formda dikkate alınır.

$$q_x = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot A \quad (2.12)$$

Burada q_x : x yönündeki debiyi ($m^3/gün$ veya litre/sn), h : hidrolik basınç (m), A ise x yönüne dik kesit alanı (m^2), k katsayısı ise hidrolik iletkenlik olarak tanımlanmaktadır. Su sıcaklığının $20\text{ }^\circ\text{C}$ nin üzerinde olması veya diğer sıvılar dikkate alındığında yukarıdaki eşitlik;

$$q_x = K \cdot \frac{\Delta p}{\mu \cdot \Delta l} \cdot A \quad (2.13)$$

formunda yazılır. Burada p sıvı basıncı ($\gamma_w \cdot h$), μ ise viskoziteye karşılık gelir. $20\text{ }^\circ\text{C}$ deki suyun viskozitesi $1,005 \cdot 10^{-3}\text{ N s/m}^2$ ve yoğunluğu (γ_w) $9,80\text{ kN/m}^3$ tür. Yaygın olarak kullanılan permeabilite birimi Darcy olup $9,86 \cdot 10^{-9}\text{ cm}^2$ ye karşılık gelir. Bu eşitlikteki K katsayısı sıvının özelliklerinden bağımsızdır. Birim kare boyutuna sahip olan bu katsayı hidrolik permeabilite olarak adlandırılır. Darcy yaklaşık olarak 10^{-3} cm/sn lik bir iletkenliğe karşılık gelir.

Ağırlıkça Su Emme Oranı (S_a) : Yarı doygun malzemenin ağırlığının (sadece sıvı ile doldurulmuş) (P_2), kuru doygun malzemenin ağırlığının (sadece hava ile doldurulmuş) (P_1) farkının alınması ve bunu da kuru doygun malzeme ağırlığına (P_1) oranlanması ile ifade edilir. Yüzde ile ifade edilir. Kuru ağırlığı tespit etmemiz için öncelikle $105\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat süresince örneği kuruturuz ve kurutulan örneği tartarız. Islak ağırlığı (yarı doygun-sıvı ile doldurulmuş) ise 48 saat süre içerisinde bu sefer suyun içerisine bırakıp suda emilimini sağlarız ve bunu da havada tartarız. Daha sonra sudaki ağırlığı ile kuru ağırlığın farkını alıp bunu kuru ağırlığa oranlarız. Bunun sonucunda ise ağırlıkça su emme oranını bulmuş oluruz.

$$S_a = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \quad (2.14)$$

Kapiler Su Emme veya Kapilerite (Kılcallık) : Kılcallık, suyun serbest su düzeyi üzerindeki bölgeye kılcal kuvvet adı verilen kuvvetlerle yukarı doğru çekilmesi olayıdır. İçi su dolu bir kaba daldırılan ince bir boru (tüp) içerisinde suyun yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisinde yükselmesine benzer olarak, serbest yeraltı suyu kayacın boşluklarında yukarı doğru yükselir. Bu kılcal hareket su ile ortam arasındaki

yüzey geriliminin bir sonucudur. Bir tüp içerisindeki su kolonunun ağırlığı ile yüzeydeki çekme gerilmeleri dengeleninceye kadar kılcal çatlaklar içerisinde yükselecektir. Şekil 2.7’de Muğla-Kavaklıdere mermer örneğinin kapiler su emme seviyesi gösterilmiştir.

Kapiler yükselme miktarı kılcal boşlukların çapı ile ters orantılıdır. Kayaçlarda kılcal yükselim, boşlukların çapının aynı olmaması nedeniyle geniş bir aralık içinde değişir ve farklı çaptaki gözeneklerin birbiriyle irtibatından dolayı daha karmaşıktır. Kapiler su emme yüksekliğinin esas olarak küçük boşluklar tarafından kontrol edileceği düşünülebilir. Kayaçlarda boşlukların büyüklüğünü doğrudan ölçmek pratik olarak mümkün olmamaktadır. Ancak, boşluk çaplarının tane çaplarına ve taneler arası kenetlenme derecesine bağlı olarak değişeceği açıktır.



Şekil 2.7 : Kayaç örneğinin zamana bağlı olarak kapiler su emme seviyesi (Muğla-Kavaklıdere mermer örneği).

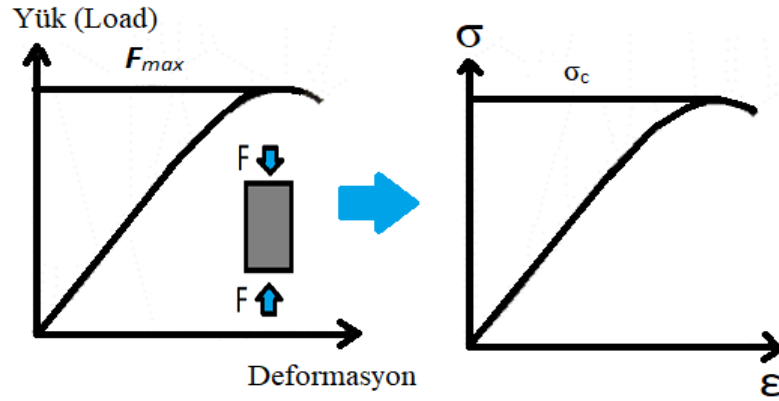
2.2.4 Mekanik özellikleri

Mekanik, cisimlerin hareketlerini ve denge durumunu inceleyen bir daldır. Burada malzemeye uygulanan kuvvete karşı verilen tepki önemlidir. Kayaçların mekanik davranışı uygulanan kuvvete karşı tepkisidir. Bu nedenle mekanik etkiye karşı koyma düzeyi dayanım ile bu etkiye nedeniyle oluşan deformasyon birlikte değerlendirilir. Dayanım özellikleri çekilme dayanımı, burulma dayanımı, makaslama dayanımı, sıkışma dayanımı ve bükülme (eğilme) dayanımı olmak üzere beş başlıkta incelenir. Deformasyon özellikleri ise rijit, elastik, plastik, elasto-plastik ve viskoz davranış şeklinde tanımlanmaktadır. Dayanım ve davranış arasındaki ilişkiler genellikle uygulamada önem kazanır.

2.2.4.1 Dayanım

Dayanım (direnç) maruz kalınan gerilmeler karşı koyabilmenin ölçüsüdür. Uygulanan gerilmelerin dayanımı aşması durumunda yenilme veya kırılma oluşur. Kayaçların dayanım özelliklerini beş temel esasta sıralamak mümkündür. Bunlar, başlıca olarak, basınç dayanımı, burulma dayanımı, bükülme (eğilme) dayanımı, makaslama dayanımı, çekme dayanımı şeklinde sıralanabilir. Kayaçların dirençleri malzeme özellikleri, yapıları ve çevresel etmenlere bağlıdır.

a) **Tek eksenli basınç deneyi (uniaxial compression test)** : Deneyde, kayanın tek yöndeki eksenel basınç gerilmesi uygulanması durumundaki dayanım ve davranışının belirlenmesi amaçlanır (Şekil 2.8). Burada amaç eksenel deformasyonun ölçülmesiyle dayanım ve deformasyon parametrelerini belirlemek, yenilme anına karşılık gelen gerilme değerini ölçmektir. Deneyde kullanılacak örneklerin özellikleri, yükleme ve ölçme sistemleri ulusal ve uluslararası standartlarda tanımlanmıştır [35].



Şekil 2.8 : Tek eksenli basınç deneyinden elde edilen davranış eğrisi.

$$\sigma_c = UCS = \frac{F_{max}}{A} \quad (2.15)$$

b.1) **Direkt (Doğrudan) çekme dayanımı** : Doğrudan veya direkt çekme dayanımının amacı eksenel gerilme sonucu oluşan gerilmelerin çekme dayanımlarını bulmaktır. Bunun için çatlaksız, üst ve alt yüzeylerinin paralel olması, boy/çap oranı 2.5-3 arası ve karot çapı 54 mm'den fazla numuneler üzerinde uygulanır. Tek eksenli sıkışma deneyinde olduğu gibi bu deneyde de hidrolik pres kullanılır. Numuneler beş dakikada bir yenilecek şekilde yükleme yapılır. Günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunun alternatifi olan endirek çekme dayanımı diğer adıyla brazilian çekme dayanımı kullanımı daha yaygındır.

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A} \quad (2.16)$$

b.2) Endirek (Brazilian) çekme dayanımı : Deneyin amacı çapsal yükleme altındaki dayanımını endirek olarak belirlemektir. Silindirik disk şeklindeki numunelerin boy/çap (D/L) oranı genellikle 0.5 ‘dir. Çapı NX (54-54.7mm) dir. Deney sonucunda elde edilen ve kırılma anına karşılık gelen yük (F) kullanılarak endirekt çekme direnci aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir.

$$\sigma_t = \frac{0.636 \times F}{DL} \quad (2.17)$$

2.2.4.2 Deformasyon

Deformasyon, kuvvetlerin etkisiyle (iç ve dış kuvvet) cismin orijinal şeklini veya boyutlarının değişiklik oluşması durumudur. Dış kuvvetler daha çok cismin dışına fiziksel olarak etki ederken, içsel kuvvetler ise manyetik ve yerçekimi gibi etkilerle cismin üzerinde etkilidir. Birim deformasyon (ϵ), gerilme (normal) etkisi sonucu cisimde meydana gelen birim uzunluk değişikliğidir. Gerilme etkisiyle iki tür deformasyon ortaya çıkar. Bunlar boyut ve şekil değişimleridir. Birincisi normal gerilmenin neden olduğu uzama veya kısılma, diğeri kesme gerilmesinin neden olduğu açısallı değişimdir. Birim boy değişimi (ϵ_y);

$$\epsilon_y = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{L} \quad (2.18)$$

Burada; ΔL cismin gerilmenin aktarıldığı yöndeki boy değişimidir. L_1 orijinal boy, L_2 ise deformasyon sonrası oluşan boydur.

$$\Delta L = L_1 - L_2$$

Örneğin çapında (D) oluşan birim deformasyon (ϵ_x) ise;

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \frac{\Delta D}{D} \quad (2.19)$$

$$\Delta D = D_1 - D_2$$

Gerilme, kısaca birim alana etki eden kuvvet olarak tanımlanır. Gerilmenin birimi; kgf/cm^2 , gf/m , tonf/m^2 , gf/cm^2 , N/m^2 vb. dir. Gerilmede önemli olan doğrultu, etki alanındaki düzlem, yön ve büyüklüktür. Kuvvet ise cismin hareketindeki değişim etkisidir. Kuvvetin yönü, büyüklüğü ve doğrultusu vardır. Birimi kgf , N , tonf , gf vb. dir. Kuvvet vektörel bir büyüklüktür. Kuvveti cisme etkisi ve yüzeye etkisi olmak üzere ikiye ayırırız. Yüzey kuvveti, cismin dışına uygulanan etkidir. İç kuvvet, cismin içine uygulanan cisme temas etmeden manyetik, yerçekimi vb. etkidir.

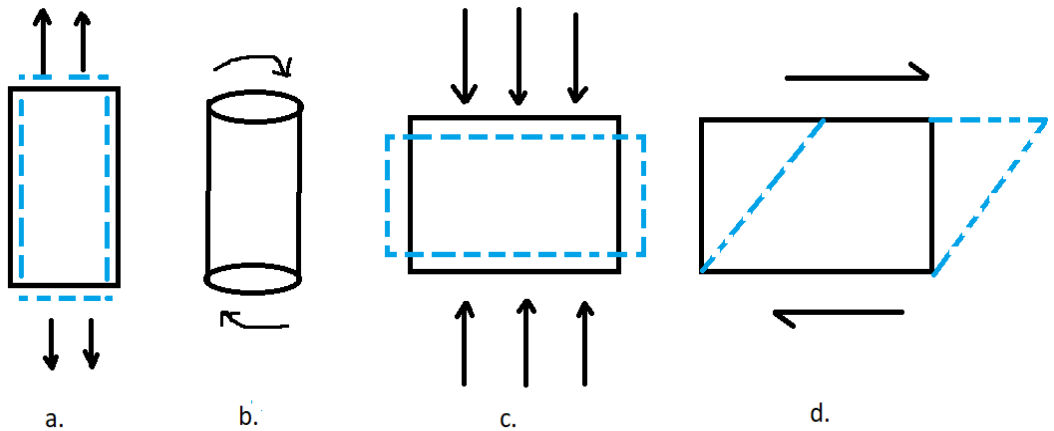
Gerilme türleri aşağıda alt başlıklar altında tanımlanmıştır.

Cekme (Tensile) Gerilmesi: Zıt yönlü ve aynı doğrultuda, etkime yüzeyinden uzaklaşan yönde uygulanan gerilmedir. Boy uzamasına sebep olur. Kaya mekaniğinde eksi/negatif (-) olarak alınır.

Burulma (Torsion) Gerilmesi: Cisme farklı iki noktadan dönme şeklinde etki eden gerilmedir.

Basınç (Compressive) Gerilmesi: Etkime yüzeyine dik ve basınç oluşturacak şekilde etkiyen normal gerilmedir. Bunun sonucunda gerilmenin aktarıldığı aksenal yönde cismin boyunda kısalma meydana gelir. Kaya mekaniğinde artı/pozitif (+) olarak alınır.

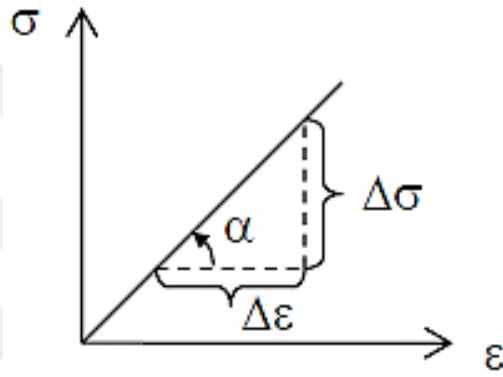
Makaslama (Shear) Gerilmesi: Zıt yönlü ve aynı doğrultuda, yüzeye paralel yönde etki eden gerilmedir. Şekilde değişime neden olur.



Şekil 2.9 : Gerilme türleri (a: Çekme, b: Burulma, c: Basınç, d: Makaslama).

Elastisite (Young's) Modülü (E) : Kusursuza yakın muntazam cisimlerde deformasyon, gerilmenin, lineer bir fonksiyonudur. Burada elastik olan malzeme yüke karşı anında bir tepki verir ve uygulanan yük ortadan kaldırıldığında, oluşan deformasyonlar geri döner. Bu sebeple deformasyon ile gerilme arasındaki ilişkiler mekanik davranışların tanımlanmasında kullanılır. İdeal elastik cisimler için bu lineer davranış Hooke yasası/kanunu ile tanımlanmıştır. Davranışı tanımlayan doğrunun eğimi elastisite modülü (E) olarak tanımlanır.

$$E = \tan \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (2.20)$$

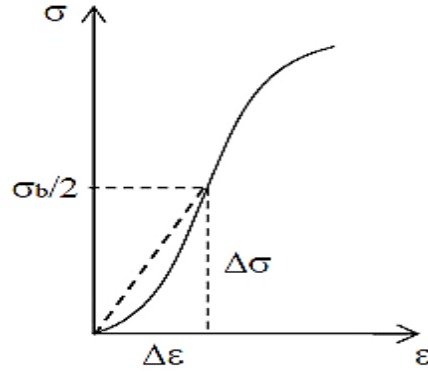


Şekil 2.10 : Hooke cisminin gerilme-deformasyon ilişkisi.

Sert ve sağlam malzemelerin elastisite modülü genellikle yüksektir. Diğer bir ifade ile dayanımı olan malzemelerin elastisite modülü de yüksektir. Yoğun, kristalize, çok sert ve boşluksuz metamorfik ve magmatik kayalarda genellikle bu davranışı gösterirler.

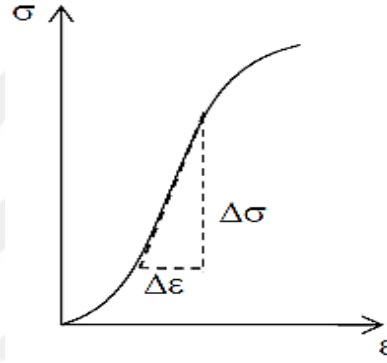
Genellikle, gevrek kayalarda, yüklemenin başlangıcından kırılma noktasına doğru gerilme-deformasyon eğrisinde farklılaşma söz konusudur. Bu nedenle, farklı elastisite modülü tanımlamaları yapılmaktadır. Bunlar eğrinin başlangıcından itibaren, kiriş, tanjant ve sekant elastisite modülü olarak tanımlanır.

Kiriş (sekant) elastisite modülü (Es) : Grafikte gerilme-birim deformasyon eğrisi 0 'dan tek eksenli basma dayanımının yarısına (%50) gelecek şekilde bir gerilme değeri seçilir. Seçilen bu gerilme değeri grafikte doğru şekilde paralel şekilde uzatılır ve yatay eksendeki karşılığı bulunur. Daha sonra bulunan noktadan da dikey eksene paralel doğru çizilir. Buradan orijinden bu iki noktanın birleştiği yere bir doğru çizilir ve buranın eğimi alınır.



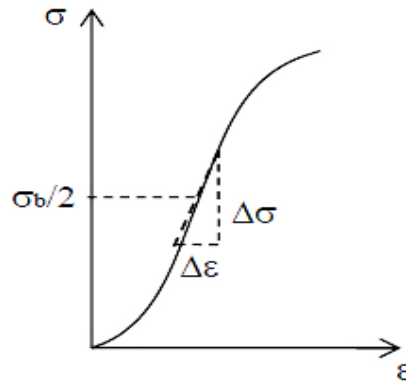
Şekil 2.11 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi kiriş (sekant) elastisite modülünü belirleme yöntemi.

Ortalama elastisite modülü (E_{av}) : Gerilme-birim deformasyon eğrilerinin doğrusal şekli bize ortalama elastisite modülünü verir.



Şekil 2.12 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi ortalama elastisite modülünü belirleme yöntemi.

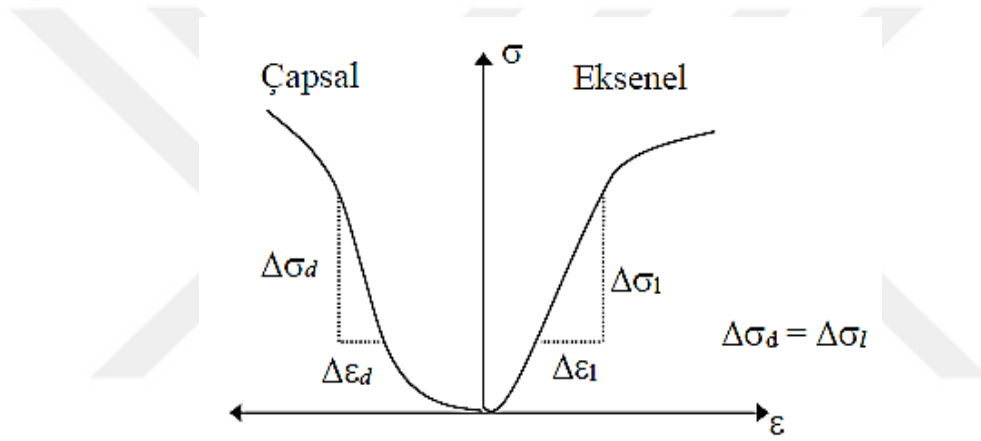
Teğet (tanjant) elastisite modülü (E_t) : Öncelikle grafik çizilir. Grafikte gerilme-birim deformasyonu orijinden tek eksenli basma dayanımının yarısına kadar olan kısmı (%50) 'sinden bir değer alınır. Yatay eksene paralel şekilde doğru çizilir. Buradaki eğriye teğet olan kısmın (doğrunun) eğimi alınır.



Şekil 2.13 : Gerilme-birim deformasyon eğrisi teğet (tanjant) elastisite modülünü belirleme yöntemi.

Poisson Oranı (v) : Gerilme etkisi sonucunda yatay yönde oluşan birim deformasyon ile düşey yönde oluşan birim deformasyon arasındaki oran Poisson Oranı olarak tanımlanır. Çekme kuvvetleri ve basınç kuvvetleri malzemenin şeklinin yanal ve eksen boyunca değişmesine neden olur. Yüksek değere sahip malzemede yanal birim deformasyon daha fazladır. Yumuşak kayalarda yüksek, sert kayalarda düşük değere sahiptir. Kayalarda Poisson oranı ve elastisite değerleri Çizelge 2.2 'de verilmiştir. Mermerlerde ortalama Poisson oranı 0.11 - 0.38 değerleri arasındadır [9]. Poisson oranı hesaplaması aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$v = - \frac{\Delta \varepsilon_d}{\Delta \varepsilon_y} \quad (2.21)$$



Şekil 2.14 : Gerilme-birim deformasyon eğrisinden hareketle elastisite modülü ve Poisson Oranı'nın belirlenmesi.

Çizelge 2.2 : Kayalarda Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri [9].

Kaya Sınıfı	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı (v)
Granit	21.3 - 70.5	0.12 - 0.34
Kumtaşı	4.9 - 84.3	0.07 - 0.30
Mermer	28 - 100	0.11 - 0.38
Kuarsit	25.5 - 97.5	0.11 - 0.23
Şeyl	7.8 - 44	0.10 - 0.50
Şist	40 - 70.5	0.08 - 0.20
Gyans	14.2 - 58.8	0.09 - 0.25

*Bu aralıklar kayaların özelliklerinin yaklaşık değerleri hakkında fikir edinilmesi amacıyla verilmiştir. Aynı petrografik isme sahip olmasına rağmen, bu aralıkların dışında değerlere sahip kayalar mevcuttur.

Kayma (rijidite) modülü (G) : Kayma modülü makaslama modülü olarak da ifade edilir. Makaslama gerilmesi ile birim makaslama deformasyonu arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Kayma modülü kayacın madde özellikleri ve çevre koşulları ile ilişkilidir. Birimi ise gerilme birim ile aynıdır (kgf/cm², N/mm², kN/mm²).

Kayma (rijidite) modülünün, Poisson oranı ve elastisite modülü ile olan ilişkisi;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.22)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Sıkışabilirlik (Bulk) Modülü (K): Hooke kanunu yalnızca farklı basınç ve çekme gerilmeleri halinde değil, hidrostatik ve kesme gerilmeleri için de geçerlidir. Hidrostatik gerilmeler altında tutulan bir birim hacim elemanında δP basınç değişimi ile, δv hacim değişimi oluyorsa;

$$K = V \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.23)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.24)$$

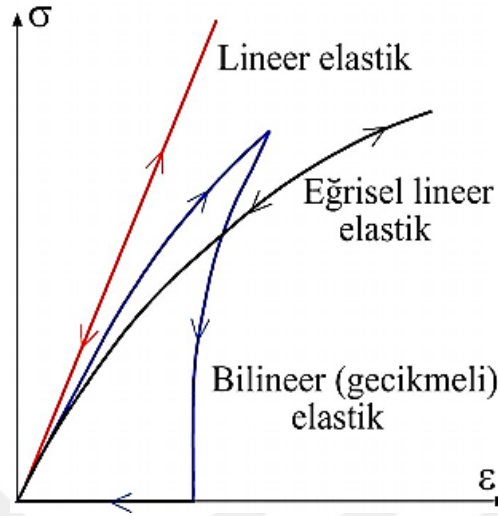
2.2.4.3 Kayaçların davranışları

Kayaç malzemeleri farklı çevresel koşullarda farklı davranışlar gösterir. Kayaç özellikleri davranış üzerinde belirleyicidir. Kayaçlarda karşılaşılan başlıca davranış türleri; Rijit, elastik, elasto-plastik, plastik ve viskoz davranış türleridir. Farklı koşullarda karma davranış gösterirler.

Rijit davranış: Rijit katı davranış özelliği gösterir. Bu tür davranışlarda herhangi bir deformasyon meydana gelmez. Ayrıca şekil değişikliği de olmaz.

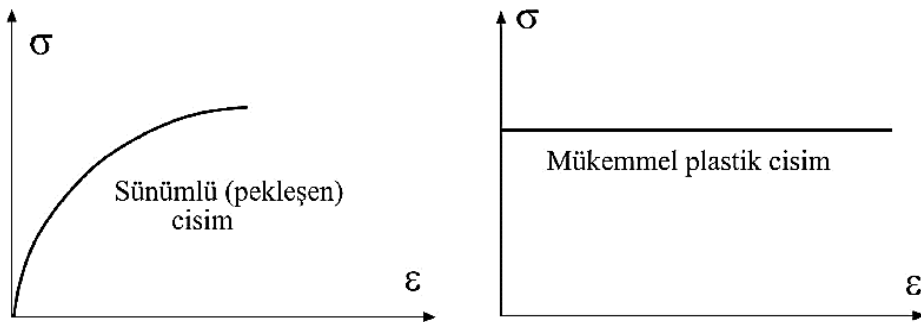
Elastik davranış: Malzemeye herhangi bir yük bindiğinde bu yük karşısında malzemede şekil değişikliği oluyorsa ve gerilmelerini de kaldırdığımızda malzeme tekrardan eski halini alıyorsa bu davranışa elastik davranış deriz. Elastik davranışlarda doğrusal elastik davranış, doğrusal olmayan elastik davranış ve mükemmel elastik davranış diye bölümlere ayrılmaktadır. Eğer malzeme yükleme ve boşalma sonrası çakışma meydana geliyorsa mükemmel elastik malzemedir. Bu doğrusal şekilde oluyorsa doğrusal elastik davranıştır. Malzeme yükleme ve boşalma sırasında farklı

yollarla deformasyon kazanımı meydana geliyorsa bu malzemelerde doğrusal olmayan elastik davranış gösterir. Mükemmel elastik davranışa sahip malzemeler lineerdir.



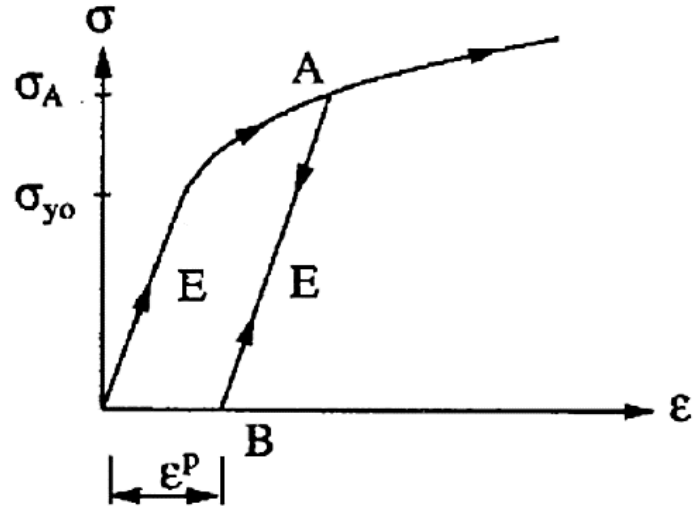
Şekil 2.15 : Elastik davranışa sahip malzemelerin davranış özelliklerini gösteren grafik.

Plastik davranış: Elastik davranışı geçtiğimiz anda plastik davranış başlar. Gerilmeler kaldırılınca şekil değişime devam eder. Uzun süre akma davranışı gösteren cisimler sınırlı hareket gösterir. Gerilmeler belirli bir seviyeye geldiğinde deformasyonlar kalıcı hale gelir. Bu aşamada malzeme son halini alır ve şekildeki değişim kalıcı hale gelmiş olur. Gerilmeler sabit kaldığında deformasyon sürekli artarsa bu cisimler mükemmel plastik özellik gösterir.



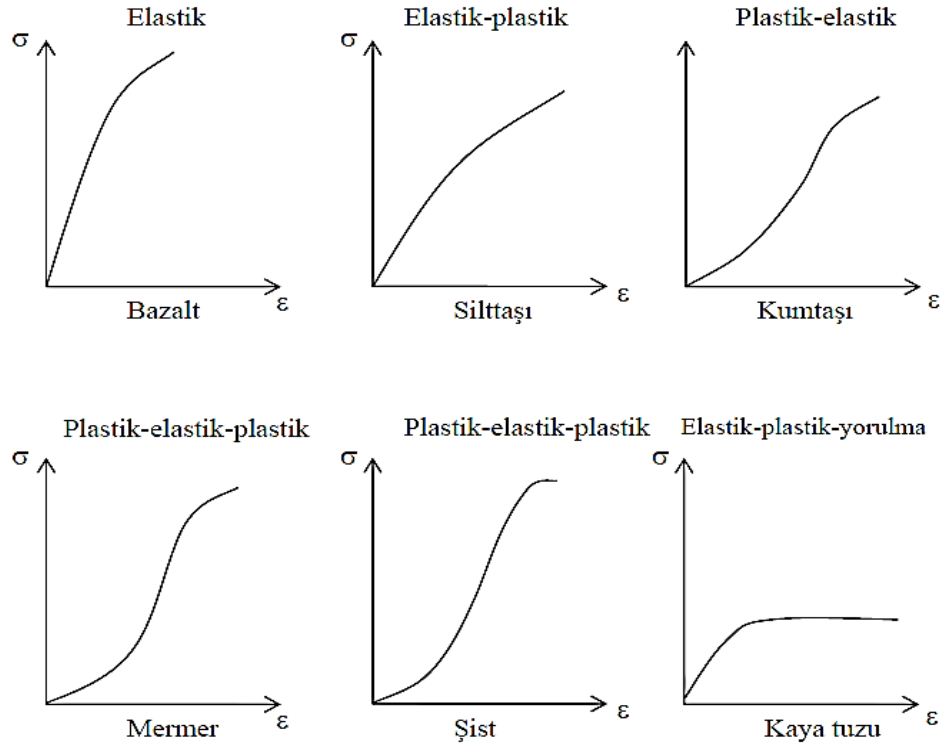
Şekil 2.16 : Plastik davranışa sahip malzemenin eğrisi.

Elasto-plastik davranış: Malzemenin elastik davranışı ile plastik davranışı arasında kalan geçiş bölgesidir. Malzemenin yük karşısında önce şeklinde bir değişim meydana gelir daha sonra uzun süre akma davranışı gösterir ve belirli bir hale geldikten sonra sabit kalır. Eğer bu malzeme muntazam şekilde hem elastik hem de plastik özellik gösteriyorsa bu tür malzemeler muntazam elasto-plastik malzeme adını alır.



Şekil 2.17 : Elasto-plastik özellik gösteren malzemenin davranışının grafik ile gösterimi.

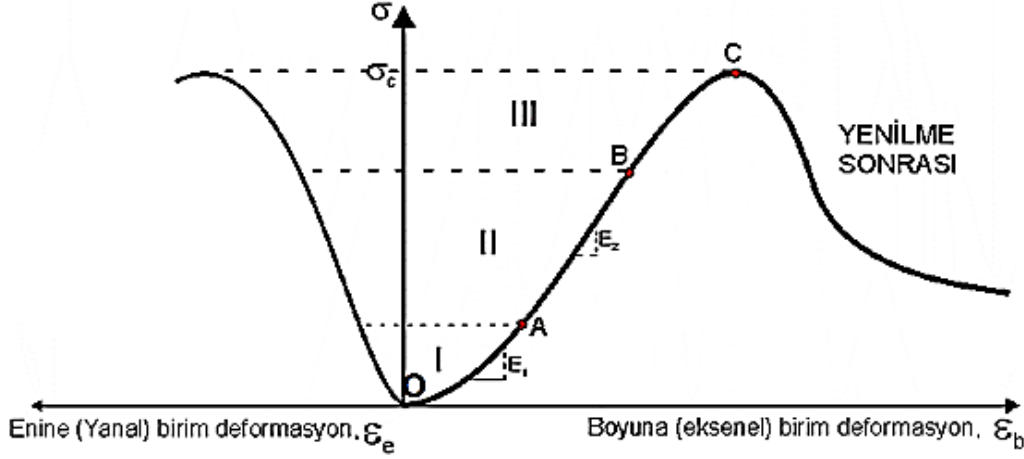
Viskoz davranış: Gerilmelerin sabit olduğu, zamana bağlı olarak akışkan/sıvı özellik gösteren kalıcı deformasyonlardır. Bu tür davranışlar katı ile sıvı özellik arasında yer alır. Viskoz davranışa sahip malzemeler zamanla şekil değiştirirler.



Şekil 2.18 : Farklı kayaçlardaki gerilme-birim deformasyon davranışlarının grafikte gösterimi.

2.3 Gerilme-Deformasyon Eğrisinin Yenilme Öncesi ve Sonrası Durumu

Kayaç malzemesinin göstermiş olduğu davranış eğrisi bölgelere ayrılarak (yenilme öncesi) ve yenilme sonrası incelenmektedir.



Şekil 2.19 : Kayaçlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisinin gösterimi [10].

I. Bölge : Kayaç malzemesindeki çatlaklı kısımların yükleme sonucu kapandığı yerdir. Elastik modül (E_1) düşüktür. Deformasyon fazladır.

II. Bölge : Bu bölgede deformasyon eğrisi doğrusal elastik davranış gösterir. Burada yanal uzamadan ziyade boy kısalması daha etkin rol oynamaktadır.

III. Bölge : Kayaç elastik davranış durumundan plastik davranış durumuna geçer (BC bölgesi). Kayacın içerisinde fissür gelişiminin başladığı ve geliştiği bölgedir. Kayaç malzemesinde hacimce artış meydana gelir. Kayaç yenilme gösterdiği anda bu davranış biçimi sona erer (C bölgesi).

Yenilme sonrası : Kayacın direncinin aşılmasına bağlı olarak gevrek kayaçlarda kırık oluşur. Yenilme sonrası eğrinin gidişatı kayacın gevreklik modülü ile ilişkilidir.

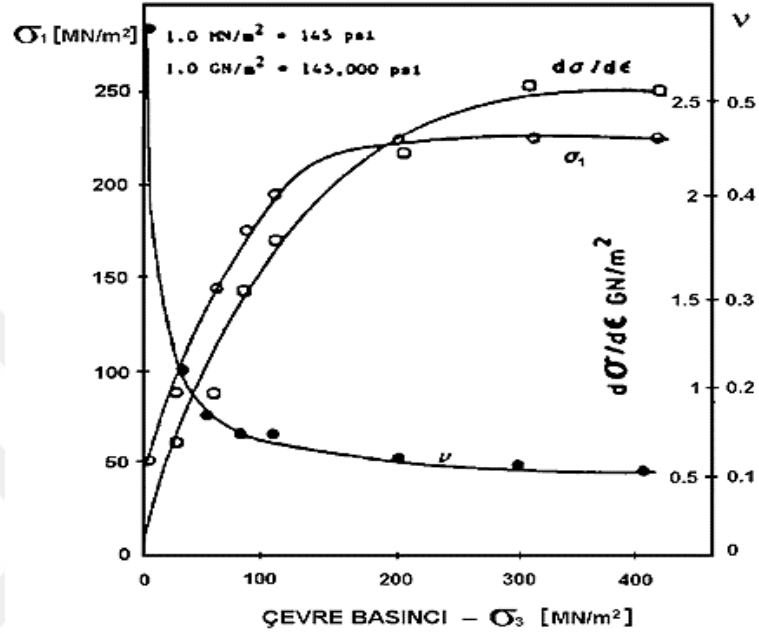
2.4 Kayacın Davranışını Etkileyen Çevre Koşulları ve Madde Özellikleri

Kayaç davranışı çevre parametreleri ve madde özellikleri ile ilişkilidir. Çevre basıncı (confining pressure), sıcaklık, boşluk suyu basıncı, zaman, minerolojik bileşim ve yönsellik (anizotropi) hem dayanım, hem de davranış üzerinde etkilidir.

2.4.1 Çevre Basıncı

Kayacın elastisite modülü ve dayanımının çevre gerilmesine bağlı olarak arttığı bugüne kadar yapılan çok sayıda çalışma sonucundan iyi bilinmektedir. [45] yüksek

çevre gerilmeleri altında mermerler üzerinde yaptığı üç eksenli deneylerden çevre gerilmesinin artmasına bağlı olarak Poisson oranının da arttığını saptamıştır (Şekil 2.20). Şekilden de izlendiği gibi σ_3 ün 4000 kg/cm^2 olması durumunda Poisson oranı (ν) 0.5 olmaktadır. Şekilde kullanılan veriler % 1 lik aksenal deformasyona karşılık gelen değerler olup modül olarak sekant elastisite modülü dikkate alınmıştır.



Şekil 2.20 : Çevre gerilmesine bağlı direnç (σ_1), sekant elastisite modülü ve Poisson oranının (ν) değişimi (Grafikte kullanılan değerler % 1 lik aksenal deformasyona karşılık gelmektedir) [45].

[46] granüle edilmiş mermer ve [47] çatlaklı andezit üzerinde yaptıkları deneylerde çevre gerilmesine bağlı olarak elastisite modülünün arttığını saptamışlardır.

2.4.2 Sıcaklık

Deneyisel çalışmalar, genelde sıcaklığın kayacın mekanik davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir [48,49,50,51,52]. Sıcaklığın artmasıyla gevrekten plastik davranışa geçişi temsil eden kayacın sünümlülüğü artmakta ve maksimum direnci önemli oranda azalmaktadır. Yer kabuğunun sığ kesimlerinde sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi çoğunlukla lokal nitelikler gösterir. Kayacın mekanik davranışını etkileyen sıcaklıklar kabuğun derin kısımlarına karşılık gelmektedir. Bu nedenle mühendislik çalışmalarının yoğun olduğu sığ derinliklerde sıcaklığın kayacın davranışı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı ortak bir kanı oluşturmaktadır.

2.4.3 Boşluk Suyu Basıncı

[53] kumtaşı ve kireçtaşı örnekleri üzerinde yaptığı üç eksenli deneylerle ilk kez TERZAGHI ‘nin zeminler için önerdiği efektif gerilme eşitliklerinin Denklem 2.25, 2.26 ve 2.27 ’de kayaç için de geçerli olduğunu göstermiştir. Daha sonra [54], [55], [56], [57] boşluklu kayaç örnekleri üzerinde yaptıkları deneylerde benzer sonuçları elde etmişlerdir. Permeabilite ve porozitesi düşük kayaçlar için sonuçların tartışılır olduğu bilinmektedir. [58] yükleme hızının çok düşük olması ve kayaçtaki boşlukların yeterince birbiriyle ilintili olması halinde yukarıda verilen eşitliklerin kayaya uygulanabilir olduğu görüşündedir.

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (2.25)$$

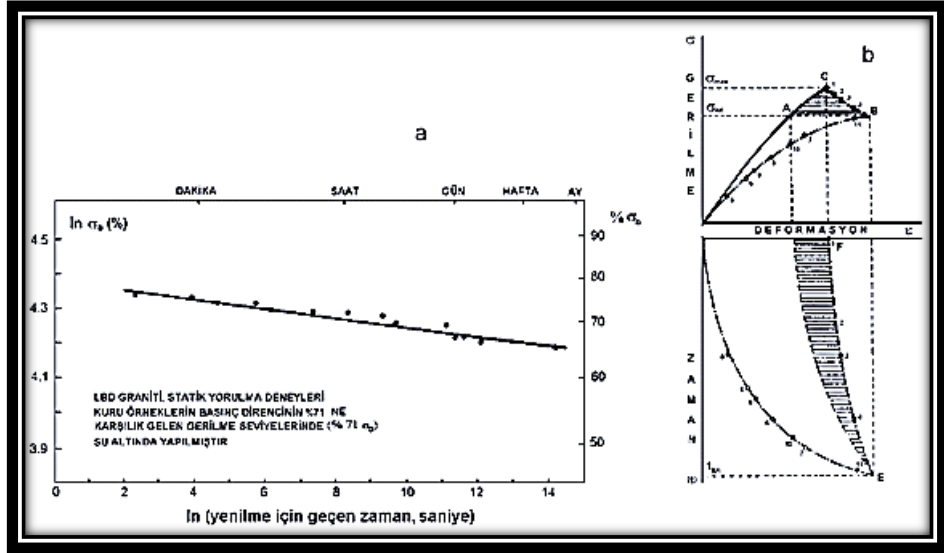
$$\sigma'_2 = \sigma_2 - u \quad (2.26)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (2.27)$$

Burada $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ sırasıyla efektif, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ toplam asal gerilmelere ve u boşluk suyu basıncına karşılık gelmektedir.

2.4.4 Zaman

Kaya mühendisliğinde istenmeyen deformasyonlar, patlatma ve depremler süresince ani, ekonomik, stratejik ve ulaşım amaçlı tünel, geniş açıklıklı yeraltı odası, yeraltı depolama tesisi ve galeri gibi yeraltı açıklıklarında, uzun bir zamanda meydana gelebilmektedir. Laboratuarda sağlam kaya örnekleri üzerinde yapılan deneyler yükleme, deformasyon hızının kayacın kırılma direnci, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi özelliklerini etkileyen bir diğer parametre olduğu sonucuna varılmıştır [59,60,61,62,63]. [60] ve [61,62] kuru haldeki tek eksenli basınç direncinden relatif olarak daha düşük statik gerilme seviyeleri için zamana bağlı laboratuvar yorulma deneyleri (static fatigue tests) yapmışlardır. [60] zamana bağlı direnç düşümünü “direnç düşüm eğrisi” ve “ kritik kırılma direnci” kavramlarıyla tanımlamıştır (Şekil 2.21). [61] suya doygun Luc du Bonnet graniti ve Beebe anortoziti üzerinde tek eksenli statik yorulma deneyleri yapmış ve sonuçta zamana bağlı olarak kırılma direncinin, maksimum direncin % 40 oranında azaldığını saptamıştır.



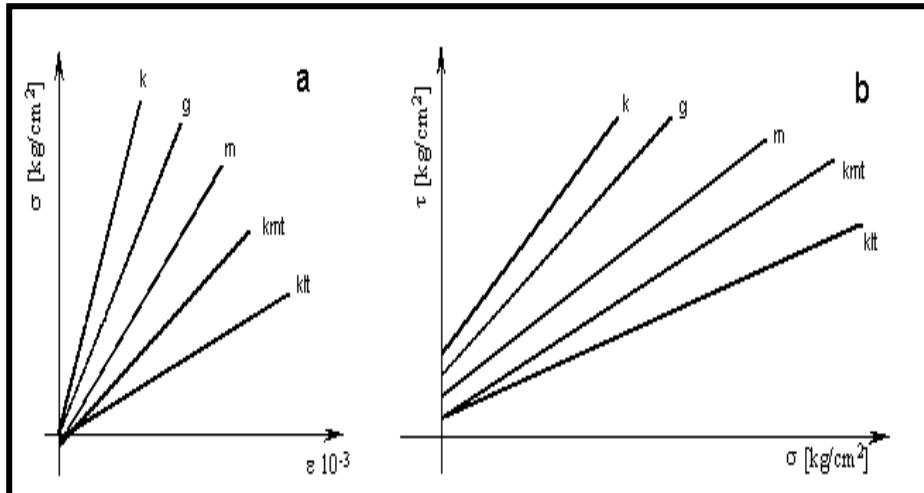
Şekil 2.21 : Yükleme hızının kayanın mekanik davranışı üzerindeki etkileri a) Luc du Bonnet granitinin statik yorulma eğrisi (statik gerilme kuru haldeki basınç direncinin % 71 olarak alınmıştır) [61], b)Yükleme süresine bağlı direnç düşüm eğrisi ve kritik kırılma direnci [60].

2.4.5 Yönsellik (Anizotropi)

Kayaçtaki tabakalanma, yapraklanma ve akım yönü özellikleri yükleme yönüne göre durumu kayacın yönsellik derecesini etkiler. Yükleme yönüne paralel ya da dik olması kayadaki dayanımı etkiler. Örneğin; bir kaya dik yüklenmişse dayanımı daha yüksek olur. Genellikle en düşük dayanım 25-45° eğimli durumda ortaya çıkar.

2.4.6 Mineralojik Bileşim

Kayaçların direncini ve davranışını etkileyen madde özellikleri tane boyutu, mineralojik bileşim ve kayacın mikroyapısıdır [64].



Şekil 2.22 : Mineralojik bileşimin kayacın davranışı (a) ve kırılma koşulu (b) üzerindeki etkisi. Kuvarsit (k), granit (g), mermer (m), kumtaşı (kmt) ve kıltaşı (klt) simgeleriyle gösterilmiştir [65].



3. YENİLME ÖLÇÜTLERİ

3.1 Teorik Yöntemler

Teorik yöntemler dört ana başlık altında incelenecektir. Bunlar; Griffith ölçütü, Tresca ölçütü, Von Mises ölçütü ve Mohr-Coulomb ölçütüdür.

3.1.1 Griffith ölçütü

Yenilme ölçütleri içerisindeki en eski yöntemlerden biridir. Çoğu ölçüt bundan türetilmiştir. Çekme dayanımını baz almaktadır. Griffith ölçütünde, malzemeye çekme gerilmesi uygulandığında malzemenin içerisinde bulunan mikro çatlaklarda büyük gerilmelerin olduğunu varsaymıştır. Çekme gerilmesi eğer çekme dayanımı seviyelerine ulaşırsa çatlağın oluşumunun başladığını bu çatlakların da yayılması sonucu yenilmeye sebep olduğunu varsayar.

Ölçütteki asal gerilmeler arasındaki ilişkiler aşağıdaki şekildedir:

$$\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \text{ ise ; } (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3.1)$$

$$\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \text{ ise ; } \sigma_3 = -\sigma_t \quad (3.2)$$

Ölçütteki normal gerilmeler ile kesme gerilmesi arasındaki ilişki ise ;

$$\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma + \sigma_1) \quad (3.3)$$

şeklindedir.

3.1.2 Tresca ölçütü

Bu ölçüte göre malzemede akma olması için maksimum kayma gerilmesinin akma halindeki kayma gerilmesi ile aynı seviyede olması veya daha büyük olması ile mümkündür. Bu ölçüt aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = s_1 - s_3 = \sigma_0 \quad (3.4)$$

Burada; s_1 ve s_3 değerleri asal gerilmedeki sapmaları vermektedir. Yalnız kayma malzemesinde bu ölçüte pek rastlanılmaz. Daha çok metaller için kabul edilen ölçüttür.

3.1.3 Von Mises ölçütü

Bu ölçütte gerilme sapma sabitini eş değer alırız. Çok eksenli gerilmeden, tek eksenli gerilmeye geçişte sabit değer alınır.

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3)]} \quad (3.5)$$

eşitliği ile elde edilir. Bu ölçüt çatlaklar ile ilgili yapılan bazı deneylerde kullanılmaktadır.

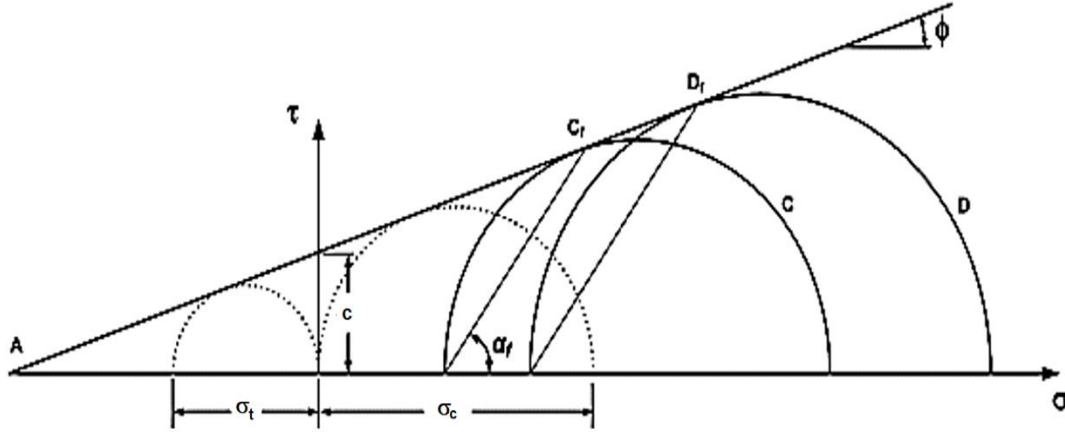
3.1.4 Mohr-Coulomb ölçütü

Aslında Mohr-Coulomb ölçütü günümüzde pratikte en yaygın kullanılan ölçüttür. Yalnız bu iki bilim insanının analitik ve grafik yöntemle aynı kırılma ölçütleri ile analiz etmiştir. Kesme dayanımı üzerine dayandırılan ölçütte, yenilmenin oluşabilmesi için makaslama gerilmelerinin dayanımı aşması gerekir. Maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla σ_1 ve σ_3 simgeleri ile ifade edilmektedir.

Kayayı etki eden asal gerilmeler, kayaçtaki basma ya da çekme dayanımını aşarsa yenilme meydana gelir. Matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (3.6)$$

τ : Kesme dayanımı , σ_n : Normal gerilme , c : Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı



Şekil 3.1 : Mohr-Coulomb yenilme ölçütü, Mohr doğrusal yenilme zarfı [11].

Tüm normal gerilmeler sıkıştırıcı etkiye sahip olduğunda, deneyler sonuçlar bu ölçütün kayaç malzemesine uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak tek eksenli basınç dayanımının, tek eksenli çekme dayanımından çok daha büyük olduğu için yenilme zarfının çekme tarafındaki uzantısı için bazı düzeltmelerin yapılmasını gerektirir. Son yıllarda yapılan modifikasyonla, çekme dayanımı τ eksenine paralel çekme tarafında tension cut-off çizgisiyle sınırlandırılmıştır [66,67].

Mohr koşulu, yenilmenin sadece σ_1 ve σ_3 'e bağlı olduğu varsayımına dayanır ve yenilme-kırılma zarfı, yenilme anında oluşan düzleme dik etki eden σ_θ ve paralel etkiyen τ_θ gerilmeleri arasındaki ilişkinin doğrusal olup olmayacağına dayanır [11].

Coulomb koşulu ise, bazı düzlemlerde yenilmeye neden olacak kritik kombinasyonu belirlemek için doğrusal bir yenilme zarfı öngörmektedir [12].

Bu hipotez, maksimum kesme dayanımı hipotezinin genelleştirilmiş halidir. Kırılmada etkili olan büyüklük kesme (kayma) direncidir. Kesme direncini ise denetleyen en önemli parametrelerin yüzeyin içsel sürtünmesi ve taneler arasın yapışma direncidir.

Asal gerilmeler cinsinden Mohr-Coulomb yenilme ölçütü aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \cdot \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.7)$$

Yenilme düzlemine etkiyen normal (σ_θ) ve teğetsel (τ_θ) gerilmeleri ise;

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\theta \quad (3.8)$$

$$\tau_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\theta \quad (3.9)$$

$$\theta = (45 - \phi/2) \quad (3.10)$$

3.2 Görgül (Ampirik) Yöntemler

Görgül (ampirik) yöntemler dört ana başlık altında incelenecektir. Bunlar; Franklin ölçütü, Kim-Lade ölçütü, Bieniawski ölçütü ve Hoek ve Brown ölçütüdür.

3.2.1 Franklin ölçütü

Franklin, üç eksenli basınç etkisinin doğasını ve amaçlarını tanımlamak, bunların seçiminde ve kullanımında dikkate alınması gereken bazı faktörleri ana hatlarıyla belirlemek için bir girişimde bulunmuştur. Mukavemet (dayanım) parametrelerinin kolayca tahmin edilebilmesi için önermiş olduğu ölçütün olabildiğince basit olması ve böylece denklemlerin tasarım hesaplamalarında kullanıldığında da zorluk çıkarmamasına yönelik bir yol izlemiştir. Bunların ışığında aşağıdaki parametreleri belirlemiştir. Matematiksel olarak ifadesi şu şekildedir:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = A \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)^B \quad (3.11)$$

A, B : Ampirik eğri parametreleri

3.2.2 Kim-Lade ölçütü

Bu ölçüt ise üç farklı etkin temel gerilmeye maruz kayaçların yenilmesini açıklar. Malzeme parametrelerinin ve yenilmenin iki ana gerilimini bilerek yenilmedeki gerilmelerin değerlendirilmesini baz alır. Kim-Lade yenilme ölçütü başlangıçta çok düşük ya da kohezyonsuz zeminler için geliştirilmiştir. Bu ölçüt için geliştirilen formülün matematiksel olarak ifadesi şu aşağıdaki gibidir.

$$\left(\frac{l_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left(\frac{l_1}{P_a} \right)^m = n_1 \quad (3.12)$$

$$l_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.13)$$

$$l_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \quad (3.14)$$

P_a : Atmosferik basınç , m ve n_1 : Regresyon analizlerinden elde edilen parametreler

3.2.3 Bieniawski ölçütü

Bieniawski ölçütü, temel yapılarda, tünellerde, şev ve yeraltı açıklıklarının değerlendirilmesi ve kayanın taşıma gücünün belirlenmesi için önerilmiştir [13]. Bieniawski ölçütünün matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_c} = 0.1 + \beta \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_c} \right)^\alpha \quad (3.15)$$

α : Dayanım yüzeyinin eğriliği (0.85-0.93), β : Zarfın pozisyonu (0.7-0.8)

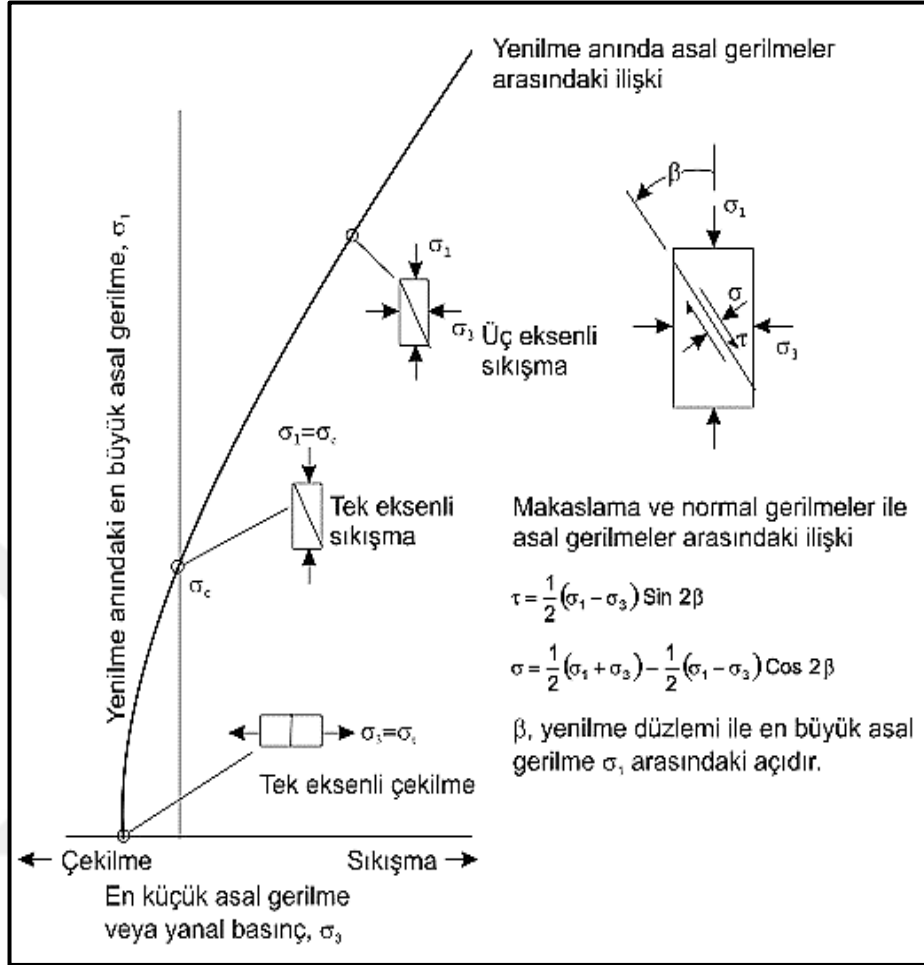
3.2.4 Hoek ve Brown ölçütü

Hoek ve Brown ölçütü, kaya kütlesi için dayanımın amaçlaması bakımından önemli araştırma ve deneyimlere dayanan ampirik bir ölçüttür [6]. Buna binaen bu araştırmacılar laboratuvarında yapmış oldukları deneylerin verilerini, kayacın davranışlarını ve yenilmeyi teorik olarak irdelemiş ve aşağıdaki ampirik eşitliği önermişlerdir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte, m ve s kayaç özelliklerine bağlı önerilmiş değişken parametrelerdir. Bu parametreler, Mohr-Coulomb ölçütündeki içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi

bağımsız parametrelerinin karşılığıdır. (Örneğin; parçalanmış kaya için $s=0$, $m=m_r$ sağlam kaya malzemesi için $s=1$, $m=m_i$ dir).



Şekil 3.2 : Hoek ve Brown yenilme ölçütünün ampirik şekilde gösterimi [6].

“m” ve “s” parametreleri için kayada herhangi bir çatlak var ise yukarıdaki eşitlikten yola çıkarak “m_r ve “s_r” değerleri bilinmesi durumunda, çatlaklı kayaç kütesinin tek eksenli basınç ve çekme dayanımlarının aşağıdaki eşitliklerle belirlenebileceği belirtilmiştir.

$$\sigma_{cr} = \sigma_c \cdot \sqrt{s_r} \quad , \quad \sigma_{tr} = \frac{\sigma_c}{2} [m_r - \sqrt{(m_r^2 + 4s_r)}] \quad (3.17)$$

Ölçüt kapsamında, sınırlı sayıdaki bazı kaya malzemeleri için “m_i” değerleri verilmiştir. Bunlar Çizelge 3.1 ’de gösterilmiştir. Ayrıca [14] tarafından belirlenen bazı kaya türleri için “m_i” sınıflaması Çizelge 3.2 ‘de gösterilmiştir.

Hoek ve Brown yenilme ölçütü ile ilgili açıklamalar bu bölümde kısa tutulmuştur. Ayrı bir başlık altında Hoek ve Brown yenilme ölçütünün, tarihsel gelişimi ve günümüzdeki durumu bir sonraki bölümde ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Çizelge 3.1 : Hoek ve Brown tarafından bazı kaya grupları için önerilen “m_i” değerleri [15].

Kaya grupları ve tipik türler	Hoek ve Brown (1980) m _i	Betournay ve diğer. (1991) m _i
İyi gelişmiş kristal klivajı gösteren karbonatlı kayaçlar: Dolomit, Kalker, Mermer, vb.	7	7,5
İnce taneleri çimentolanmış tortul kayaçlar: Çamurtaşı, Kiltası, Silttaşı, Şeyi, vb. (tabakalanmaya dik)	10	7,3
İnce taneleri çimentolanmış, yüksek dayanımı olan kristalli, az gelişmiş klivaj gösteren tortul kayaçlar: Kumtaşı, Kuvarsit, vb.	15	13,5
İnce taneli, çok mineralli, magmatik kristalin kayaçlar: Andezit, Dolerit, Diyabaz, Riyolit, vb	17	3,3
İri taneli, çok mineralli, magmatik ve metamorfik kristalin kayaçlar: Amfibolit, Gabro, Gnays, Granit, Norit, Kuvarsdiorit, vb	25	9,5

Çizelge 3.2 : Hoek ve Diğerleri tarafından önerilen bazı kaya türleri için “m_i” değerleri [14].

Tane Boyutu	TORTUL			METAMORFİK		MAĞMATİK		
	Karbonat	Kırıntılı	Kimyasal	Karbonat	Silikat	A. renkli	Koyu renkli	
İri	Dolomit 10,1	Konglom. 20		Mermer 9,3	Gnays 29,2	Granit 32,7	Gabro 25,8	Norit 21,7
Orta	Tebeşir 7,2	Kumtaşı 18,8	Çört 19,3		Amfibolit 31,2		Dolerit 15,2	
İnce	Kalker 8,4	Silttaşı 9,6	Jips 15,5		Kuvarsit 23,7	Riyolit 20	Andezit 18,9	Bazalt 17
Çok ince		Kiltası 3,4	Anhidrit 13,2		Sleyt 11,4			

4. HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜNDE YAPILAN DEĞİŞİKLİKLER

4.1 Tarihsel Gelişim

Kayalar küçük boyutlarda incelendiğinde kaya malzemesi burada önem arz ederken, uygulamanın boyutları kademeleri olarak arttığında ise sağlam kaya malzemesinden, çatlaklı/eklemlili/gevşek kaya kütlelerine doğru geçiş görülür (Şekil 2.3). Bundan dolayı süreksizlikleri olan kaya kütlelerinin dayanımları ve davranışları hem kaya malzemesinin hem de süreksiz özelliklerinin birlikte dikkate alınmasını gerektirir. Hoek-Brown yenilme ölçütünde bu esaslar dikkate alınmaktadır. Ancak, bu şekilde oluşmuş ortamlardan, kaya malzemeleriyle beraber süreksizlikleri de barındıran ve metrelerce boyutlara ulaşan kaya kütleleri örneklerinin alınması ve deneye tabi tutulması pratik açıdan mümkün değildir. Ayrıca, bu tür örnekler için laboratuvarında üç eksenli deney düzeneklerinin oluşturulması önemli bir diğer problemidir. Diğer taraftan, bu problemlerin aşılması ve çatlaklı kayanın davranış ve dayanımının açıklanması amacıyla, kaya kütlelerine fiziksel benzetim modelleri konusu ile ilgilenen araştırmacıların sıklıkla tercih ettiği yöntemler arasındadır.

Ancak, seksenli yılların ilk çeyreğinde geliştirilmiş ve günümüze değin farklı değişiklikler yapılmış olan Hoek-Brown yenilme ölçütü uygulamada geniş yer bulmuştur. Hoek-Brown ölçütü ampirik bir ölçüt olmasına rağmen, son 15-20 yıldan beri yapılan bazı pratik değişikliklerle uygulamadaki yerini korumuştur.

Son 20 yıllık süre içerisinde, sürekli olarak değişiklik yapılmış versiyonları yenilme ölçütünün kullanımında gözden kaçan hususlar oluşmaktadır. Bu nedenle, bu ölçütte yapılan güncellenmelerin zorunluluk nedenlerinin bilinmesi ve anlaşılması önem kazanmaktadır. Bu amaçla Hoek-Brown yenilme ölçütünün başlangıçtan bugüne kadar yapılan değişiklikler tespit edilmiş ve kronolojik sırayla aşağıda verilmiştir.

4.2 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün Esasları ve 1980-1988 Yılları Arasındaki Durumu

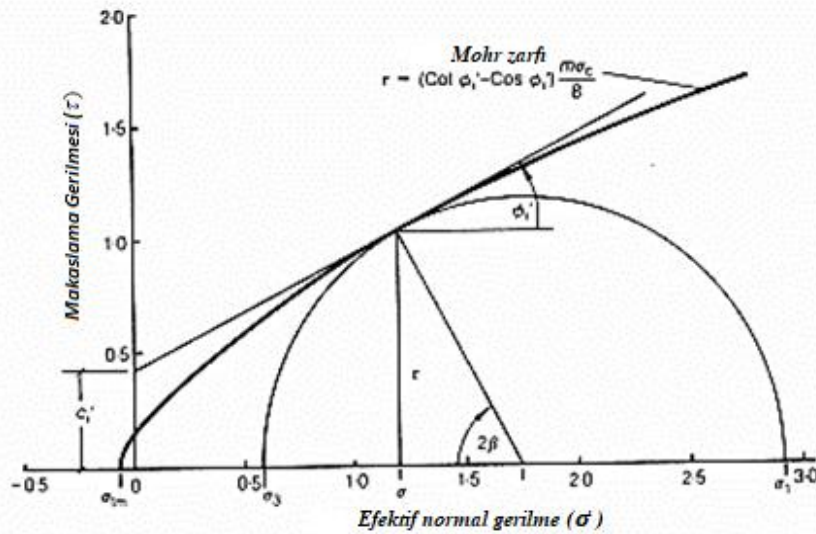
Eklemlili kayalarda, süreksizlik ve kaya malzemesi önemli iki parametredir. Kaya kütlelerindeki yönelimler, süreksizlik sayısı, süreksizlik özelliği, kaya malzemesi blokları veya parçaları kaya kütlelerini doğrudan etkilemektedir. Kaya kütlelerine etkiyen gerilmeler bu parça ve blokların dönmesi, parçalanması ve ötelenmesi sonucunu doğurur.

Sistem büyüklüğüne bağlı olarak kaya malzemesinden ileri derece eklemli kaya kütlelerine geçilmesi gerçeği, deneysel verilerin nicel ve nitel özelliklerinden hareketle kaya malzemesinden kaya kütlelerine zorunlu geçişi sağlamıştır. Kaya malzemesi örnekleri boyutlarının küçük olması nedeniyle, bu örnekler üzerinde deney yapılması pratik açıdan büyük kolaylık oluşturur. Ancak, laboratuvarda kaya malzemesi üzerinde yapılan bu deneylerin farklı tür ve sıklıkta süreksizlikler içeren kaya kütlelerini temsil etmeyeceği açıktır.

Eklemli kaya kütlelerinde örnek hazırlaması ve yüklenmesi, aynı ölçekte deneyler yapılması ve örnek boyutunun artması nedenleriyle, bu tür deneylerin laboratuvarda yapılması teknik ve ekonomik açıdan zordur.

Hoek ve Brown [6,7] eklemli kayalarda az, kaya malzemelerinde ise fazla sayıda yaptıkları deneylerin sonuçlarını baz alarak, parabolik eğriden oluşan yenilme ölçütü üzerine çalışmalarına ağırlık vermişlerdir [16]. Bu iki araştırmacı laboratuvar çalışmalarından elde ettikleri verileri kullanarak, başlangıçta eklemli/gevrek kayalar için basınç gerilmelerine bağlı bir yenilme koşuluna entegre olan bir durum olarak ifade etmiştir. Sonraki dönemlerde, çalışmalarını daha da derinleştirmek ve ilerletebilmek için deneme yanılma yolunu tercih etmişlerdir.

Hoek ve Brown [16,17] önerdikleri yenilme ölçütünü, McClintock ve Walsh [18] tarafından belirtilen hususlar dikkate alınarak modifiye etmişlerdir. Hoek ve Brown çalışmaları neticesinde, kaya kütlelerinin yenilme zarfını normal gerilme düzleminde bir parabol ile de ifade etmişlerdir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Hoek-Brown yenilme ölçütünün Mohr yenilme zarfı ile açıklanması [19].

4.3 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1988-1990 Yıllarındaki Durumu

Temelde yeraltı kazıları ile ilgili tasarımlar için önerilen Hoek-Brown yenilme ölçütü, özellikle şev duraylılığın değerlendirilmesi konusunda 1988 yılında bazı değişikliğe gidilmiştir [20]. Bu tarihte yapılan yeniliklerden ilki, kaya kütlelerindeki makaslama dayanımlarının tanımlanmış olmasıdır. Kaya kütlesi sabitleri efektif normal gerilme durumu esas alınarak modifiye edilmiş, içsel sürtünme açısı ve kohezyonu doğrudan belirlemek amacıyla ölçüte yeni açıklamalar eklenmiştir. Bu tarihten sonra, ölçütte göz önünde tutulan toplam normal gerilme yerine etkin normal gerilme büyüklüklerinin kullanılmasının uygun olacağı ifade edilmiş olacaktır. Anılan ampirik değişiklikler ve ilaveler aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmiştir.

$$h = 1 + \frac{16 (m.\sigma' + s.\sigma_{ci})}{3m^2.\sigma_{ci}} \quad (4.1)$$

$$\theta = \frac{1}{3} (90 + \arctan \frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}}) \quad (4.2)$$

$$\phi'_i = \arctan(\frac{1}{\sqrt{4h.\cos^2.\theta - 1}}) \quad (4.3)$$

$$\tau = (\cot \phi'_i - \cos \phi'_i) \frac{m.\sigma_{ci}}{8} \quad (4.4)$$

$$c'_i = \tau' - \sigma'.\tan \phi'_i \quad (4.5)$$

ϕ'_i : Anlık içsel sürtünme açısı, c'_i : Anlık kohezyon, τ : Makaslama dayanımı, σ' : Normal efektif gerilme, m : Kaya kütlesi parametresi, σ_{ci} : Tek eksenli sıkışma dayanımı (sağlam kaya için)

Ayrıca tek eksenli basınç dayanımını belirlemek amacı ile c'_i ve ϕ'_i parametreleri kullanarak aşağıdaki eşitlik önerilmiştir [20].

$$\sigma_{cck} = \frac{2c'_i.\cos \phi'_i}{(1 - \sin \phi'_i)} \quad (4.6)$$

Ayrıca yapılan en önemli ilavelerden birisi de “m” ve “s” parametrelerinin belirlenmesidir. Bu ölçütü daha pratik hale getirmek için gözlem ile ölçümler arasındaki ilişkiyi yenilme ölçütüne bağlayarak RMR sınıflaması puanını [21] ölçüte eklemiştir. İki yıl sonra, bu ölçüte üç eksenli deney verilerinin bulunmadığı koşullarda, kaya malzemesi sabiti “m” i kestirmek amacıyla farklı durumlar için bir “m_i” değeri önermiştir. Çizelge 3.1’de önerilen “m_i” değerleri gösterilmiştir. Bu yıllarda efektif makaslama dayanım parametreleri (τ' , σ') tanımlanmıştır [22].

4.4 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1992 Yılındaki Durumu

Hoek-Brown ölçütü 1990 yılına kadar özellikle köşeli kaya bloklarından oluşan orta kaya kütleleri için öngörülmüştür. Ancak, çok zayıf kaya kütleleri için ölçütte bir eksiklik olduğu, önemli bir tartışma konusu olarak ortaya çıkmıştır. Bu amaçla ölçütte bazı değişiklikler yapılmıştır [14]. Zayıf ve çok zayıf malzeme için çeşitli yenilikler yapılmıştır. Bunlardan ilki tek eksenli dayanımının sıfır olması durumunu varsayan yaklaşımın ölçütlerinden çıkarılmasıdır. İkincisi, kalitatif yani nitel bir kaya kütlesi sınıflamasını olan Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ölçütlere eklemesidir. Son olarak makaslama parametrelerinin belirlenmesi için Balmer [23] tarafından önerilen eşitlik kullanmıştır.

Ayrıca eklemli kaya kütlelerinin çekme dayanımının olmadığı belirtilmiştir [14]. Dahası, sayısal modellemelerle ilgili bir çekme gerilmesini ölçüte eklememiştir. Diğer önemli husus, σ'_3 gerilmesinin tek eksenli dayanımı tanımlamakta tek başına sınırlı kaldığından yola çıkılarak modifiye edilen ölçüt aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte “s” parametresinin olmayışı, “a” değerinin 0.3-0.6 arasında önerilmiş olması dikkat çekmiştir. Bu bağlamda, anılan parametrelerin seçilmesi amacıyla Şekil 4.2’de verilen değerler önerilmiştir [14].

Ölçütte yapılan en önemli değişiklik ise daha önce göz önünde tutulan RMR değeri yerine GSI abağının önerilmesidir [13]. Ölçüte yer alan GSI abağı Çizelge 4.1 verilmiştir. GSI abağında bazı kaya türleri için önerilen “ m_i ” değerleri verilmiştir [14].

Kesme dayanımının kestirimi için α ve β sabitlerinin sayısal olarak belirlenmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Önerilen ifade aşağıdaki gibidir.

$$\tau' = \sigma_{ci} \cdot \alpha \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma_{ci}} \right)^\beta \quad (4.8)$$

Yapılan değişikliklerden kısaca şu sonuç çıkarılabilir. Eklemli kaya kütlelerinin yenilme ölçütünde tanımlanan parametreleri tahmin etmek için ölçüte basitleştirilmiş bir sınıflandırma şeması eklenmiştir. Bu değişiklik, mühendisler ve yerbilimcilere ön fizibilite çalışmaları sırasında eklemli kaya kütlelerinin dayanımının tahmin etmenin bir yolunun sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıntılı mühendislik tasarımı için laboratuvar veya yerinde deneyler dâhil olmak üzere, daha ayrıntılı çalışmaların

yapılması ve nihai kararlar alınmasından önce kaya kütlesi dayanımını kontrol etmek için parametrik çalışmaların yapılması şiddetle tavsiye edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Eklemlili kaya kütleleri; blok boyu ve süreksizlik aralığı değerleri [14].

Tanım	Blok Boyu	Eşdeğer Süreksizlik Aralıkları
Çok Büyük	(> 2m) ³	Son derece geniş
Büyük	(600mm-2m) ³	Çok geniş
Orta	(200-600mm) ³	Geniş
Küçük	(60-200mm) ³	Ortalama geniş
Çok Küçük	(< 60mm) ³	< Ortalama geniş

MODİFİYE EDİLMİŞ HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^a$ σ_1: en büyük etkin asal gerilme σ_3: en küçük etkin asal gerilme σ_c: kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı m_b ve a: kaya kütlesinin bileşimine, yapısına ve yüzey özelliklerine bağlı sabitler		YÜZEY KOŞULU				
YAPI		ÇOK İYİ Bozunmamış, çok sıkı ve çok pürüzlü süreksizlik yüzeyleri, dolgu yok	İYİ Az bozunmuş, devamlı, sıkı ve pürüzlü yüzeyler, demir oksitli boyama veya dolgu yok	ORTA Orta derecede bozunmuş, devamlı, çok dar açıklıklı, az pürüzlü yüzeyler, sert dolgu	ZAYIF Çok bozunmuş, devamlı, dar açıklıklı, pürüzsüz/kaygan-parlak yüzeyler, sert dolgu	ÇOK ZAYIF Çok bozunmuş, devamlı, dar açıklıklı, pürüzsüz/kaygan-parlak yüzeyler, yumuşak dolgu
	m_b/m_i	0.7	0.5	0.3	0.1	
	a	0.3	0.35	0.4	0.45	
	m_b/m_i	0.3	0.2	0.1	0.04	
	a	0.4	0.45	0.5	0.5	
	m_b/m_i		0.08	0.04	0.01	0.004
	a		0.5	0.5	0.55	0.6
	m_b/m_i		0.03	0.015	0.003	0.001
	a		0.5	0.55	0.6	0.6

Şekil 4.2 : Kaya kütlelerinin yapısı ve süreksizlik yüzeyi koşuluna bağlı olarak “ m_b/m_i ” oranları ve “ a ” sabiti değerleri [14].

4.5 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1995-1997 Yıllarındaki Durumu

Hoek ve Brown, 1992 yılına kadar yapmış oldukları değişikliklere ilaveten 1995 yılında bir kez daha yenilme ölçütlerini modifiye etmişlerdir. Bu versiyonda, sağlam kaya için “a” sabiti 0.5 “s” değeri ise 1 olarak önerilmiş, çatlaklı kaya için ise m_b , s ve a değerleri GSI’nin fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Önerilen eşitlikler aşağıdaki gibidir

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (4.9)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (4.10)$$

1992 yılında RMR sistemi yerine GSI sistemine geçişin adımlarının atıldığı gözlenmiştir. Bu geçiş özellikle çok zayıf kayaların nitelendirilmesi konusunda önemli bir adım olmuştur.

Önerilen eşitlikteki a , m_b ve s parametrelerini de göz önünde bulundurarak örselenme ile ilgili çıkarımlar yapmış, bunları GSI ile ilişkilendirmiştir [24].

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp \left(\frac{GSI-100}{28} \right) \quad (4.11)$$

$$GSI > 25 \text{ durumunda :} \quad s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9} \right) , \quad a = 0.5$$

$$GSI < 25 \text{ durumunda :} \quad s = 0 , \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

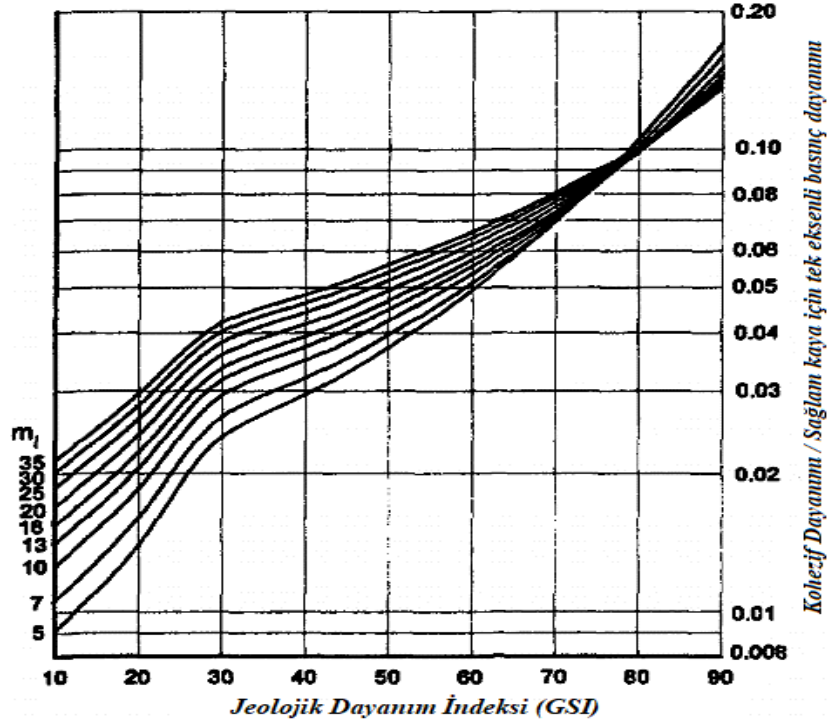
Farklı kaya malzemesi türleri için önerilen m_i değerleri aşağıda Çizelge 4.2 ‘de gösterilmiştir [24].

4.6 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 1997-1999 Yıllarındaki Durumu

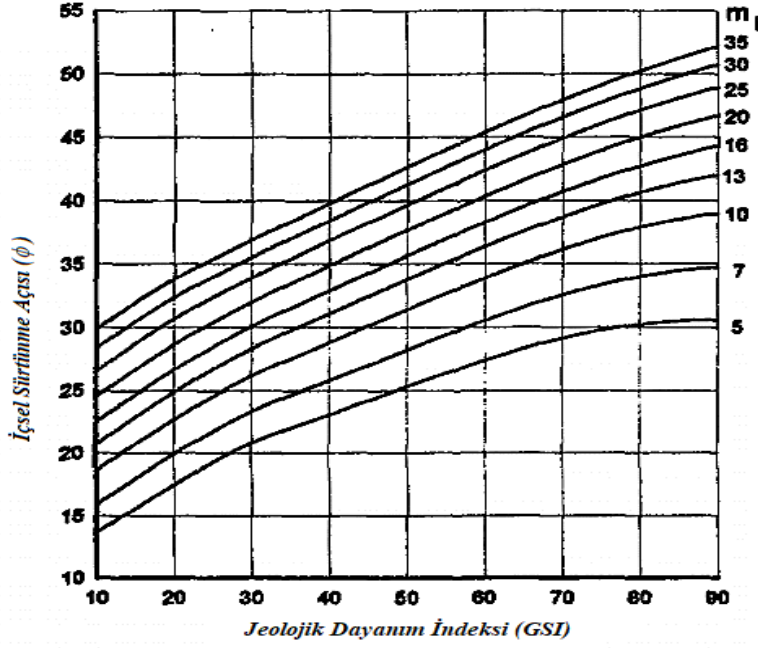
1997 yılında sadece GSI ile ilgili değişiklik yapılmıştır. GSI, m_i , kaya kütlesi sabiti ve σ_{ci} değerleri arasındaki bağlantılar geliştirilmiştir. Bu bağlantılara bağlı düzenlenen abaklar Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ‘de gösterilmiştir [25]. Bu yılda yapılan araştırmalar hem Hoek Brown hem de Mohr Coulomb parametreleri kullanılarak hem yüzey hem de yer altı kazı stabilite analizlerinin sonuçlarının karşılaştırıldığı çok sayıda karşılaştırmalı teorik çalışmanın gerçekleştirildiği yıllardır. Bu bakımdan bu yıl yapılan araştırmalar en kapsamlı olarak değerlendirilir.

Çizelge 4.2 : Kaya malzemeleri için önerilen m_i sabitinin değeri [24].

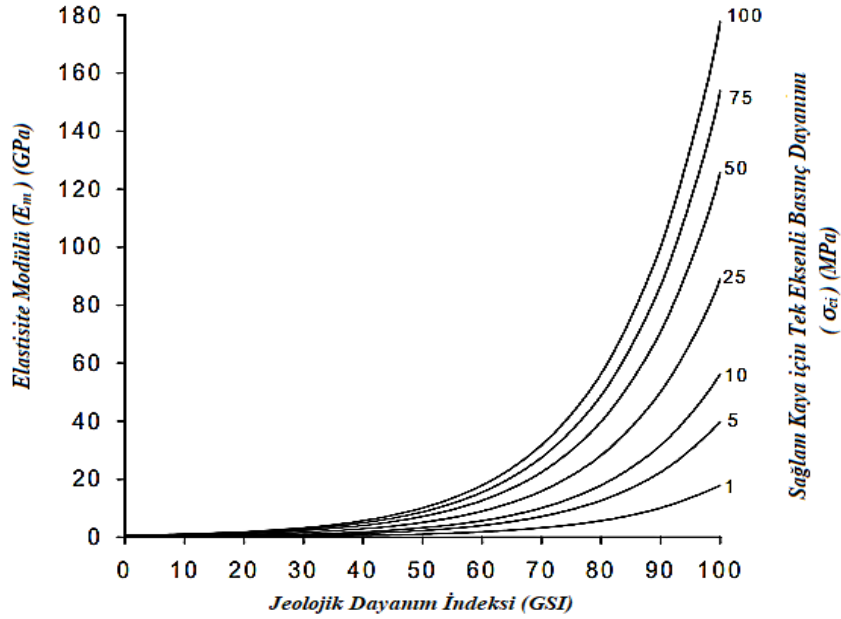
Kayaç tipi	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok İnce
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kilitaşı 4
			← Grovak (18) →			
	Klastik - Olmayan	Organik	← Tebeşir 7 →			
			← Kömür (8-21) →			
		Karbonatlı	Breş (20)	Sparit Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
			Kımyasal	Jips 16		Anhidrit 13
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuarsit 24	
	Düşük Foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Foliasyonlu *		Gnays 33	Şist (10)	Filit (10)	Sleyt 9
MAĞMATİK	Açık	↑	Granit 33		Riyolit (16)	Obsidiyen (19)
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)	
	Diyorit (28)			Andezit 19		
Gabro 27	Dolerit (19)		Bazalt (17)			
Norit 22						
Puskürük Piroklastik			Aglomerata (20)	Breş (18)	Tuf (15)	



Şekil 4.3 : Kohezyonun GSI ve m_i değerlerine göre değişimi [25].



Şekil 4.4 : İçsel sürtünme açısı değerinin GSI ve m_i sabitine göre değişimi [25].



Şekil 4.5 : Farklı kaya dayanımlarında GSI ile kaya kütlelerinin elastisite modülü ve σ_{ci} arasındaki ilişkisi [26].

4.7 Ölçütün 2002 Yılındaki Durumu

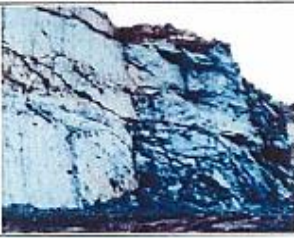
Bu yıllarda Hoek-Brown yenilme ölçütü büyük ölçüde günümüzdeki şeklini almıştır. “a” ve “s” değerleri 1997 yılında GSI değerlerinin 25’den büyük ve küçük olması durumları için ayrı ayrı önerilmiştir [25]. 2002 yılında, örselenme faktörü “D” göz önünde bulundurularak aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (4.12)$$

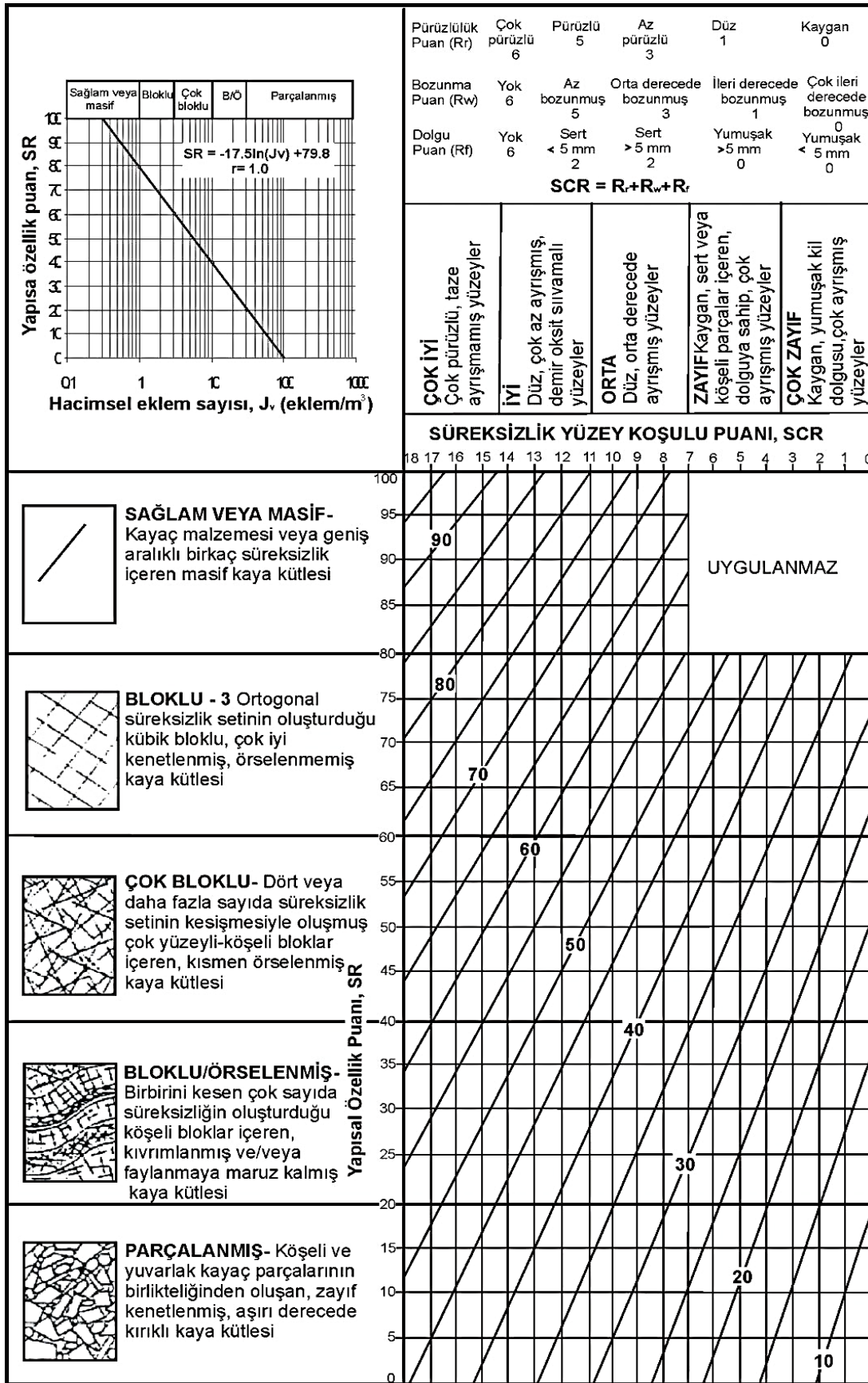
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4.13)$$

Ayrıca bu örselenme faktörü içinde bir ölçütün gerekli olduğu, bunu da Şekil 4.6'de tahmini örselenme faktörü olarak dile getirilmiştir. Bu yılda GSI abağı tekrardan gözden geçirilmiştir.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (4.14)$$

Kaya Kütesinin Görünümü	Kaya Kütesinin Tanımı-Örselenme Durumu	Önerilen Örselenme Faktörü, D
	Çok iyi derecede kontrollü patlatma veya Tünel Kazı Makineleri ile kazılmış tünellerde çevre kayaçlarında minimum örselenme oluşumu	D=0
	Mekanik veya elle kazı yapılan (patlatmasız) tünellerde zayıf kaliteli, çevre kayaçlarında minimum örselenme oluşumu Önemli ölçüde taban kabarmasına yolaçan sıkışma problemleri varsa, resimdeki gibi geçici invert uygulanmaması durumunda, örselenme ciddi olabilir	D=0 D=0,5 Invert Yok
	Sert kaya tünellerinde kötü denetimli patlatma işlemi sonucunda, tünel cidarından yer yer 2-3 m dışa doğru ciddi örselenme durumu	D=0,8
	Mühendislik yapısı sevelerinde, küçük ölçekli, kontrollü patlatma işlemi, soldaki resimde görüldüğü gibi, kaya kütesinde orta derecede örselenme oluşturabilir. Bunun yanı sıra, gerilme boşalması da bir miktar örselenmeye yolaçabilir	D=0,7 İyi Patlatma D=1,0 Kötü Patlatma
	Çok büyük açık maden kazıları şevleri, üretimle ilgili patlatmalardan ve örtü kalınlığının kaldırılmış olmasından ötürü kayda değer örselenmelere maruz kalmaktadır. Bazı daha yumuşak kaya kazılarının, sökülerek (parçalanarak, kazılarak) veya dozer ile açılması durumunda şevlere verilebilecek zararların mertebesi daha az olmaktadır.	D=1,0 Patlatmalı Açık Ocak Kazısı D=0,7 Mekanik Kazı

Şekil 4.6 : Tahmini “D” örselenme faktörü [27].

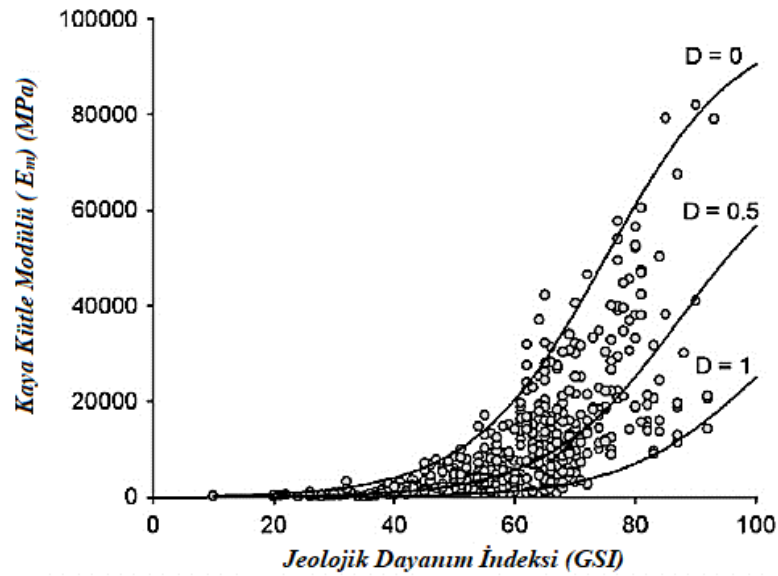


Şekil 4.7 : [28]'ın önerdiği niceliksel GSI Sınıflama Sistem, Abağı'nın "Sağlam ve Masif" kaya grubu da ekledikten sonraki değiştirilmiş son hali [29].

4.8 Hoek-Brown Yenilme Ölçütünün 2006 Yılındaki Durumu

Hoek-Brown yenilme ölçütü ile doğrudan ilişkili olmasa da, bir kaya kütlelerinin deformasyon modülü, deformasyonları içeren herhangi bir kaya kütle davranışının analizinde önemli bir girdi parametresidir. Bu parametrenin doğrudan belirlenmesine yönelik arazi deneyleri zaman alıcıdır, pahalıdır ve bu deneylerin sonuçları bazen sorgulamaya açıktır. Sonuç olarak, bu yılda sınıflandırma şemaları temelinde kaya kütle deformasyon modülünün değerini tahmin etmek için deneysel ilişkiler önerilmiştir. Bu ilişkiler gözden geçirilmiş ve sınırlamaları tartışılmıştır.

Çin ve Tayvan'dan çok sayıda yerinde ölçümlerden elde edilen verilere dayanarak, deformasyon modülü ile GSI arasında yeni bir ilişki önerilmiştir. Bozulmamış kayanın özelliklerinin yanı sıra patlama hasarı ve veya gerilim rahatlamasına bağlı olarak bozulmanın etkileri bu yeni ilişkiye dâhil edilmiştir [30].



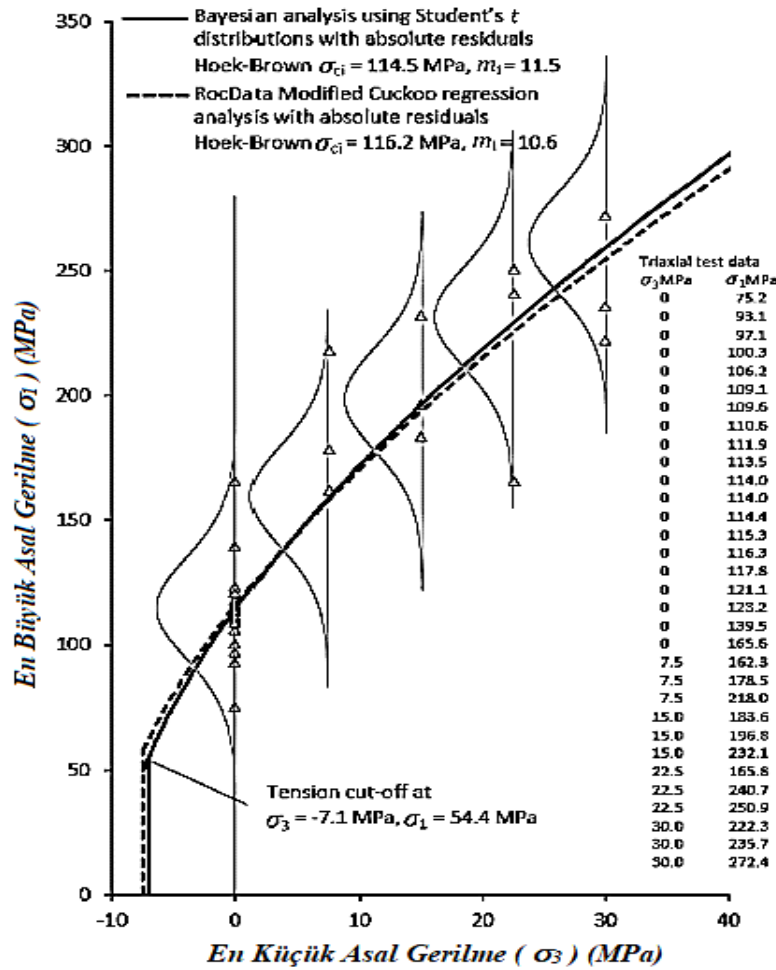
Şekil 4.8 : Basitleştirilmiş Hoek ve Diederichs denkleminin Çin'deki ve Tayvan'daki veri değerleri [30].

4.9 Ölçütün 2018 Yılındaki Güncellenmiş Hali

Bu yılda özellikle [31] ve [32] sağlam kaya dayanımını ölçmek için Bayes istatistiğini önermiştir. Bu yaklaşım, geleneksel yöntemlere bir alternatif bir kaynak sağlamıştır. Olasılığa ve sıklık yöntemine dayanan bir yaklaşımdır. Daha ayrıntılı şekilde açıklayacak olursak model parametrelerinin dağılımını hesaplayan ve daha önceden öngörülmemiş input (veri giriş) değerlerini rassal olarak önceden bildiren bir çıkarımdır. Kaya için deney verisi setlerinde aykırı değerlerin oluşturduğu problemi

çözmek, [32] Student's t dağılımını kullanmak dışında analizlerde genellikle normal dağılımının başlangıç noktası olduğu varsayılır. Bu iki dağılım arasındaki fark, varsayımsal fakat gerçekçi olmayan input (veri girişi) için aykırı değer etkisi sonucunda görülür. Ayrıca Şekil 4.9 'da Bayes analizinden elde edilen üç eksenli data verisi gösterilmiştir. Bu durumda, Bayes analizi ile doğrusal olmayan regresyon analizi arasındaki farklar fazla değildir. Bayes regresyon analizi tekniğinin avantajlarının, daha seyrek ve daha yaygın veri kümeleri için daha belirgin olduğu gösterilmiştir [31].

Nihai kaya kütlesi özelliklerinin aralıklarını sağlamak için hem sağlam kaya özelliklerine hem de GSI tahminlerine aynı istatistiksel işlemlerin uygulanması gerektiğini savunulmuştur [32]. 2018 yılında güncellenen (update edilen) bu ölçüt, sahip olunan tüm değişiklikleri içerir ve 38 yıldaki uygulanmış deneyimlere dayalı bu ölçütün pratik problemlere uygulanmasını sağlamıştır.



Şekil 4.9 : RocData ile modifiye edilmiş Cuckoo yöntemini kullanan analiz ile Student t dağılımını içeren bir Bayes analizi kullanılarak Coburg kireçtaşı üzerinde üç eksenli deneylerin analizinin gösterimi [33].

5. ISIL İŞLEMLE TANE SINIRLARI ÖRSELENEN MERMERİN YENİLME SONRASI DAYANIMI

5.1 Malzeme ve Metod

Tez kapsamında, çatlaklı kaya kütesine benzetilen mermer örneklerinin dayanımlarının sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerle araştırılması ve elde edilen sonuçların Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle boy/çap oranı 2 ve çapı 5.3 cm olan silindirik deney numuneleri hazırlanmış, daha sonra örneklerin kafa düzeltmeleri yapılmıştır [2]. Deneylerde toplam 18 adet Muğla-Kavaklıdere mermeri numunesi kullanılmıştır. Numuneler 3'erli gruplara halinde toplam 6 gruba ayrılarak isimlendirilmiştir. Numune gruplarından biri orijinal numune grubu (A grubu) olarak ayrılmış diğer gruplar 400 °C'lik sıcaklıkta, farklı çevrim sayısında, 24 saatlik sürelerle ısıtma-soğutma periyoduna tabi tutulmuştur. Isıl işlemde sıcaklığın yüksek tutulması ve örnek grupları için çevrim sayılarının değiştirilmesindeki amaç yıpranmayı hızlandırmak ve kütle içerisindeki fissür sıklığını değiştirmektir. Bu uygulamanın esas nedeni ise deney malzemesi dokusunu çatlaklı kayaya benzetmektir.

Kaba taneli Muğla Mermeri'nden hazırlanan örnek gruplarının ısıtma işlem sonucunda fiziksel özelliklerinde oluşan değişiklikler öncelikle belirlenmiştir. Karşılaştırma amacıyla, tüm numunelerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlıkları, hacimleri, görünür poroziteleri, suya doymunlukları, kapiler su emmeleri, sonik hızları, boşluk oranları, yoğunlukları, doluluk oranları gibi fiziksel özelliklerinde oluşan değişiklikler ölçülerek belirlenmiştir. Fiziksel özelliklerdeki değişimlerin tümü, malzemenin dokusundaki boşluk hacminde, ısıtma işlem döngü sayısına bağlı olarak, genellikle artış olduğunu göstermiştir. Isıl işlem için uygulanacak maksimum sıcaklığın sınırlandırılması için aynı mermer örneği üzerinde yapılan diferansiyel termal analizin (DTA) sonucu göz önünde tutulmuştur.

Orijinal örnek A, farklı sayıda ısıtma işleme tabi tutulan diğer örnek grupları ise sırasıyla B, C, D, E ve F olarak adlandırılmıştır. A grubu örnekleri hiçbir şekilde ısıya maruz bırakmadan, diğer örnekler örnekler Çizelge 5.1 de belirtilen çevrim sayılarında, etüv sıcaklığı 400 °C 'ye ulaştıktan sonra 24 saatlik sürelerle etüvde bekletilmiş ve etüvden çıkarıldıktan sonra aynı sürelerde laboratuvar sıcaklığında soğumaya terk edilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deney örneği grupları üzerinde uygulanan ısıtma-soğutma döngülerinin sayıları.

Örnek Grubu	Isıl İşlem Döngü Sayısı
A	0
B	1
C	2
D	3
E	4
F	5

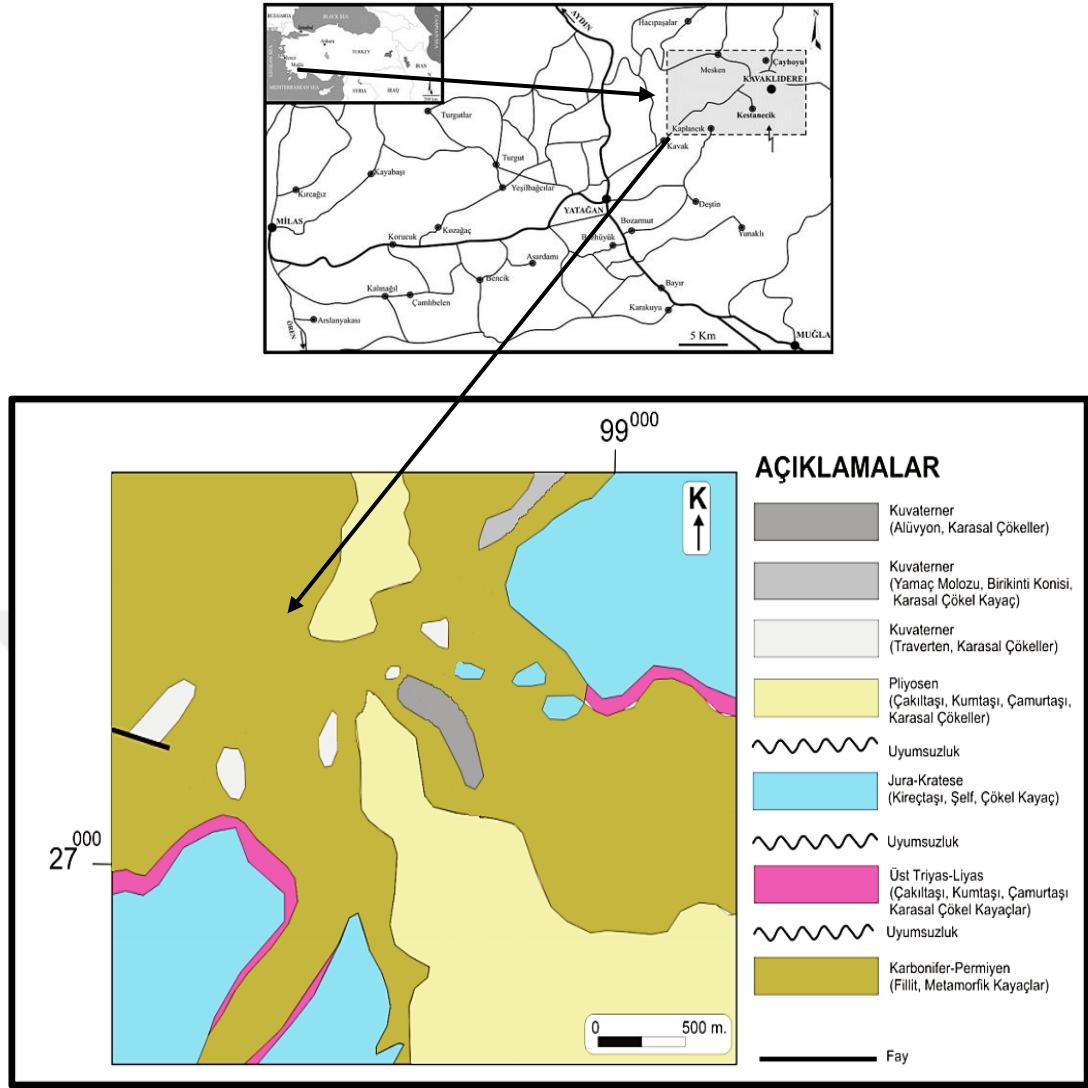
Bu işlemler sonrasında, doymuş koşullarda yukarıda bahsedilen deneylerden bazıları tekrarlanmıştır.

Deneyisel çalışmaların son aşamasında mekanik deneyler uygulanmıştır. Öncelikle her örnek grubundan birer örnek rastgele seçilerek tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuş, elde edilen dayanım ve davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise her örnek grubundan ikişer numune üzerinde sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneyler yapılmış, yenilme sonrası aşamayı temsil eden dayanım zarfları farklı GSI değerleri öngörülerek çizilen Hoek-Brown yenilme zarfları ile karşılaştırılmıştır.

5.2 Deney Malzemesi

Çalışmada Muğla - Kavaklıdere de işletilmekte olan mermer, deney malzemesi olarak seçilmiştir. Malzemenin fiziksel, mekanik, teknolojik ve petrografik özellikleri incelenmiştir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Bu malzemenin seçilmesinin nedeni, benzer çalışmalarda denenmiş olması [38,42] ve doku ve mineral bileşimi açısından homojen ve izotrop olmasıdır. Ayrıca, % 99 ‘dan fazla CaCO_3 bileşimine sahip olması ve doku benzerliği göz önünde tutulmuştur.

Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin petrografik özellikleri; homoblastik dokuya sahiptir ayrıca homojen özellik göstermektedir. Eş tane boyuna sahip, düzgün şekilli ve kalsit minerallerinden oluşmuştur. Oldukça iri taneli kristal yapıya sahip örnekler girintili çıkıntılı ve dantelsi sınırlar boyunca kenetlenmiştir ve kopmuş parçalar bulunmaktadır. Tane büyüklüğü 0.5-2 mm arasında değişkenlik gösterir. Malzemede dolgu bulunmamaktadır. Basınç etkisine işaret eden polisentetik kayma ikizleri mükemmel gelişmiştir. Örneklerde şeker dokusu gözlenmiştir.



Şekil 5.1 : Muğla-Kavaklıdere bölgesinin jeoloji haritası (M.T.A. Aydın N20 paftasından alınmıştır) [41].



Şekil 5.2 : Muğla Mermeri örneklerinin alındığı ocağın güncel durumu.

5.3 Laboratuvar Deneyleri

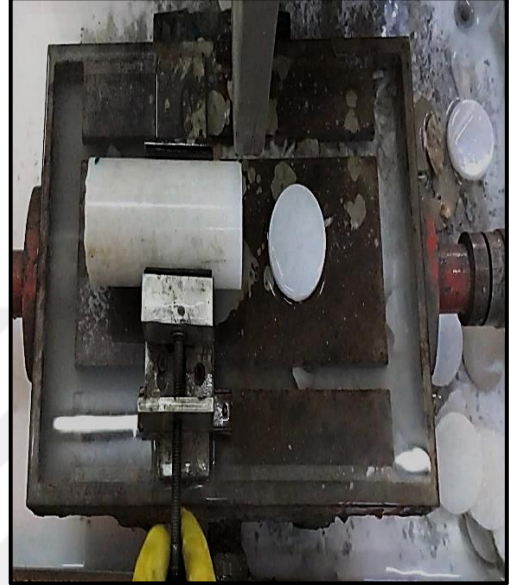
Her bir örneğin birim hacim ağırlığı, porozitesi (gözeneklilik), suya doygunluğu, kapiler su emmesi, sonik hızları, boşluk oranı, yoğunluk ve doluluk oranı ölçülerek belirlenmiştir. Bu özellikler belirlendikten sonra aynı örnekler üzerinde tek eksenli ve sürekli yenilme durumunda üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, örnek gruplarını temsil eden ince kesitler ve parlak kesitler mikroskop altında incelenmiştir. Deneyisel çalışmalarda, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü; Kaya Mekaniği, İndeks Özellikler, İnce Kesit Hazırlama, Optik Mineraloji, Örnek Hazırlama, Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Yapıları Mekaniği Laboratuvarlarında kurulu altyapı kullanılmıştır. Anılan inceleme ve deneyler, [34], [35], [36], [39] ve [40] standartları gözetilerek yapılmıştır.

5.3.1 Karot alma

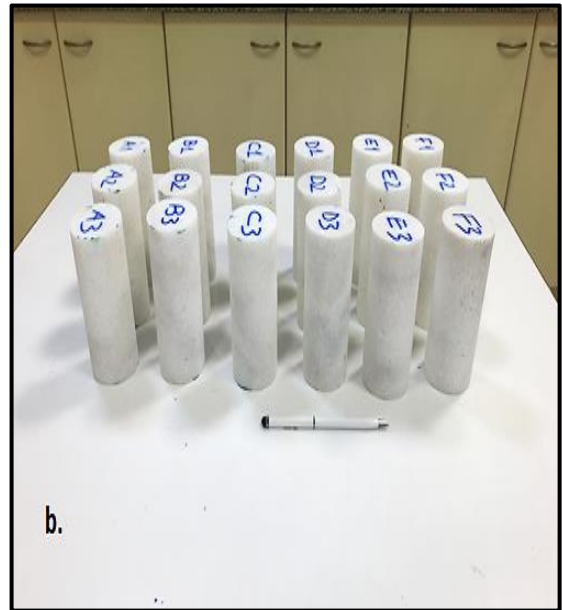
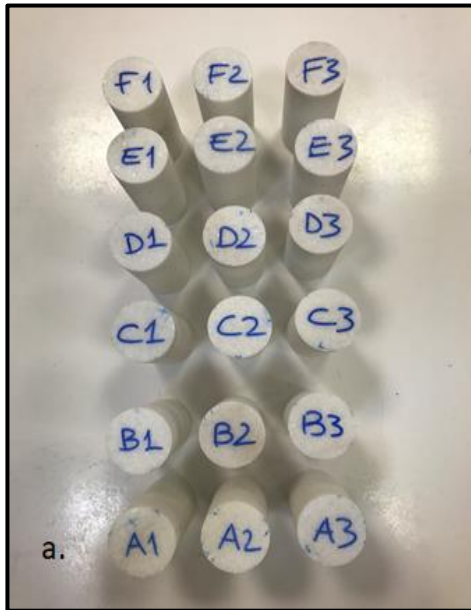
Karotlar, Muğla mermerine ait tek bir bloktan aynı yönde alınarak hazırlanmıştır. Karot alım işlemi İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü örnek hazırlama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Örneklerin tümü NX 54.7 mm çaplı karotiyer yardımıyla aynı şartlarda alınmıştır. Karot örneklerinin uçları, boy/çap oranları 2 olacak şekilde ve standartlara [34, 36] göre kesilmiştir.

5.3.2 Karot düzeltme

Karot düzeltme işlemi için alınan karot örnekler öncelikle karot kesme makinesinin örnek kısmına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Musluk açılarak bıçak kısmına su verilmiş ve makine çalıştırılmıştır. Yukarı ve aşağı çevirmek üzere kol hareket ettirilmiş ve numune bıçağa yavaşça sürülmüş ve kesim işlemine başlanılmıştır. Bir ucu kesilen örneğin diğer ucunu kesmek için diğer kol ise sağa ve sola çevrilmiş olup örneğin ucu bıçağa sürülmüş ve o ucu da kesilmiştir. Düzeltilmiş örnekler kontrol edilmiş, sorun olması halinde tekrardan üzerinden geçilmiştir. Bu işlemler İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Taş Kesme ve Örnek Hazırlama Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Hazırlanan örneklerin üstten ve profilden görünümü Şekil 5.4 'de gösterilmiştir. Bu deney, [35] standartları dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 5.3 : İTÜ Jeoloji Mühendisliği örnek alma laboratuvarında yapılan karot düzeltme işlemi.

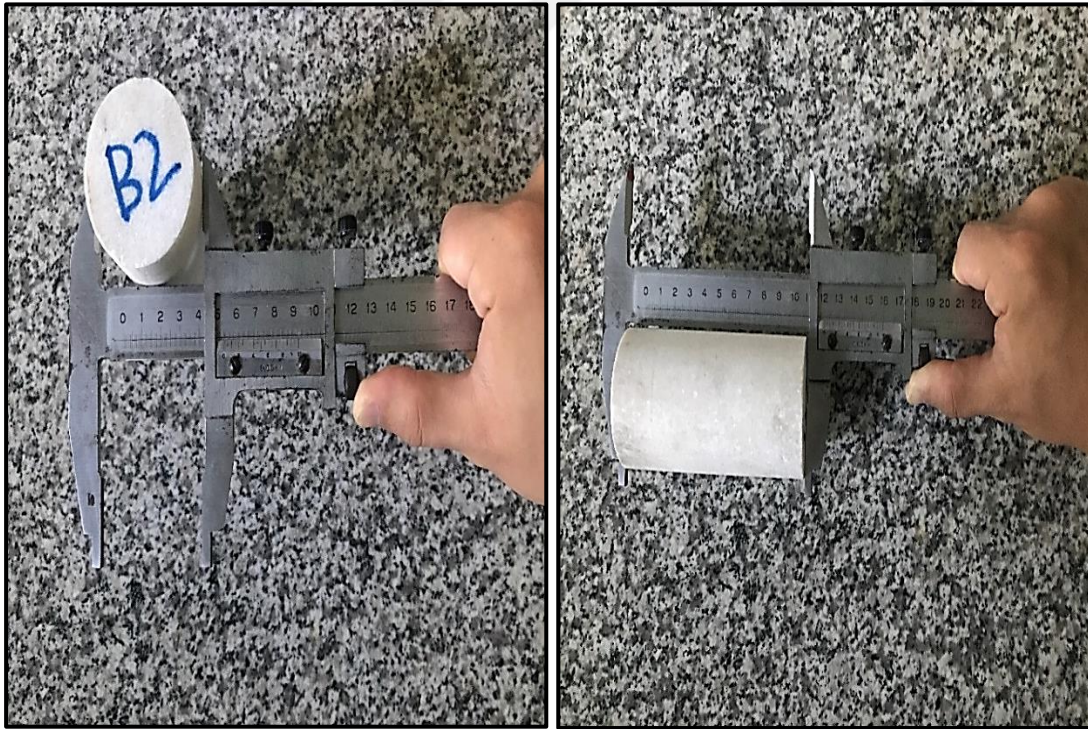


Şekil 5.4 : a.) Deneye hazır hale getirilen örneklerin numaralandırılması ve b.) profil görünümüleri.

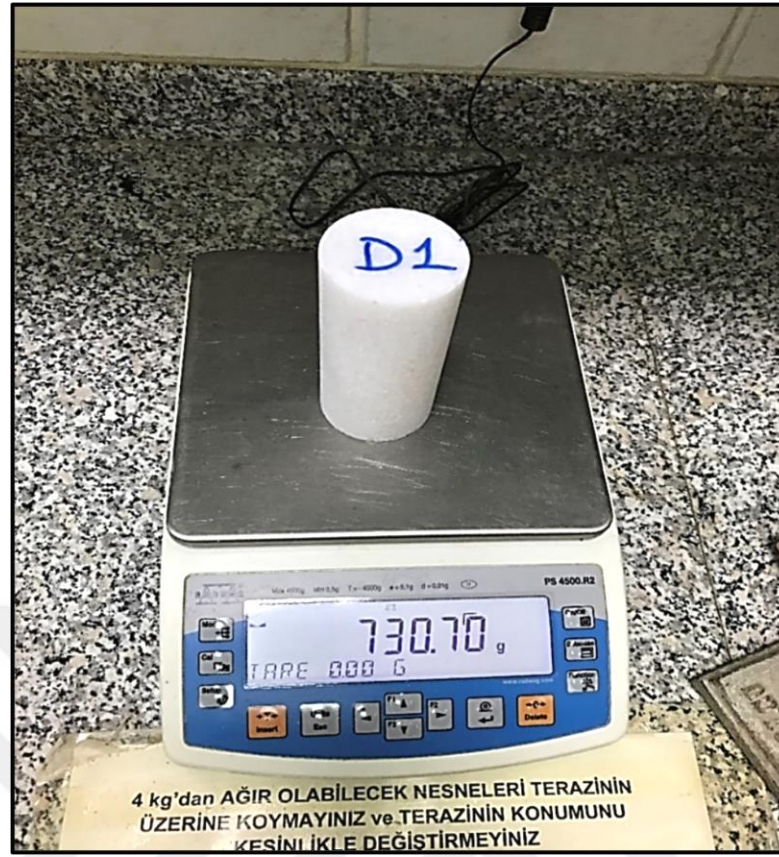
5.3.3 Isıl işlem öncesi kuru birim hacim ağırlık belirleme

Isıl işlem öncesinden kasıt örneklerin termal analiz ile hiçbir şekilde ısıya maruz bırakılmadan ki durumudur. Kuru birim hacim ağırlık deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık deneyi, silindirik kaya örneklerinin yoğunluğunu ve birim hacim ağırlıklarını belirlemek amacıyla yapılan deneylerdir. Bu silindirik örneklerin boyları ve çapları kumpas aracılığıyla ölçülmüştür (Şekil 5.5). Örnekler 105 °C'de ısıtılıp, etüv içinde 24 saat kurutulan örnekler, soğutulmaya bırakıldıktan sonra hassas terazide kuru ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 5.6, Şekil 5.7). Elde edilen veriler bilgisayar ortamında kaydedilerek gerekli formüllerle kuru birim hacim ağırlıkları, yoğunlukları hesaplanmıştır.

Isıl işlem öncesi malzemenin ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.60 kN/m^3 , malzemenin ortalama kuru birim hacim yoğunluğu 2.71 g/cm^3 bulunmuştur. Bulunan değerler ısııl işlem öncesi için Çizelge 5.2 'de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir. Bu deney, [35] tarafından önerilen standartlara göre yapılmıştır.



Şekil 5.5 : Örneklerin boy ve çaplarının kumpas aracılığıyla ölçülmesi.



Şekil 5.6 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin kuru ağırlıklarının hassas terazide tartılması.



Şekil 5.7 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin 105⁰C'lik etüvde kurutulması.

Çizelge 5.2 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneğinin her grup için ısıtılma işlem öncesi kuru ağırlığı, hacmi, kuru yoğunluğu, kuru birim hacim ağırlığının hesaplanması.

Grup	Kuru Ağırlık (g)	Doygun Ağırlık (g)	Isıtılma İşlem Öncesi		
			Hacim (cm ³)	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
A1	732.07	732.56	270.03	2.71	26.60
A2	733.91	734.43	270.73	2.71	26.59
A3	725.88	726.36	267.73	2.71	26.60
B1	729.75	730.27	269.14	2.71	26.60
B2	715.68	716.12	263.99	2.71	26.60
B3	740.85	741.32	272.98	2.71	26.62
C1	716.25	716.77	264.14	2.71	26.60
C2	727.96	728.47	268.47	2.71	26.60
C3	739.81	740.29	272.79	2.71	26.60
D1	730.70	731.10	269.45	2.71	26.60
D2	724.74	725.21	267.41	2.71	26.59
D3	718.07	718.52	264.83	2.71	26.60
E1	736.05	736.51	271.59	2.71	26.59
E2	741.65	742.11	273.65	2.71	26.59
E3	732.02	732.40	269.95	2.71	26.60
F1	731.04	731.41	269.63	2.71	26.60
F2	719.36	719.76	265.28	2.71	26.60
F3	738.44	738.91	272.50	2.71	26.58

5.3.4 Isıl işlem öncesi doymun birim hacim ağırlık belirleme

Doygun birim hacim ağırlık deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deney, örneklerin doymun yoğunluğunu ve doymun birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Numunenin boy ve çap değerleri kumpas aracılığıyla ölçülmüştür. Daha sonra üstü açık kaplara numuneler birbirine değmeyecek şekilde aralıklarla yerleştirilmiştir. Öncelikle örneklere, örneğin dörtte biri kadar su eklenip biraz bekletilmiş, daha sonra örneğin dörtte üçü kadar su ile doldurulup bekletilmiştir. Nihayetinde örneğin üstünü 2-3 mm geçecek şekilde tamamen su ile doldurulmuş ve 48 saat saf suda bekletilmiştir (Şekil 5.8). 48 saat sonunda örnekler sudan alınıp bütün yüzeyleri kuru bez ile kurutularak hassas terazide doymun ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 5.8). Ölçülen değerler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Deney öncesi malzemenin ortalama doymun birim hacim ağırlığı 26.61 kN/m^3 , malzemenin ortalama doymun yoğunluğu 2.71 g/cm^3 bulunmuştur. Gerekli hesaplamalar Çizelge 5.3 'de gösterilmiştir. Bu deney, [35] tarafından önerilen standartlara göre yapılmıştır.



Şekil 5.8 : Deney örneklerinin suya doymunluklarının sağlanması ve doymun ağırlığının hassas terazide tartırması.

Çizelge 5.3 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneğinin her grup için ısıtıl işlem öncesi doymuş ağırlığı, hacmi, doymuş yoğunluğu, doymuş birim hacim ağırlığının hesaplanması.

Grup	Kuru Ağırlık (g)	Doymuş Ağırlık (g)	Isıtıl İşlem Öncesi		
			Hacim (cm ³)	Doymuş Yoğunluk (g/cm ³)	Doymuş Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
A1	732.07	732.56	270.03	2.71	26.61
A2	733.91	734.43	270.73	2.71	26.61
A3	725.88	726.36	267.73	2.71	26.61
B1	729.75	730.27	269.14	2.71	26.62
B2	715.68	716.12	263.99	2.71	26.61
B3	740.85	741.32	272.98	2.71	26.64
C1	716.25	716.77	264.14	2.71	26.62
C2	727.96	728.47	268.47	2.71	26.62
C3	739.81	740.29	272.79	2.71	26.62
D1	730.70	731.10	269.45	2.71	26.62
D2	724.74	725.21	267.41	2.71	26.60
D3	718.07	718.52	264.83	2.71	26.62
E1	736.05	736.51	271.59	2.71	26.60
E2	741.65	742.11	273.65	2.71	26.60
E3	732.02	732.40	269.95	2.71	26.62
F1	731.04	731.41	269.63	2.71	26.61
F2	719.36	719.76	265.28	2.71	26.62
F3	738.44	738.91	272.50	2.71	26.60

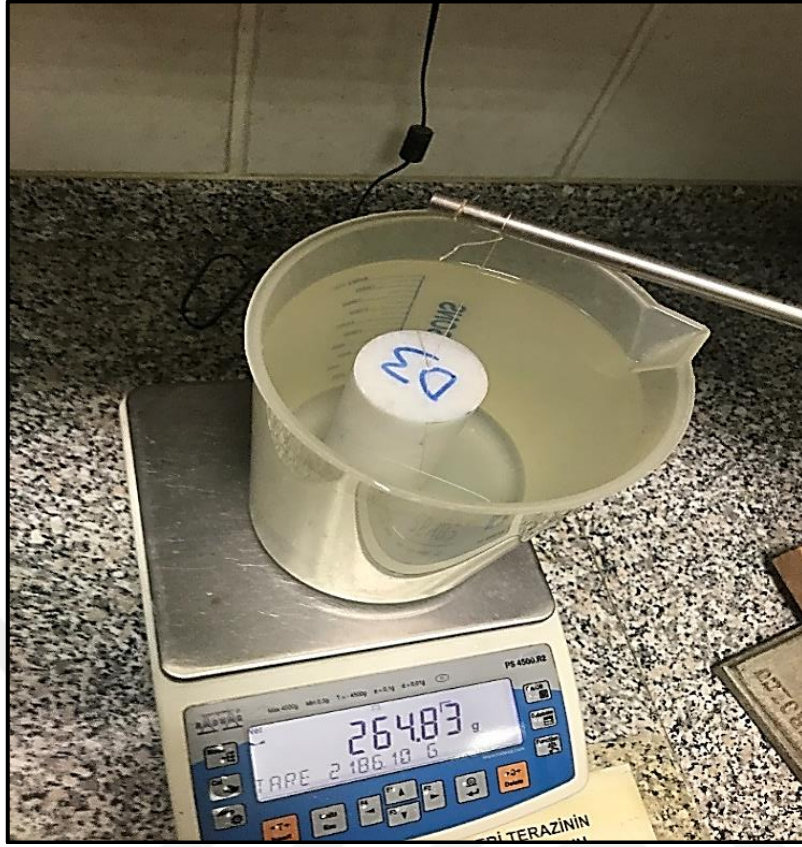
5.3.5 Isıl işlem öncesi örneklerin hacminin belirlenmesi

Örneklerin hacimleri, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda belirlenmiştir. Yukarıda maddeler halinde bahsedilen kuru ve doymuş ağırlık hesaplama işlemleri yapıldıktan sonra, örneklerin boy ve çap değerleri kumpas aracılığıyla ölçülmüştür. Daha sonra plastik beherin içerisine 1000 ml su koyulduktan sonra beher hassas teraziyeye koyulmuş ve değeri sıfırlanmıştır. Bu işlemlerin ardından örnek denge aletindeki ipe bağlanmıştır. İpe bağlı örnekler hiçbir şekilde behere temas etmeden askıdaki hali ile beherin içerisine koyulup ve örnek dengede bırakılmıştır.

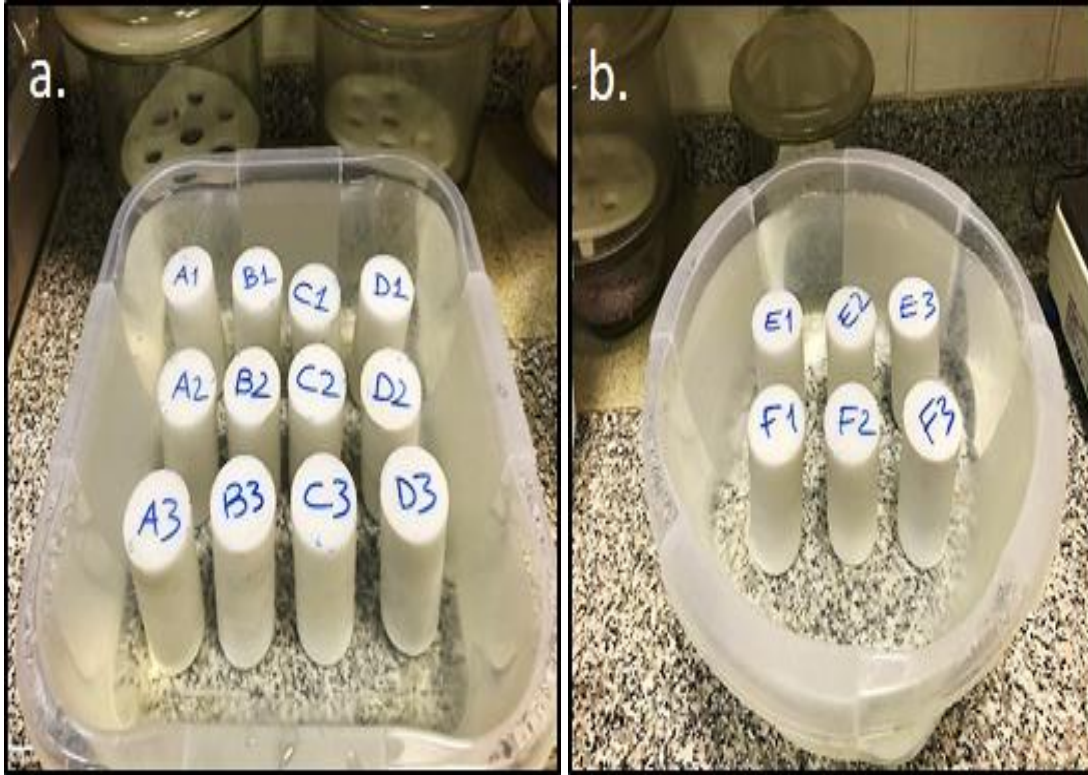
Buradan örneğin hacmi hassas teraziden okunmuş ve not edilmiştir (Şekil 5.9). Deney öncesi malzemenin ortalama hacmi 269.13 cm^3 olarak bulunmuştur. Ölçülen değerler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Okunan değerler (bkz. Çizelge 5.3) 'de gösterilmiştir.

5.3.6 Isıl işlem öncesi örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranlarının belirlenmesi

Görünür porozite deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deney, örneklerin porozitesini ve boşluk oranını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Numunenin boy ve çap değerleri kumpas aracılığıyla ölçülmüştür. Örnekler, $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtılıp, etüv içinde 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan örneklerin ağırlığı tespit edilmiştir. Daha sonra üstü açık kaplara numuneler birbirine değmeyecek şekilde aralıklarla yerleştirilmiştir. Öncelikle örneklerle, örneğin dörtte biri kadar su eklenip biraz bekletilmiş, daha sonra örneğin dörtte üçü su ile doldurulup beklenilmiştir. Nihayetinde örneğin üstünü 2-3 mm geçecek şekilde tamamen su ile doldurulmuş ve 48 saat saf suda bekletilmiştir (Şekil 5.10). 48 saat sonunda örnekler sudan alınıp bütün yüzeyleri kuru bez ile kurutularak hassas terazide doymuş ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen değerler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Isıl işlem öncesi malzemenin ortalama porozitesi % 0.17 , malzemenin ortalama boşluk oranı % 0.21 ve malzemenin ortalama doluluk oranı % 99.79 olarak bulunmuştur. Gerekli hesaplamalar Çizelge 5.4 'de gösterilmiştir. Bu deney [35] ve [40] standartlarına göre yapılmıştır.



Şekil 5.9 : D3 mermer örneğinin hacminin belirlenme işlemi.



Şekil 5.10 : Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin suya doygun hale getirilişi, a) A,B,C,D grubu, b.) E ve F grubu.

Çizelge 5.4 : Isıl işlem öncesi örneklerin görünür porozite, boşluk oranı ve doluluk oranları.

Örnek Grupları	Görünür Porozite (% n)	Boşluk Oranı (% e)	Doluluk Oranı (%)
A1	0.18	0.22	99.78
A2	0.19	0.23	99.77
A3	0.18	0.22	99.78
B1	0.19	0.23	99.77
B2	0.17	0.20	99.80
B3	0.17	0.20	99.80
C1	0.20	0.25	99.75
C2	0.19	0.23	99.77
C3	0.18	0.22	99.78
D1	0.15	0.18	99.82
D2	0.18	0.22	99.78
D3	0.17	0.20	99.80
E1	0.17	0.20	99.80
E2	0.17	0.20	99.80
E3	0.14	0.16	99.84
F1	0.14	0.16	99.84
F2	0.15	0.18	99.82
F3	0.17	0.20	99.80

5.3.7 Isıl işlem öncesi örneklerin sonik dalga hız deneyi ile belirlenmesi

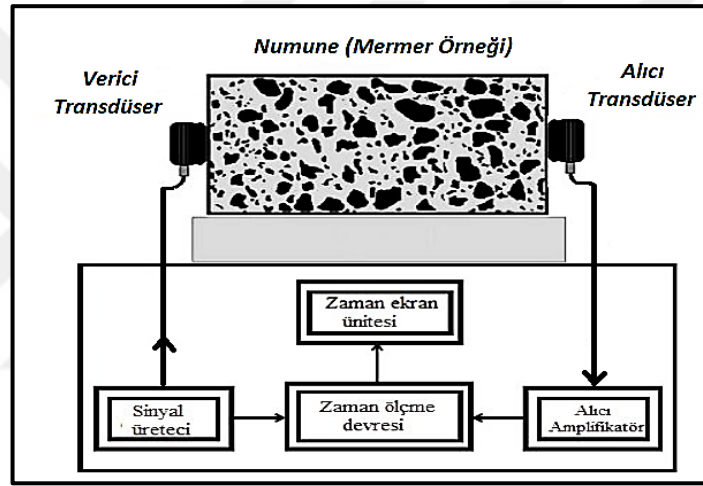
Örneklerin sonik dalga hız deneyleri Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu deneyler [35] ve [36] standartları gözetilerek yapılmıştır. Sonik dalga hız deneyi için İsviçre'de Proceq firması tarafından üretilen ultrasonik dalga hızı ölçmeye yarayan Pundit Lab+ marka ölçüm aleti kullanılmıştır. Ultrasonik dalga hızlarının prensibi, ultrasonik dalga hızlarının iletildiği bir alıcı (receiving transducer), ultrasonik dalga hızlarının iletildiği bir verici (generated transducer), kontrol ve dönüştürücülere bağlı veri toplama ünitesi ile bu dalga hızlarının tespitidir (Şekil 5.11). P dalgasının hızının tespiti için 54 kHz, S dalgasının hızının tespiti için ise 250 kHz lik sahip özel probalar kullanılmıştır.

Ölçümlere başlarken öncelikle numuneye ok işareti ile çizgi çizilmiş ve alıcı-verici yönleri belirlenmiştir. Daha sonra sabitleyici bir alet ile numune yerleştirilmek üzere sabitlenmiştir. Pundit Lab+ aletinden gerekli kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Numunenin boyları metre cinsinden girilmiştir. Ultrasonik dalga hızlarını ölçmek için probaların uçlarına ve numunenin uç kısımlarına özel bir jel sürülmüştür. Alıcı ve verici başlıklara belirli bir kuvvet uygulanarak başlıklar örneklerle temas ettirilmiştir. Bu işlemlerin kesinliği açısından uygulama 3 kez tekrarlanmıştır. İşlemlerin ardından ekranda elde edilen sonik dalga hızı ve zaman değerleri sayısal olarak okunmuş ve kaydedilmiştir. Standart sonik dalga hızı sınıflaması diyagramı Çizelge 5.5 'de verilmiştir. A grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4615.33 m/s ve 4426.67 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre A grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. B grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4726.33 m/s ve 4500.33 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre B grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. C grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4681.67 m/s ve 4457 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre C grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. D grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4854.67 m/s ve 4644.67 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre D grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. E grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4570.33 m/s ve 4381.67 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre E grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. F grubu örneklerin ortalama P ve S sonik dalga hızları sırasıyla 4462.33 m/s ve 4209 m/s bulunmuştur. Bu sınıflamaya göre F grubu örnekleri yüksek hızlı olarak tanımlanmaktadır. Muğla-Kavaklıdere mermeri örneğinin deney öncesi P

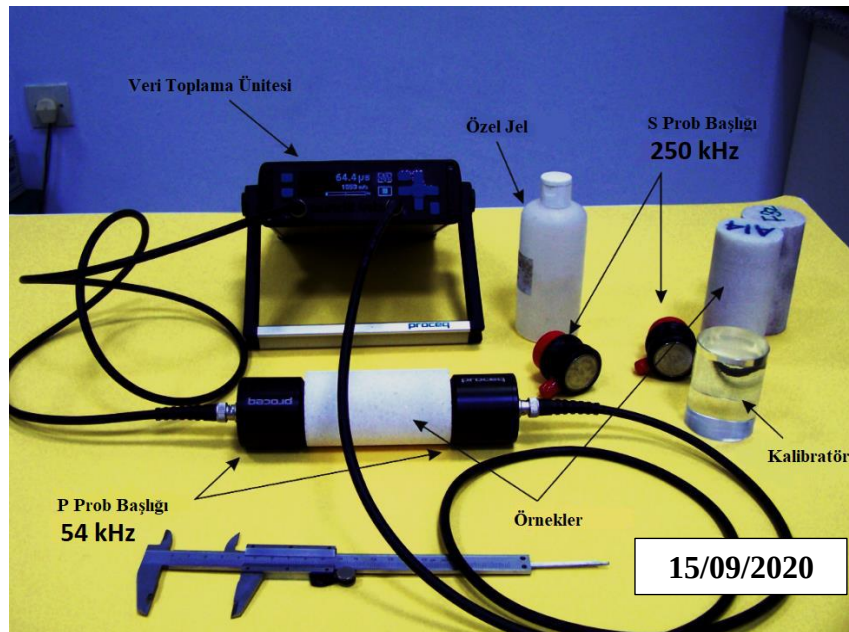
(boyuna) ve S (enine) ultrasonik dalga hızları, elastise değeri (young modülü), Poisson oranı ve rijidite modülü Çizelge 5.6 ‘de verilmiştir. Şekil 5.12 ‘de ölçümlerde kullanılan Pundit Lab+ aleti ve ölçüm yöntemi gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Ultrasonik dalga hızı sınıflaması [37].

Sınıf	Dalga Hızı (m/s)	Tanımlama
1	< 2500	Çok Düşük Hız
2	2500 - 3500	Düşük Hız
3	3500 - 4000	Orta Hız
4	4000 - 5000	Yüksek Hız
5	> 5000	Çok Yüksek Hız



Şekil 5.11 : Sonik dalga hızının çalışma prensibi.



Şekil 5.12 : Pundit Lab+ aleti ile ultrasonik dalga hızı tayini.

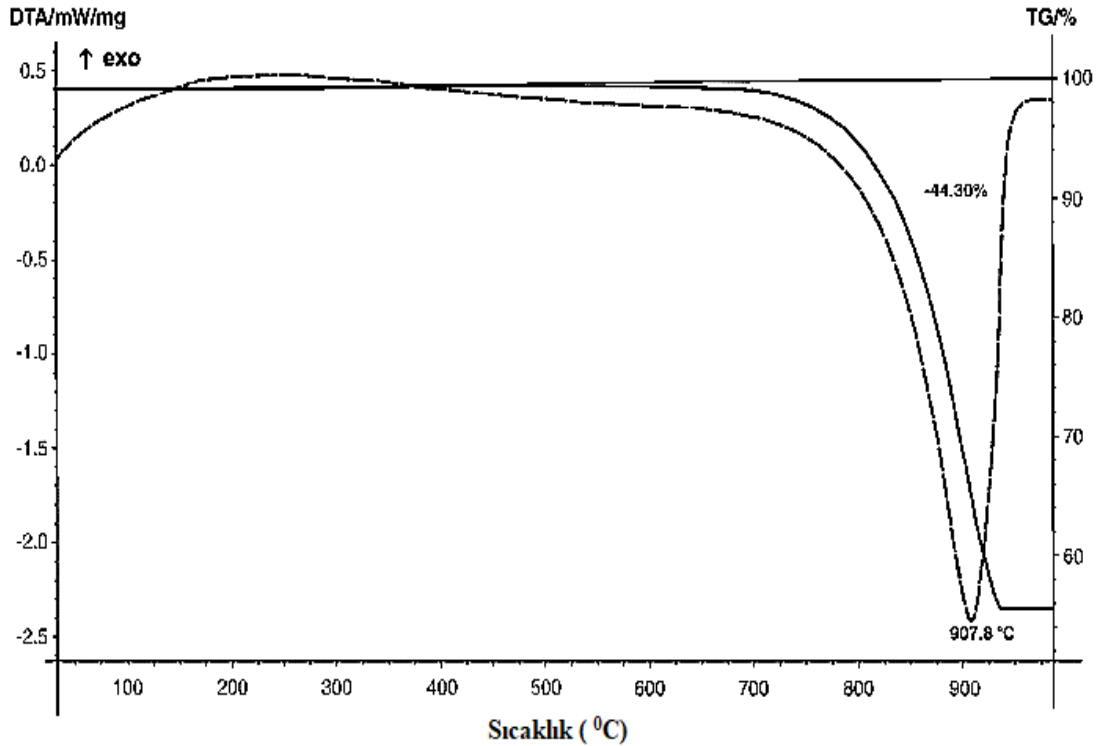
Çizelge 5.6 : Sonik dalga hızlarının ısıtma işlem öncesi sonuçları.

Grup	P dalga hızı (m/s)	S dalga hızı (m/s)	Isıtma İşlem Öncesi					
			Örnek Boyu (cm)	Örnek Çapı (cm)	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Rijidite Modülü (GPa)
A1	4409	4114	12.26	5.3	2.71	56.53	0.23	0.4587
A2	5221	5146	12.30	5.3	2.71	61.17	0.29	0.7176
A3	4216	4020	12.12	5.3	2.71	54.09	0.22	0.4379
B1	4296	4013	12.17	5.3	2.71	54.26	0.22	0.4364
B2	5357	5197	11.90	5.3	2.71	62.59	0.30	0.7319
B3	4526	4291	12.43	5.3	2.71	57.45	0.24	0.4990
C1	5021	4819	11.97	5.3	2.71	59.78	0.27	0.6293
C2	4498	4261	12.13	5.3	2.71	58.01	0.25	0.4920
C3	4526	4291	12.36	5.3	2.71	58.73	0.26	0.4990
D1	5571	5328	12.20	5.3	2.71	63.42	0.31	0.7693
D2	4296	4080	12.18	5.3	2.71	54.03	0.22	0.4511
D3	4697	4526	12.40	5.3	2.71	57.77	0.24	0.5551
E1	4114	3981	12.33	5.3	2.71	53.20	0.21	0.4295
E2	5188	4980	12.36	5.3	2.71	59.86	0.27	0.6721
E3	4409	4184	12.30	5.3	2.71	57.63	0.24	0.4744
F1	4516	4360	12.25	5.3	2.71	58.68	0.26	0.5152
F2	4724	4380	12.06	5.3	2.71	58.96	0.26	0.5199
F3	4147	3887	12.37	5.3	2.71	52.35	0.20	0.4094

5.3.8 Deney örneklerinin ısıtma işlemine tabi tutulması

Kaya kütlelerindeki kırıkların küçük ölçekli fiziksel durumlara benzetmek amacıyla, iri taneli Muğla-Kavaklıdere mermeri örnekleri, tane sınırlarında kalıcı kopmalar sağlamak için ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla, yukarıda orijinal halde iken ölçülen özellikler ayrıntılı olarak verilmiş, 3'şerli gruplardan oluşan 18 adet mermer örneği kullanılmıştır. Orijinal örnek grubu dâhil toplam 6 farklı grup oluşturulmuştur (Çizelge 5.7). Her grup örnek farklı sayıda ısıtma işlemi döngüsüne maruz bırakılmıştır. Her bir ısıtma işlemi döngüleri için maksimum sıcaklıkta ve laboratuvarında bekletme süreleri 24 saat olarak seçilmiştir. Maksimum sıcaklık, aynı mermer üzerinde yapılan diferansiyel termal analiz (Şekil 5.13) sonucundan hareketle 400°C olarak belirlenmiştir [38].

B, C, D, E ve F grubu örnekler 400 °C 'lik etüvde 24 saat kalacak şekilde etüvün ısınma süresi olan 1 saat 1 dakikalık süre de edilerek bu işlem tekrarlanmıştır (Şekil 5.14). Isıtma işlemi sonrası örnekler üzerinde yukarıda sonuçları verilen deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Ayrıca ısıtma işlemi sonrası ince kesit ve epoksi ile parlatılmış kesitler incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 5.13 : Muğla-Kavaklıdere mermeri üzerinde yapılan diferansiyel termal analiz (DTA) grafiği [38].

Çizelge 5.7 : Deney örneği gruplarının ısıtım sonrası ortalama birim hacim ağırlıkları ve poroziteleri.

Örnek Grupları	Termal Davranış	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Porozite (% n)
A	Orijinal	26.63	26.65	0.18
B	1 döngü	26.09	26.27	0.68
C	2 döngü	26.08	26.25	0.63
D	3 döngü	26.06	26.24	0.69
E	4 döngü	26.06	26.24	0.68
F	5 döngü	26.06	26.24	0.69



Şekil 5.14 : Isıtım işlemde kullanılan yüksek sıcaklık fırını (etüv).

5.3.9 Isıtım sonrası örneklerin kapiler su emmesi

Bu deney [39] standartları gözetilerek yapılmıştır. Örnekler $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lık etüvden çıkarılarak desikatörde örnekler soğuyana kadar kapalı ortamda nem almayacak şekilde soğutulmuştur. Soğuma işleminin ardından örneklerin boy ve çap değerleri kumpas aracılığıyla ölçülmüştür. Ayrıca örneklerin kuru ağırlıkları da hassas terazide ölçülmüştür. Örneklerin alt kısımları 3 mm boşluk kalacak şekilde kalemle çizilerek işaretlenmiştir. Örnekler çelik numune tepsisinde, su emmesi için tabanları 3 mm suyun içerisine batacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.15). Damlalık pipet yardımıyla tepsiye 3 mm dolacak şekilde saf su eklenmiş ve örneklerin su emmesi

sağlanmıştır. Ölçümler, başlangıçta çok sık, daha sonra uzun zaman aralıklarında yapılmıştır.

Örnekler belirlenen zaman aralıklarında sudan çıkarılıp kuru bez ile yüzeyi silinip hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür ve tekrardan hızlı şekilde tepsiye konup işleme devam ettirilmiştir. Buradaki amaç, zamana bağlı olarak örneğin ne miktarda bünyesine su emdiğini ölçmek olmuştur. Daha önce yapılan ısıtılma işlemin etkisi ile çatlatılmış örneklerin içerisinde ne miktarda su emdiği tespit etmek ve bunun ısıtılma işlemle ilişkisini ortaya koymak amacı güdülmüştür. Buna göre, ortalama kapiler su emme A grubu örnekler için % 0.07, B grubu örnekler için % 0.6, C grubu örnekler için % 0.63, D grubu örnekler için % 0.69, E grubu örnekler için % 0.68 ve F grubu örnekler için % 0.68 olarak belirlenmiştir.

Isıtılma işlemi en çok maruz bırakılan F grubu örnekler olmasına rağmen D, E ve F grubu örneklerin kapiler su emmesi hemen hemen aynıdır. B ve C grubu örnekler için ise bu değer daha düşüktür. Deney sonuçlarına göre, örnek gruplarının kapiler su emmeleri sırasıyla $D > F > E > B > C > A$ şeklindedir. Bu sonuçtan hareketle, tane sınırları arasındaki açılmanın üç adet ısıtılma işlem döngüsünden sonra artış göstermediği dolaylı olarak söylenebilir. D grubu örneklerin kapiler su seviyeleri Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 5.8 ‘de topluca verilmiştir. Bu ısıtılma işlem öncesi yapılan diğer deneylerde de D örneğinin porozitesi ve boşluk oranı diğer örneklerle nazaran biraz daha yüksek olarak elde edilmiştir. Beklenenden farklı bir durumla karşılaşılması deney örneklerinin tane boyutu açısından tam homojen olmayabileceğine işaret olarak değerlendirilmiştir.

5.3.10 Isıtılma işlem sonrası kuru birim hacim ağırlığı

Isıtılma işlem sonrası kuru birim hacim ağırlık deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Bu deney, [35] tarafından önerilen standarda göre yapılmıştır. Belirlenen değerler Çizelge 5.9 ‘de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

5.3.11 Isıtılma işlem sonrası doygun birim hacim ağırlığı

Isıtılma işlem sonrası tekrarlanan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10 ‘de ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

5.3.12 Isıl işlem sonrası örneklerin hacmi

Doygun birim hacim ağırlık deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler ısı işlem sonrası için (bkz Çizelge 5.10) 'de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

5.3.13 Isıl işlem sonrası örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranları

Görünür gözeneklilik (porozite) deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deney mevcut standartlara göre yapılmıştır [35] ve [40]. Gerekli hesaplamaların sonuçları Çizelge 5.11 'de verilmiştir.

5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları

Sonik hız ölçümleri ısı işlem sonrası tekrarlanmıştır [35] ve [36]. Ölçülen P (boyuna) ve S (enine) ultrasonik dalga hızları kullanılarak hesaplanan elastise modülü (young modülü), Poisson oranı ve rijidite modülü değerleri Çizelge 5.12 'de verilmiştir.

5.3.12 Isıl işlem sonrası örneklerin hacmi

Doygun birim hacim ağırlık deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler ısı işlem sonrası için (bkz Çizelge 5.10) 'de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

5.3.13 Isıl işlem sonrası örneklerin görünür porozite, boşluk oranı, doluluk oranları

Görünür gözeneklilik (porozite) deneyi, İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İndeks Özellikler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deney mevcut standartlara göre yapılmıştır [35] ve [40]. Gerekli hesaplamaların sonuçları Çizelge 5.11 'de verilmiştir.

5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları

Sonik hız ölçümleri ısı işlem sonrası tekrarlanmıştır [35] ve [36]. Ölçülen P (boyuna) ve S (enine) ultrasonik dalga hızları kullanılarak hesaplanan elastise modülü (young modülü), Poisson oranı ve rijidite modülü değerleri Çizelge 5.12 'de verilmiştir.

5.3.14 Isıl işlem sonrası örneklerin sonik hızları

Sonik hız ölçümleri ısıtıl işlem sonrası tekrarlanmıştır [35] ve [36]. Ölçülen P (boyuna) ve S (enine) ultrasonik dalga hızları kullanılarak hesaplanan elastise modülü (young modülü), Poisson oranı ve rijidite modülü değerleri Çizelge 5.12 ‘de verilmiştir.



Şekil 5.15 : D grubu mermer örneklerinin kapiler su emme deneyine tabi tutuluşu.

Çizelge 5.8 : Deney örneklerinin kapiler su emme miktarları.

Örnek Numaraları	Kapiler Su Emme (% ω)	Ort. Kapiler Su Emme (% ω)
A1	0.07	0.066
A2	0.06	
A3	0.07	
B1	0.61	0.676
B2	0.77	
B3	0.65	
C1	0.57	0.63
C2	0.66	
C3	0.66	
D1	0.64	0.69
D2	0.63	
D3	0.80	
E1	0.68	0.676
E2	0.65	
E3	0.70	
F1	0.73	0.68
F2	0.69	
F3	0.62	

Çizelge 5.9 : Isıl işlem sonrası deney örneklerinin kuru yoğunluğu, kuru birim hacim ağırlıkları.

Örnek Grupları	Kuru Ağırlık (g)	Doygun Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk (g/cm ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
A1	731.99	732.49	269.81	2.71	26.61
A2	733.87	734.34	269.99	2.72	26.66
A3	725.86	726.36	267.53	2.71	26.62
B1	729.17	733.63	273.59	2.67	26.15
B2	714.39	719.92	269.59	2.65	26.00
B3	740.00	744.82	277.97	2.66	26.12
C1	715.96	720.05	268.40	2.67	26.17
C2	726.93	731.75	273.70	2.66	26.05
C3	738.94	743.84	278.47	2.65	26.03
D1	730.07	734.75	274.41	2.66	26.10
D2	724.08	728.67	272.08	2.66	26.11
D3	715.69	721.43	270.54	2.65	25.95
E1	735.74	740.81	276.94	2.66	26.06
E2	741.42	746.25	278.74	2.66	26.09
E3	731.04	736.21	275.42	2.65	26.04
F1	730.17	735.51	275.34	2.65	26.01
F2	718.40	723.41	270.46	2.66	26.06
F3	737.93	742.57	277.33	2.66	26.10

Çizelge 5.10 : Isıl işlem sonrası deney örneklerinin doymun yoğunluğu ve doymun birim hacim ağırlıkları.

Örnek Grupları	Kuru Ağırlık (g)	Doymun Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Doymun Yoğunluk (g/cm ³)	Doymun Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
A1	731.99	732.49	269.81	2.71	26.63
A2	733.87	734.34	269.99	2.72	26.68
A3	725.86	726.36	267.53	2.72	26.63
B1	729.17	733.63	273.59	2.68	26.31
B2	714.39	719.92	269.59	2.67	26.20
B3	740.00	744.82	277.97	2.68	26.29
C1	715.96	720.05	268.40	2.68	26.32
C2	726.93	731.75	273.70	2.67	26.23
C3	738.94	743.84	278.47	2.67	26.20
D1	730.07	734.75	274.41	2.68	26.27
D2	724.08	728.67	272.08	2.68	26.27
D3	715.69	721.43	270.54	2.67	26.16
E1	735.74	740.81	276.94	2.67	26.24
E2	741.42	746.25	278.74	2.68	26.26
E3	731.04	736.21	275.42	2.67	26.22
F1	730.17	735.51	275.34	2.67	26.21
F2	718.40	723.41	270.46	2.67	26.24
F3	737.93	742.57	277.33	2.68	26.27

Çizelge 5.11 : Isıl işlem sonrası örneklerin porozite, boşluk oranı ve doluluk oranları sonuçları.

Örnek Grupları	Görünür Porozite (% n)	Boşluk Oranı (% e)	Doluluk Oranı (%)
A1	0.19	0.23	99.77
A2	0.17	0.20	99.80
A3	0.19	0.23	99.77
B1	0.61	1.56	98.44
B2	0.77	3.35	96.65
B3	0.65	1.86	98.14
C1	0.57	1.32	98.68
C2	0.66	1.94	98.06
C3	0.66	1.94	98.06
D1	0.64	1.78	98.22
D2	0.63	1.70	98.30
D3	0.80	4.00	96.00
E1	0.69	2.22	97.78
E2	0.65	1.86	98.14
E3	0.71	2.45	97.55
F1	0.73	2.70	97.30
F2	0.70	2.33	97.67
F3	0.63	1.70	98.30

Çizelge 5.12 : Sonik dalga hızlarının ısıtıl işlem sonrası sonuçları.

Grup	P dalga hızı (m/s)	S dalga hızı (m/s)	Isıl İşlem Sonrası					
			Örnek Boyu (cm)	Örnek Çapı (cm)	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Rijidite Modülü (GPa)
A1	4438	4157	12.26	5.3	2.71	56.68	0.23	0.4683
A2	5242	5170	12.30	5.3	2.72	61.23	0.29	0.7270
A3	4289	4065	12.12	5.3	2.71	55.34	0.22	0.4478
B1	1420	1115	12.17	5.3	2.67	30.64	0.14	0.0332
B2	2226	2186	11.90	5.3	2.65	41.73	0.18	0.1266
B3	1487	1273	12.43	5.3	2.66	32.41	0.14	0.0431
C1	1628	1581	11.97	5.3	2.67	35.56	0.16	0.0667
C2	1417	1346	12.13	5.3	2.66	31.32	0.14	0.0482
C3	1505	1217	12.36	5.3	2.65	34.59	0.15	0.0392
D1	1977	1697	12.20	5.3	2.66	38.77	0.17	0.0766
D2	1255	1035	12.18	5.3	2.66	26.89	0.13	0.0285
D3	2168	1840	12.40	5.3	2.65	39.10	0.18	0.0897
E1	943	867	12.33	5.3	2.66	18.74	0.11	0.0200
E2	1523	1420	12.36	5.3	2.66	33.69	0.15	0.0536
E3	1358	1048	12.30	5.3	2.65	25.74	0.14	0.0291
F1	1272	1005	12.25	5.3	2.65	24.11	0.13	0.0268
F2	1320	1144	12.06	5.3	2.66	25.03	0.14	0.0348
F3	1269	958	12.37	5.3	2.66	23.81	0.13	0.0244

5.3.15 İnce kesit ve epoksi ile parlatılmış kesitlerin görünümü ve yorumlanması

Muğla-Kavaklıdere mermer örnekleri öncelikle Jeoloji İnce Kesit Laboratuvarı'nda yatay ve dikey ekseninde ince kesit haline getirilmiştir. Daha sonra ilaveten parlatılmış kesitlerde bu laboratuvarında işlenmiştir. Örnekler Dedeman Optik Mineraloji Laboratuvarı, Optik Mineraloji ve Petrografi Araştırma Laboratuvarı'nda bakılmıştır. Öncelikle Muğla Kavaklıdere ve Yatağan bölgesinden çıkarılan mermerlerin diğer yerlerden çıkarılan mermerlere göre kristal yapısının daha küçük olması ama kimyasal olarak öğütülebilir olması ve saf yapıya sahip olması bakımından en tercih edilen mermerler arasında yer alması önemlidir. Ayrıca bu bölgedeki mermer yataklarının çok zengin rezerve sahip olması, ayrıca beyazlığının da çok yüksek olması tercih edilme sebeplerinden biridir. Türkiye'deki en beyaz oluşuma sahip mermer yataklarından birisidir.

Muğla-Kavaklıdere mermer örneklerinin petrografik özellikleri; homoblastik dokuya sahiptir ayrıca homojen özellik göstermektedir. Eş tane boyuna sahip, düzgün şekilli ve kalsit minerallerinden oluşmuştur. Sınırları nispeten düz ve hafif kıvrımlıdır. Oldukça iri taneli kristal yapıya sahip örnekler girintili çıkıntılı ve dantelsi sınırlar boyunca kenetlenmiştir ve kopmuş parçalar bulunmaktadır. Kimyasal olarak %99 oranında CaCO_3 içerir. Tane büyüklüğü 0.5-2 mm arasında değişkenlik gösterir. Malzemede dolgu bulunmamaktadır. Basınç etkisine işaret eden polisentetik kayma ikizleri mükemmel gelişmiştir. Örneklerde şeker dokusu gözlenmiştir. Kalsit dilinimleri A örneğinden F örneğine doğru azalma göstermektedir. Bu da bize ısı işlemi ile dilinimlerin kaybolduğu kanısını verir. Bu olgu aynı zamanda [38] tarafından tane sınırlarının ısı işlemi sonrası kalsit tanelerinin ayrılması olayının ısıtma ve soğutma döngülerinin sayısına göre değişebileceği görüşü ile örtüşmektedir. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 'de A, B, C, D, E ve F örneklerinin polarizan mikroskopta görüntüleri incelenmiştir.

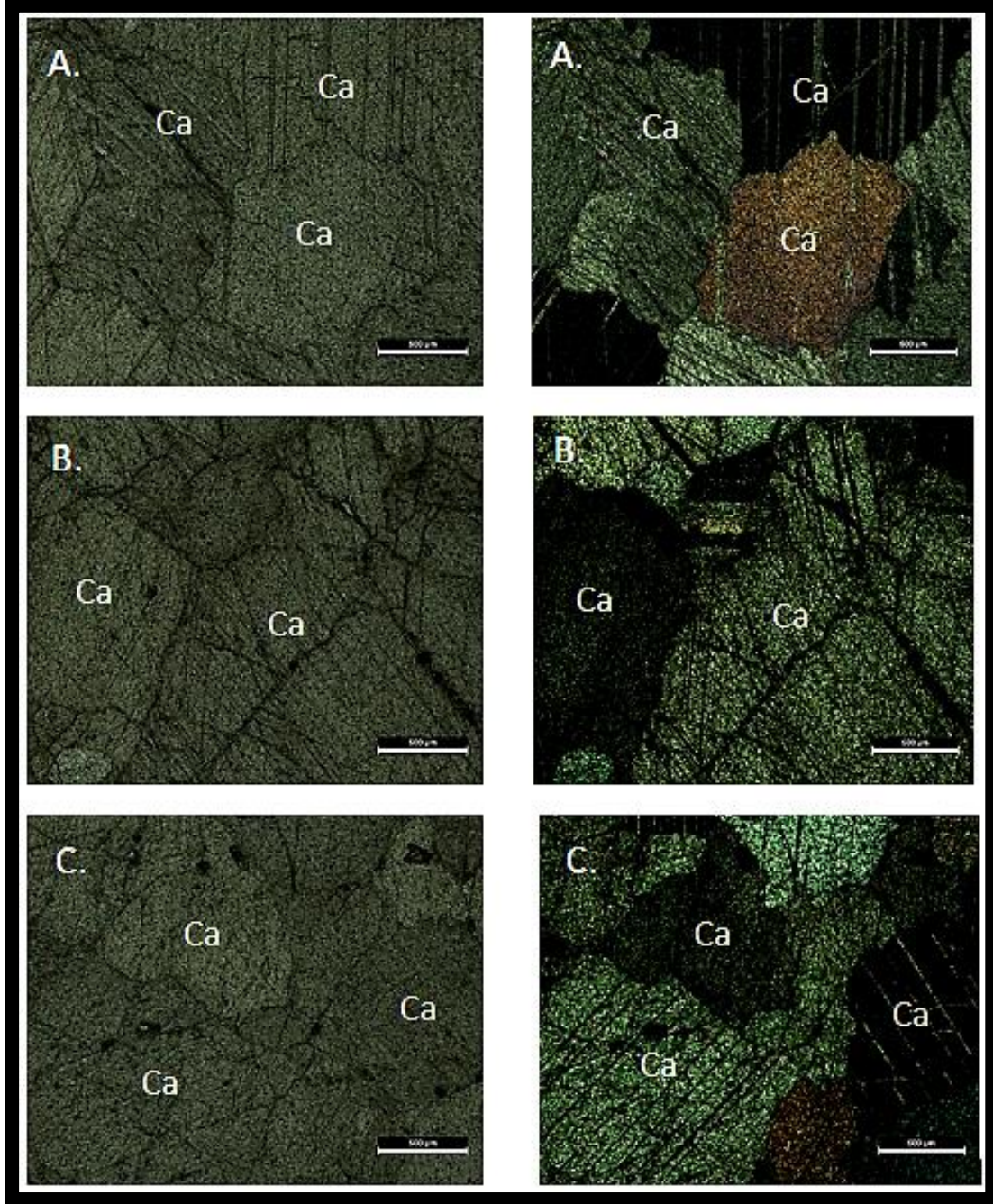
Bu görüntülere göre A örneğinde kalsit dilinimleri bariz şekilde görülmektedir. Ayrıca A örneğinde mikro çatlaklı, fisürlü yapılara çok az rastlanmaktadır. B örneğinde mikro çatlaklı yapılara rastlanılmaktadır. Ayrıca kopmuş parçalar net bir şekilde gözükmemektedir. C örneğinde ısı işlemin etkisiyle bozunmalar görülmektedir. Ayrıca mikro çatlaklı yapılar ve dilinimler göze çarpmaktadır. D örneğinde çok sayıda mikro çatlaklı yapılar gelişmiştir. Kalsit mineralinde ısı işlemin etkisiyle bozunmalar

meydana gelmiştir. E örneğinde doku sınırları daha çok granoblastik yapıya benzemektedir. Dokusu diğerlerine nazaran daha ince tanelidir. Son örnek olan F ‘de ise artık mikro çatlakların neredeyse bütün yüzeye etki ettiği görülmektedir. Ayrıca B ve D örnekleri diğer örneklerle göre daha iri taneli yapıya sahiptir. Kalsit oranları da diğer örneklerle göre daha fazladır. F örneği ısıtılma en çok tabi tutulan örnek olduğu için kalsit minerallerinin bozulduğu şekilde de gözükmemektedir. Ayrıca B ve D örneklerinin dokuları diğer örneklerle göre daha iri ve büyük parçalar içerir. Bu durumun etkisi porozite, su emme, boşluk oranı gibi fiziksel parametrelere de yansımıştır. D örneği su emme yüzdesi, porozitesi ve boşluk oranları bakımından diğer örneklerle göre üstte yer almaktadır. Buradan ısıtılma etkisi ile kalsit minerallerinin hangi örnekte çoksa onda daha çok bozulduğu ayrıca ısıtılma göre de bu durumun farketildiği sonucuna varabiliriz. Isıtılma işleminden daha fazla etkilenen örneklerin mikro çatlak, fisür açıklıkları ve bozunmaların arttığı, orijinalliğini koruyan ve ısıtılma işleminden az etkilenen örneklerin çatlakların olmadığı ya da çok az olduğu, bozunmaların da nispeten ısıtılma işleminden daha fazla etkilenenlere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Burada kalsit minerali hangi örnek daha çok içeriyorsa bozunmanın o örnekte daha çok olduğunun bunun sonucunda da mikro çatlak gelişiminin o örnekte artması ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca örneklerin tanelerin farklılıkları (iri ve ince olması) ile ısıtılma etkisinin uyumlu bir birlikteliğini göstermektedir. Bu tez kapsamında çıkarılacak sonuçlardan birisi de açıklanmış oldu.

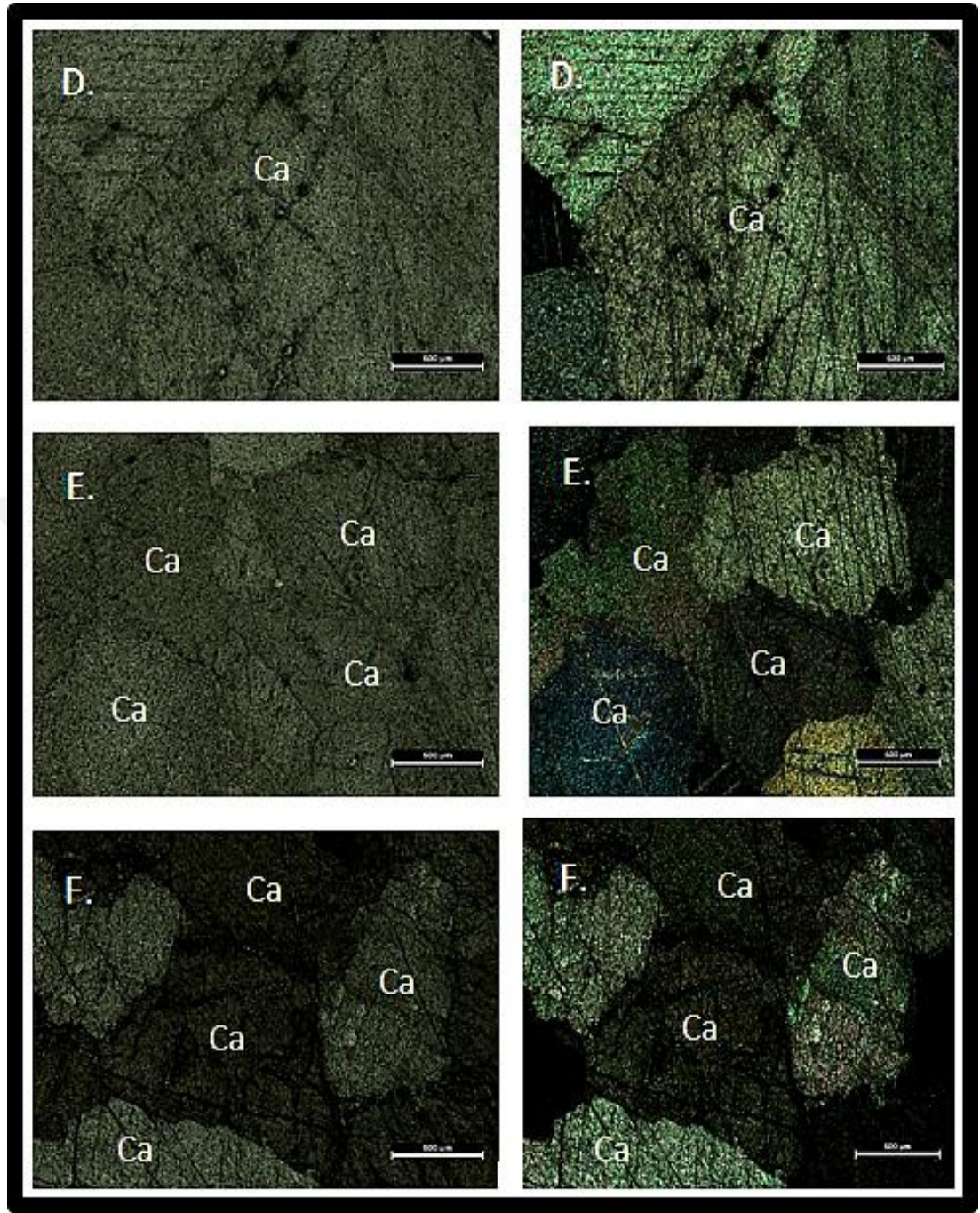


Şekil 5.16 : Mermer örneklerinin optik mikroskopta incelenmesi.

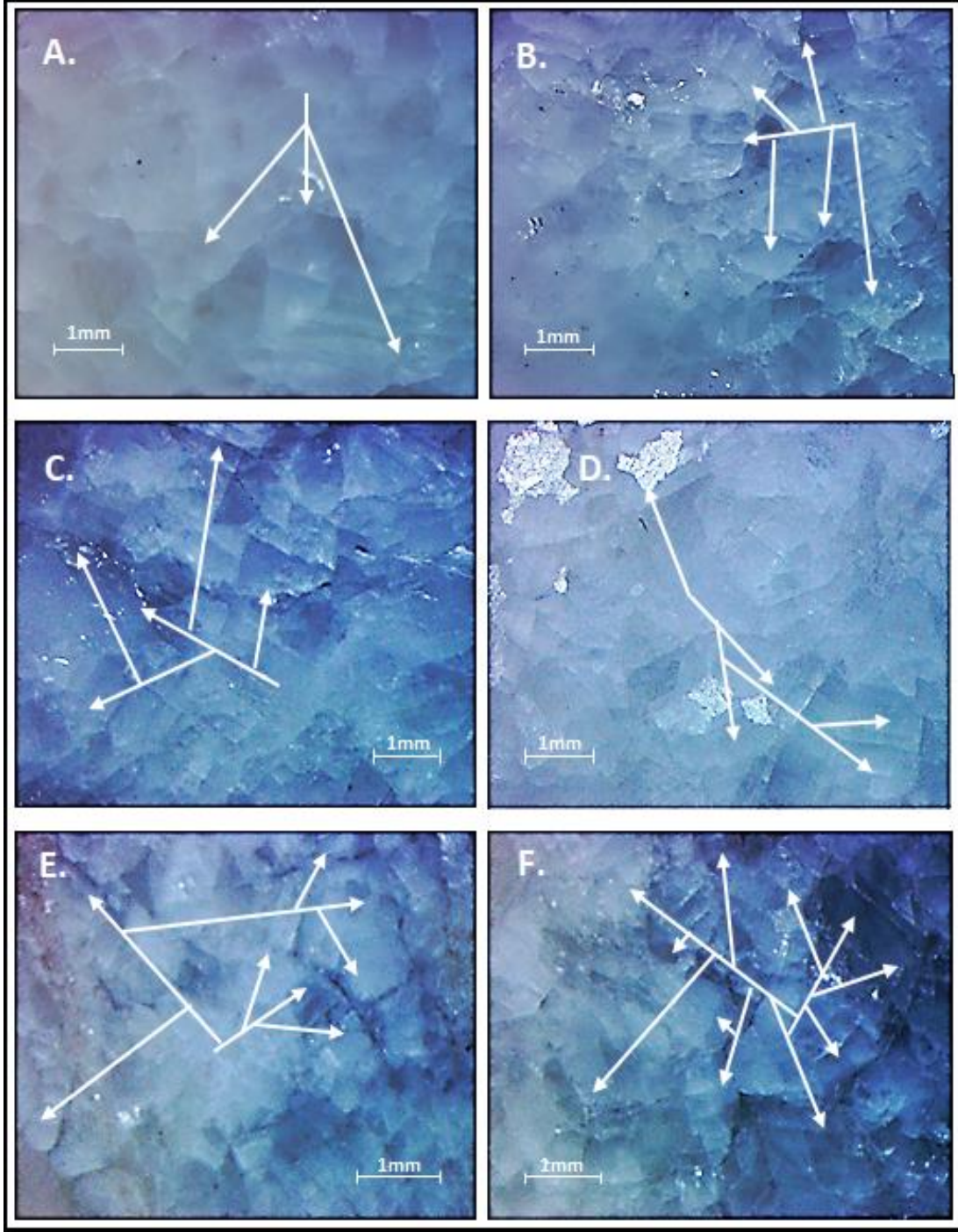
Şekil 5.17 ve 5.18 ‘da mermer örneklerinin polarizan mikroskopta incelenme görüntüsü yer almaktadır. Parlak kesitlerin binoküler mikroskop altındaki (Şekil 5.19), ince kesitlerin standart mikroskop altındaki dikey eksendeki görünüşleri ise Şekil 5.20 ve 5.21, yatay eksendeki görünüşleri de Şekil 5.22 ve 5.23’de gösterilmiştir.



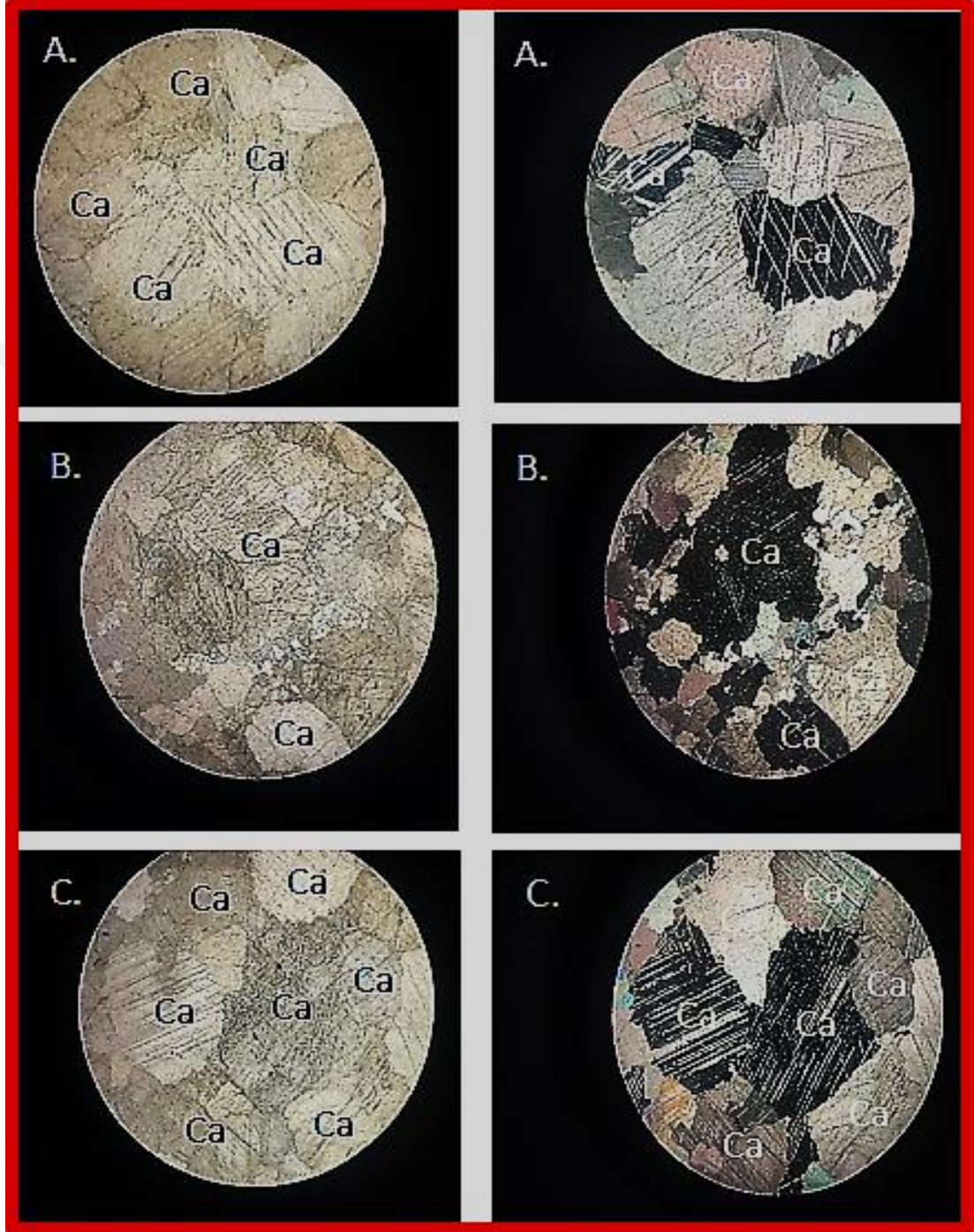
Şekil 5.17 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıtıl işlem sonrası polarizan mikroskoptaki görüntüsü.



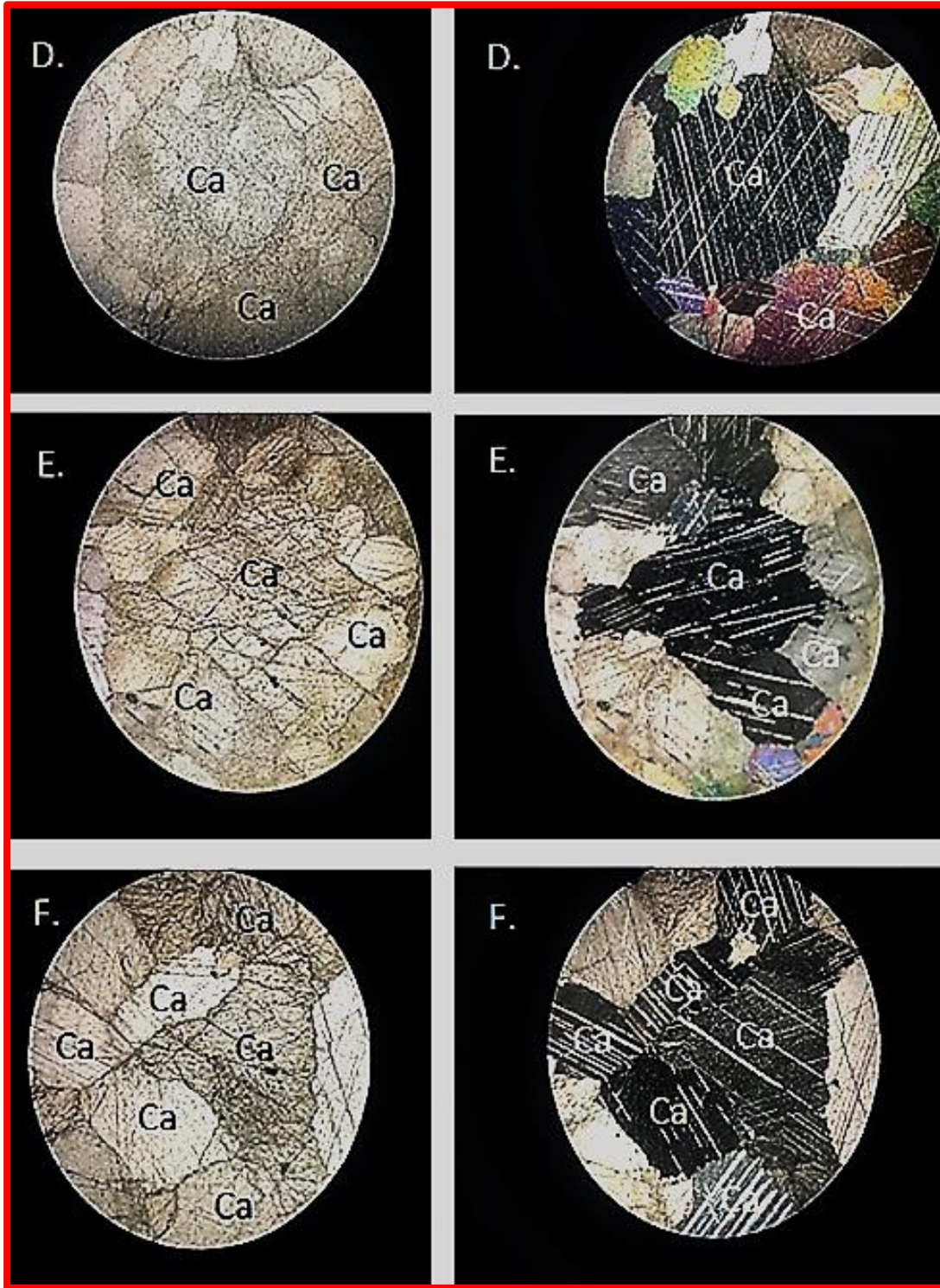
Şekil 5.18 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası polarizan mikroskoptaki görüntüsü.



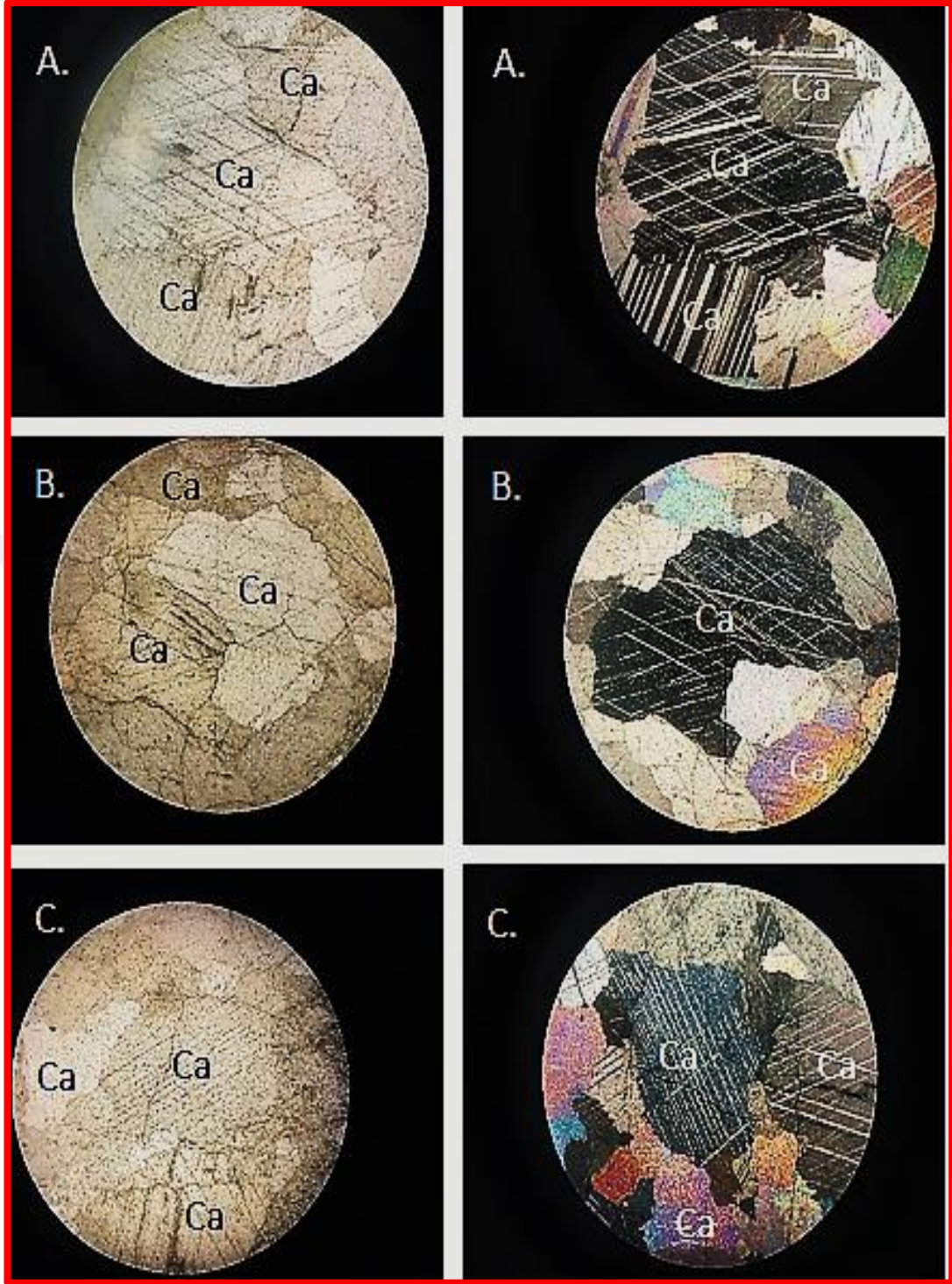
Şekil 5.19 : A, B, C, D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası binoküler mikroskoptaki görüntüsü.



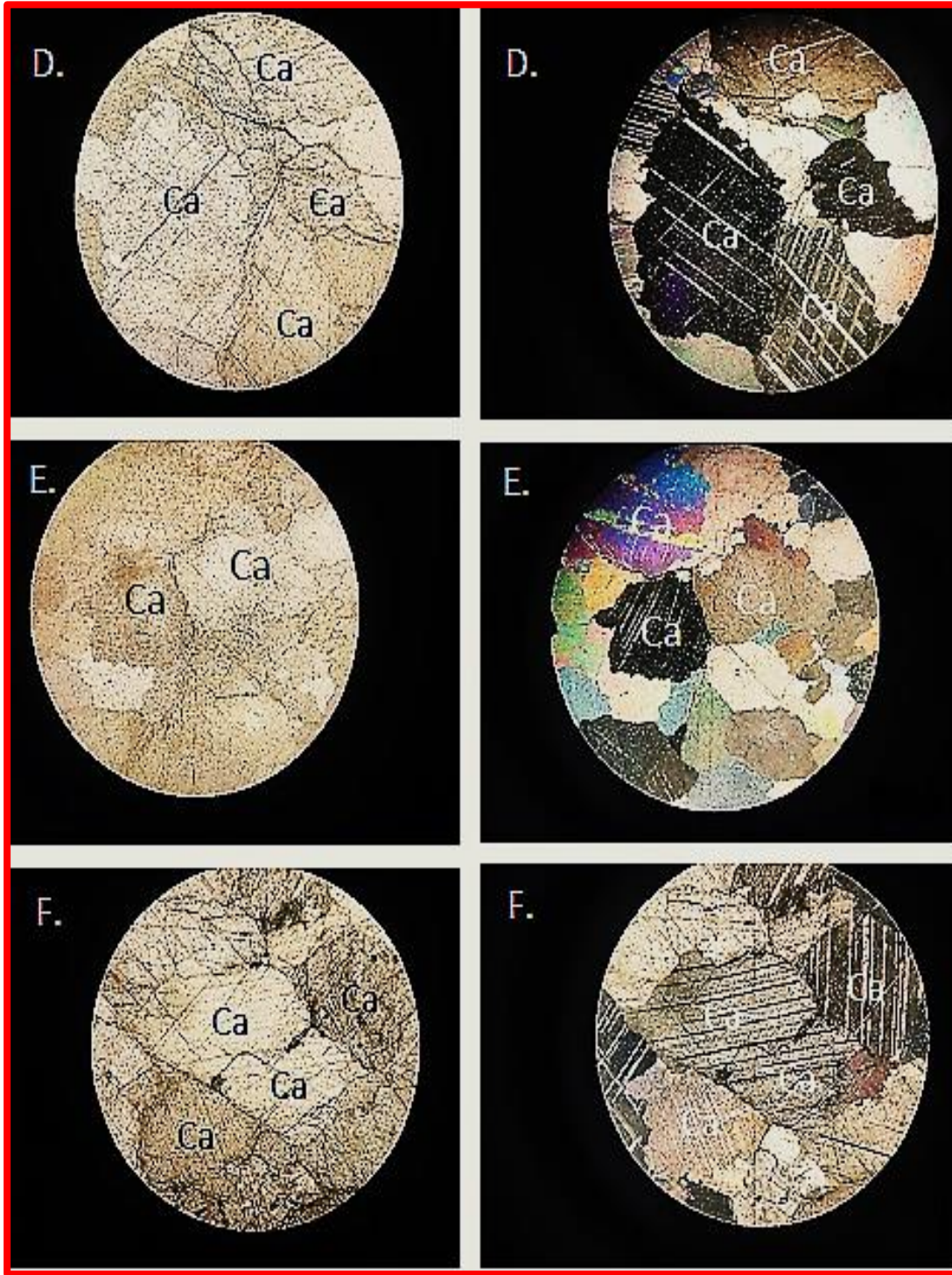
Şekil 5.20 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası dikey ekseninde optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).



Şekil 5.21 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası dikey eksenindeki optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).



Şekil 5.22 : A, B ve C grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası yatay ekseninde optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).



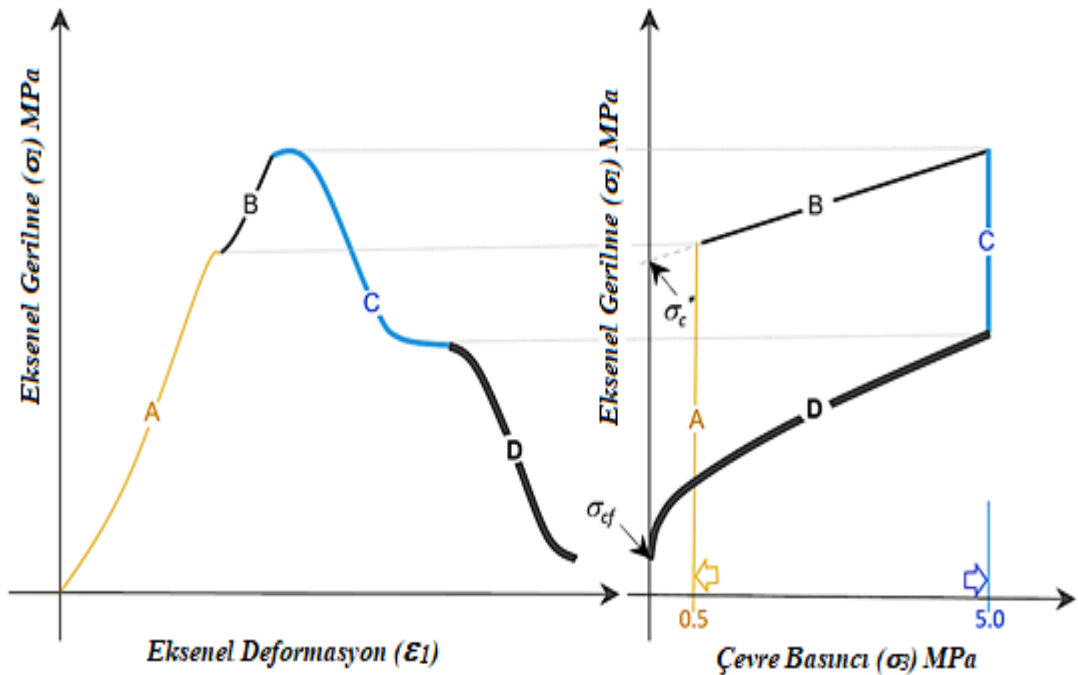
Şekil 5.23 : D, E ve F grubu mermer örneklerinin ısıt işlem sonrası yatay eksenindeki optik mikroskop görüntüsü (Ölçek: 400µm).

5.3.16 Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneyler ve sonuçları

Bu deneydeki amaç, tek bir örneğin yenilme zarfının, yenilme noktasından itibaren çevre basıncının düzenli artırılması sonucu buna karşılık gelen eksenel gerilme değerlerinin okunması ile yenilme zarfının elde edilmesidir. Deney sırasındaki veriler X-Y kaydediciler, bilgisayar ve gözle yapılan okumalar ile kayda geçirilebilmektedir. Geleneksel üç eksenli deneylerde yenilme zarfı aynı malzemeden alınan çok sayıda örnek için elde edilen sonuçlardan hareketle belirlenirken, sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerde tek örnek için yenilme zarfı elde edilebilmektedir [68].

Üç eksenli basınç deneyleri üç şekilde yapılmaktadır. Tip I dediğimiz tek kırılma aşamalı deneyde, her deneyin bitişinde kırılma zarfındaki tek bir nokta elde edilir. Bu noktalardan zarfı oluşturmak için birden fazla deney yapmak gerekir. Tip II dediğimiz çok kırılmalı aşamalı deneyde, deneyin sürekli ya da kademeli yapılması ve bunun sonucunda dayanım zarfının elde edilmesiyle olur. Son olarak Tip III (sürekli yenilme durumunda üç eksenli deney) denilen yöntem ise bu tez kapsamında kullanılmıştır.

Sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden elde edilen veriler gerilme-deformasyon düzleminde davranışın tanımlanması ve normal gerilme düzleminde yenilme zarfının elde edilmesine olanak tanımaktadır. Deneyin aşamaları ile elde edilen eğriler Şekil 5.24 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.24 : Sürekli yenilme durumunda üç eksenli eşzamanlı deney verilerinin davranış ve dayanım düzlemlerinde gösterimi [69].

Şekil 5.24 ‘de şematize edilerek gösterilen deney aşamaları;

- A) Örneğin yenilme anına kadar uygulanan çevre basıncı (σ_3) 0.5 MPa olarak sabit tutulmuştur.
- B) Yenilme anından itibaren gerilme-deformasyon diyagramında eksenel gerilmeyi (σ_1) doğrusal arttıracak şekilde, çevre basıncı düzenli olarak 5 MPa’a kadar artırılmıştır.
- C) Bu aşamada 5 MPa’lık sabit çevre gerilmesi altında, örnekler yenilmeye maruz bırakılmış ve gerilme deformasyon diyagramında rezidüel dayanıma kadar yenilme sürdürülmüştür. Diğer bir ifade ile, yenilme sonrası gerilme-deformasyon eğrisinde eksenel gerilme sabit değere ulaşınca kadar çevre gerilmesi maksimum değerinde sabit tutulmuştur.
- D) Bu noktadan sonra (D) ise çevre gerilmesi düzenli olarak sıfıra varıncaya kadar düşürülmüştür. Her bir deney için eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon (ϵ_1) ve eksenel gerilme-çevre gerilmesi verileri belirli aralıklarla okunarak kaydedilmiştir. Sonuçta her bir örnek için yenilme öncesine ve yenilme sonrasına karşılık gelen eğriler deney süresince okunan değerler kullanılarak elde edilmiştir [68,70].

Deney sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve örneklerin yenilme sonrası dayanımlarına karşılık gelen zarflar (Şekil 5.24’de D ile gösterilen zarflar) matematiksel olarak ifade edilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, tüm örnek gruplarının yenilme zarfının aşağıda verilen aynı eşitlikle ifade edilebileceği görülmüştür.

$$\sigma_1 = -a_f \cdot \sigma_3^2 + m_f \sigma_3 + \sigma_{cf} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikteki a_f ve m_f katsayıları yenilme sonrasını temsil eden zarfın formuyla ilgili katsayıları, σ_{cf} ise doku yenilme süreci sonundaki basınç mukavemetine karşılık gelmektedir. Hesaplanan bu büyüklükler ile σ_{cf}/σ_c^* arasındaki oran Çizelge 5.13’de topluca sunulmuştur. Rezidüel kesme dayanımları (c_r , ϕ_r) ise aşağıda verilen Mohr-Coulomb eşitliği yardımıyla hesaplanarak aynı çizelgeye eklenmiştir.

$$c_r = \sigma_c^* \cdot \frac{1-\sin\phi}{2\cos\phi} \quad \phi_r = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad m = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} \quad (5.2)$$

Yenilme öncesi ve yenilme sonrası durumları Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 'de gösterilmiştir. Kayaç örnekleri yenilme şekilleri olarak makaslama şeklinde yenilmiştir. Bu da yenilme sonrası anındaki örneklerin iyi bir şekilde kırıldığını gösterir. Üç eksenli deneyler 1 ve 2 numaralı örnekler üzerinde sabit yükleme hızı altında servokontrollü pres yardımıyla yapılmıştır (Şekil 5.27). Buna göre düşük porozite ve çatlaklı yapıya sahip A grubu örneklerin dayanımının yüksek çıktığı gözlenmiştir. En çok deformasyona uğrayan F örneği olmuştur. Bunun nedeni diğer örneklerle nazaran daha fazla ısıtma işlem görmesi bunun sonucunda porozitesinin ve su emmesinin artması sonucu dayanımının azalması ile açıklanabilir. Ayrıca tane sınırlarının ısıtma işlem sonrası kalsit tane sınırlarındaki ayrılmanın olması, ısıtma ve soğutma döngülerinin sayısına göre değişebileceği görüşü ile örtüşmektedir [38].



Şekil 5.25 : Üç eksenli deney öncesi örneklerin görüntüleri.



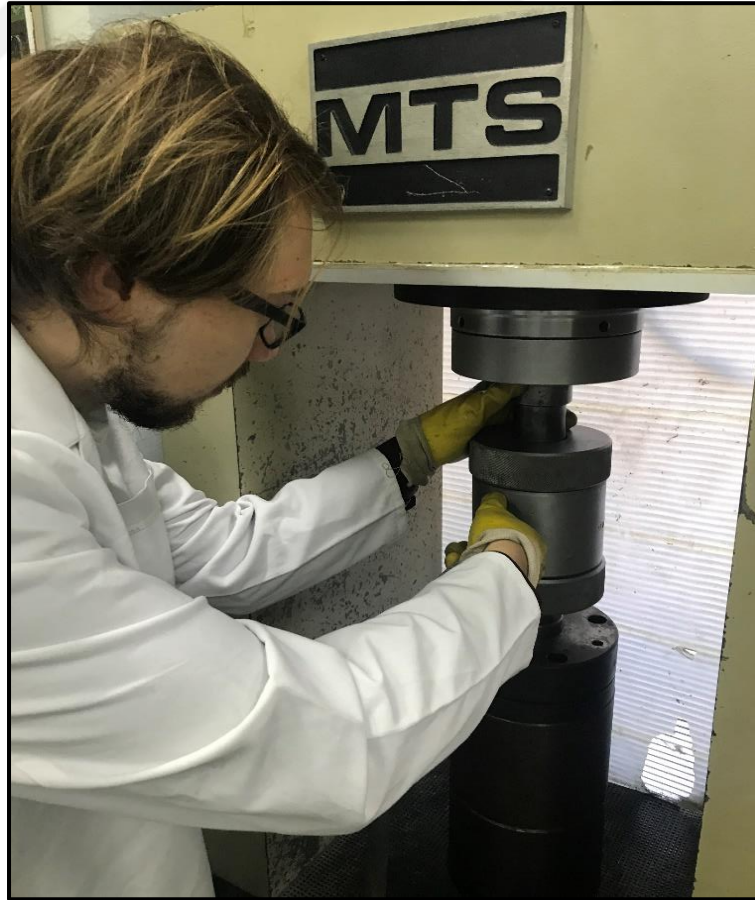
Şekil 5.26 : Üç eksenli deney sonrası örneklerin yenilme görüntüleri.



Şekil 5.27 : 1. ve 2. grup örneklerin üç eksenli deney sonrası yenilme formları.



Şekil 5.28 : Üç eksenli deneyde kullanılan yükleme ve kayıt sistemi.



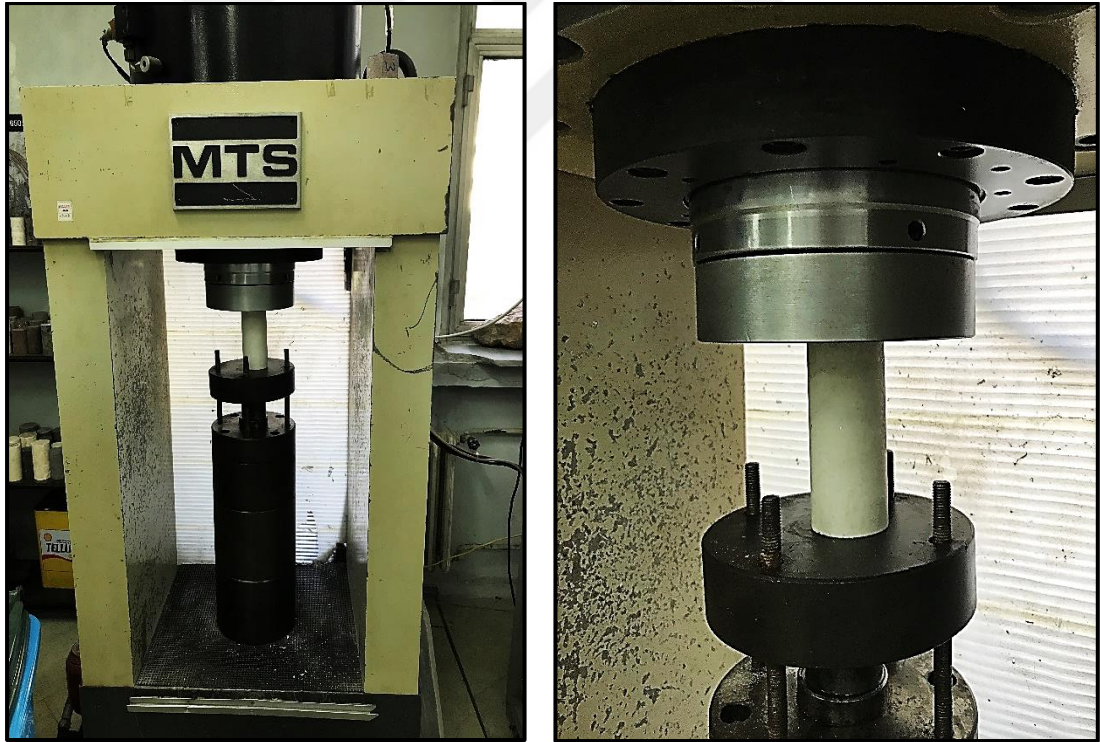
Şekil 5.29 : Üç eksenli deneyde Hoek hücresini yükleme sistemine yerleştirme işlemi.

Çizelge 5.13 : Deney örneklerinin yenilme sonrası dayanım zarflarından elde edilen mekanik büyüklükler.

Örnek Grupları	a_f	m_f	σ_c (MPa)	σ_{cf} (MPa)	σ_{cf} / σ_c	θ_r (°)	c_r (MPa)
A1	0.3487	11.105	65.78	18.882	0.287	71.37	2.16
A2	0.6575	13.193	66.25	15.896	0.240	71.17	1.83
B1	0.4538	11.309	62.87	17.251	0.274	70.71	2.02
B2	0.7378	13.119	62.63	13.952	0.223	70.19	1.67
C1	0.4094	10.978	61.10	15.807	0.259	70.02	1.90
C2	0.6653	12.362	58.49	12.320	0.210	69.02	1.53
D1	0.5414	11.610	58.00	13.549	0.233	69.25	1.67
D2	0.4122	10.783	54.02	9.2063	0.170	66.56	1.24
E1	0.8161	13.025	56.23	10.735	0.191	68.43	1.36
E2	0.2788	9.5194	48.60	7.5921	0.156	64.44	1.09
F1	1.1486	14.728	52.98	7.1388	0.135	67.08	0.94
F2	0.1908	9.0459	47.44	6.2908	0.133	63.03	0.94

5.3.17 Tek eksenli basınç deneyi sonuçları

Bu deney [35] standartlarına uyularak yapılmıştır. Deney, İTÜ Jeoloji Mühendisliği bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneydeki amaç, malzemenin dayanımı hakkında bilgi edinmek ve kaya kütlesi sınıflamasındaki yerini tespit etmek ve/veya tasarım amaçlı kullanımlarda tasarım hakkında fikir edinilmektir. Bu amaçla deney boyunca eksenel deformasyon ölçülmüş ve malzemedeki yenilme şekilleri ve dayanım hakkında bilgi edinilmiştir. Tezde kullanılan 3 grup örneğin 3. grubu tek eksenli sıkışma deneyine maruz bırakılmıştır. Deneyde 60-3000 kN yükleme kapasitesine sahip MTS marka hidrolik pres ve yükleme başlıkları kullanılmıştır (Şekil 5.30). Örnek çapı standart NX (54.7 mm) alınmıştır. Ayrıca örneğin boy ve çapları kumpas aracılığıyla ölçülmüş olup boy ve çap oranı 2.5-3 arasında bir değer alınmıştır. Örnekler sürekli ve sabit bir hızda eksenel olarak yüklenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 5.14 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30 : Mermer örneğinin tek eksenli sıkışma deneyi görüntüsü.

A grubu örnekleri diğer gruplara oranla tek eksenli basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni hiçbir şekilde ısıtılma işlem görmemesidir. Bu sebeple tek eksenli basınç dayanımı A grubundan D grubuna doğru düzenli bir şekilde azalma göstermiştir. E ve F örnekleri ise D grubundan daha yüksek dayanımlı olarak

bulunmuştur. Aslında beklenen sonuç ısıtıl işlemin sonucunda en çok ısıtıl işleme maruz kalan örneklerin dayanımının az olmasıydı kısmen de olsa bu gerçekleşmiştir. Fakat D örneğinin taneseli olarak diğer gruplara göre farklı olması da bu sonucun çıkmasında etkili bir nedendir. Tüm grupların ortalama tek eksenli basınç dayanımları 33.67 MPa, ortalama elastisite modülü 4.71 GPa ve deformasyon modülü ise 1.73 bulunmuştur.

Çizelge 5.14 : Isıl işlem sonrası tek eksenli basınç deneyi sonuçları.

Örnek Gruplar	Eksenel Yük (kN)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eksenel Birim Deformasyon (ϵ_f) ($\times 10^{-3}$)
A	117.25	53.15	10.55	1.4
B	77.03	34.92	4.35	1.6
C	68.23	30.93	3.46	1.8
D	47.82	21.68	2.32	1.9
E	63.43	28.75	3.49	1.7
F	71.83	32.56	4.09	2.0
Ortalama	74.27	33.67	4.71	1.73



Şekil 5.31 : Tek eksenli basınç deneyi sonrası örneklerin görünüşleri.

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞILMASI

6.1 Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Fiziksel Özelliklerdeki Değişimler

6.1.1 Kuru birim hacim ağırlık

3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası kuru birim hacim ağırlıkları şu şekilde bulunmuştur:

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.60, 26.60, 26.60, 26.60, 26.59, 26.60 kN/m³ bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.59, 26.60, 26.60, 26.59, 26.60 kN/m³ bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.60, 26.62, 26.60, 26.60, 26.60, 26.58 kN/m³ bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.61, 26.15, 26.17, 26.10, 26.06, 26.01 kN/m³ bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.66, 26.00, 26.05, 26.11, 26.09, 26.06 kN/m³ bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.62, 26.12, 26.03, 25.95, 26.04, 26.10 kN/m³ bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.60 kN/m³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.63 kN/m³ olmuştur. B grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.61 kN/m³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.09 kN/m³ olmuştur. C grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.60 kN/m³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.08 kN/m³ olmuştur. D grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.60 kN/m³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.06 kN/m³ olmuştur. E grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.59 kN/m³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.06 kN/m³ olmuştur. F grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi

26.59 kN/m³ iken ısıtım işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.06 kN/m³ olmuştur.

Ortalama kuru birim ağırlığın ısıtım işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla B > A = C = D > E = F grubu şeklindedir. Isıtım işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla A > B > C > D = E = F grubu şeklinde olmuştur. Bu tez kapsamında bu sonuçlar beklediğimiz şekilde gerçekleşmiş oldu. Burada ısıtım işlemin etkisi gözükmemektedir. Buradan çıkarılacak sonuç malzeme ne kadar ısıtım işleme tabi tutulursa o derece çatlakların gelişimi artmış bu sayede kuru birim hacim ağırlığı da azalmış olur. A grubunun ısıtım işlem sonrası kuru birim hacim ağırlığının diğer gruplara göre fark edilir şekilde yüksek olma nedeni A grubu örneklerin hiçbir şekilde ısıtım işleme tabi tutulmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca A grubu örneklerin kuru birim ağırlığının ısıtım işlem sonrası artma nedeni bekletildiği süre boyunca atmosferik nemin de etkisiyle bünyesine su alması ile açıklanmaktadır.

6.1.2 Doygun birim hacim ağırlık

3 grup örneklerin ısıtım işlem öncesi ve ısıtım işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlıkları şu şekilde bulunmuştur:

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem öncesi doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.61, 26.62, 26.62, 26.62, 26.60, 26.61 kN/m³ bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem öncesi doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.61, 26.61, 26.62, 26.60, 26.60, 26.62 kN/m³ bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem öncesi doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.61, 26.64, 26.62, 26.62, 26.62, 26.60 kN/m³ bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.63, 26.31, 26.32, 26.27, 26.24, 26.21 kN/m³ bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.68, 26.20, 26.23, 26.27, 26.26, 26.24 kN/m³ bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlıkları sırasıyla 26.63, 26.29, 26.20, 26.16, 26.22, 26.27 kN/m³ bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama doymuş birim hacim ağırlıkları ısıtım işlem öncesi 26.61 kN/m³ iken ısıtım işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.65 kN/m³ olmuştur. B grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtım işlem öncesi 26.62 kN/m³ iken ısıtım işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.27

kN/m^3 olmuştur. C grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.62 kN/m^3 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.25 kN/m^3 olmuştur. D grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.61 kN/m^3 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.24 kN/m^3 olmuştur. E grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.61 kN/m^3 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.24 kN/m^3 olmuştur. F grubu örneklerin ortalama kuru birim hacim ağırlıkları ısıtıl işlem öncesi 26.61 kN/m^3 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kuru birim hacim ağırlığı 26.24 kN/m^3 olmuştur.

Ortalama doymuş birim ağırlığın ısıtıl işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $B = C > A = D = E = F$ grubu şeklindedir. ısıtıl işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $A > B > C > D = E = F$ grubu şeklinde olmuştur. Bu tez kapsamında bu sonuçlar beklediğimiz şekilde gerçekleşmiş oldu. Burada ısıtıl işlemin etkisi gözükmemektedir. Ayrıca ters orantı bulunmaktadır. Buradan çıkarılacak sonuç malzeme ne kadar ısıtıl işleme tabi tutulursa o derece çatlakların gelişimi artmış bu sayede doymuş birim hacim ağırlığı da azalmış olur. Yani bir malzemede ısıtıl işlem süreci artarsa, birim hacim ağırlık azalır. A grubunun ısıtıl işlem sonrası doymuş birim hacim ağırlığının diğer gruplara göre fark edilir şekilde yüksek olma nedeni A grubu örneklerin hiçbir şekilde ısıtıl işleme tabi tutulmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca A grubu örneklerin kuru birim ağırlığının ısıtıl işlem sonrası artma nedeni bekletildiği süre boyunca atmosferik nemin de etkisiyle bünyesine su alması ile açıklanmaktadır. Şekil 6.1 'de örneklerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki grafikte gösterilmiştir.

6.1.3 Örneklerin hacmindeki değişim

3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası hacimleri şu şekilde bulunmuştur:

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi hacimleri sırasıyla 270.03, 269.14, 264.14, 269.45, 271.59, 269.63 cm^3 bulunmuştur.
2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem deney öncesi hacimleri 270.73, 263.99, 268.47, 267.41, 273.65, 265.28 cm^3 bulunmuştur.

3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi hacimleri 267.73, 272.98, 272.79, 264.83, 269.95, 272.50 cm³ bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası hacimleri sırasıyla 269.81, 273.59, 268.40, 274.41, 276.94, 275.34 cm³ bulunmuştur.

2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası hacimleri 269.99, 269.59, 273.70, 272.08, 278.74, 270.46 cm³ bulunmuştur.

3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası hacimleri sırasıyla 267.53, 277.97, 278.47, 270.54, 275.42, 277.33 cm³ bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 269.50 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 269.11 cm³ olmuştur.

B grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 268.70 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 273.72 cm³ olmuştur.

C grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 268.47 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 273.52 cm³ olmuştur.

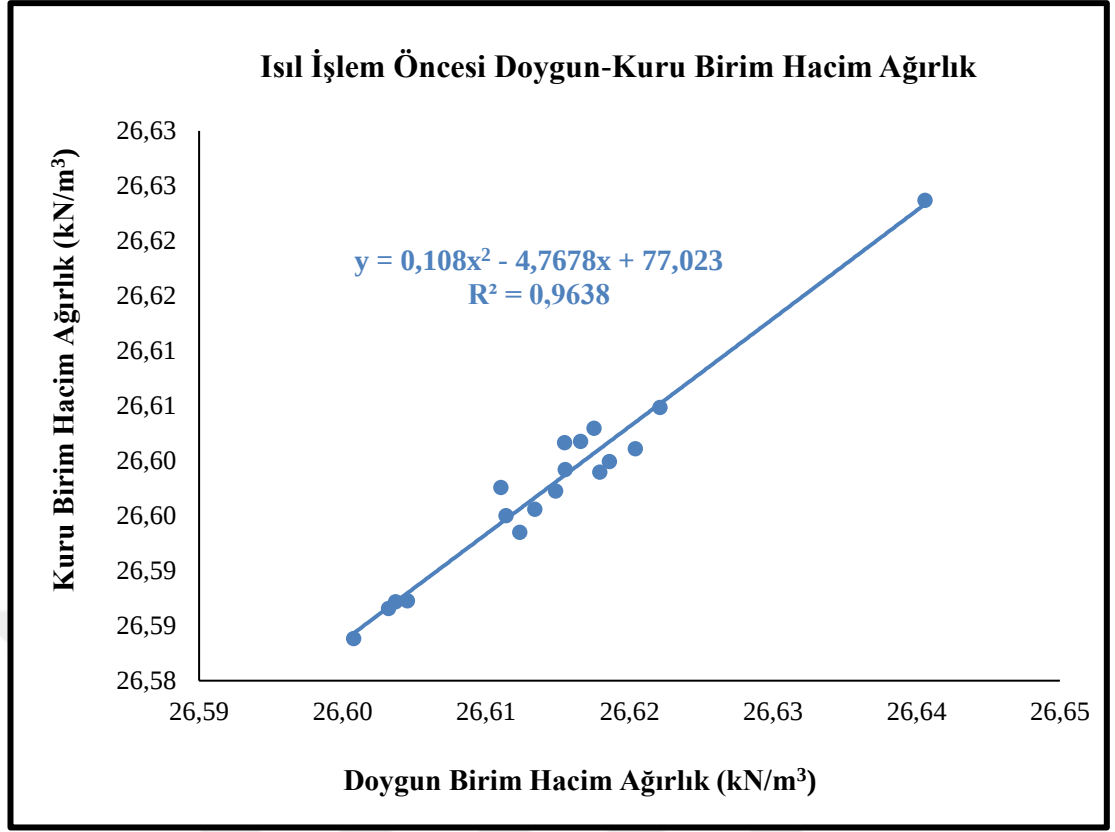
D grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 267.23 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 272.34 cm³ olmuştur.

E grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 271.73 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 277.03 cm³ olmuştur.

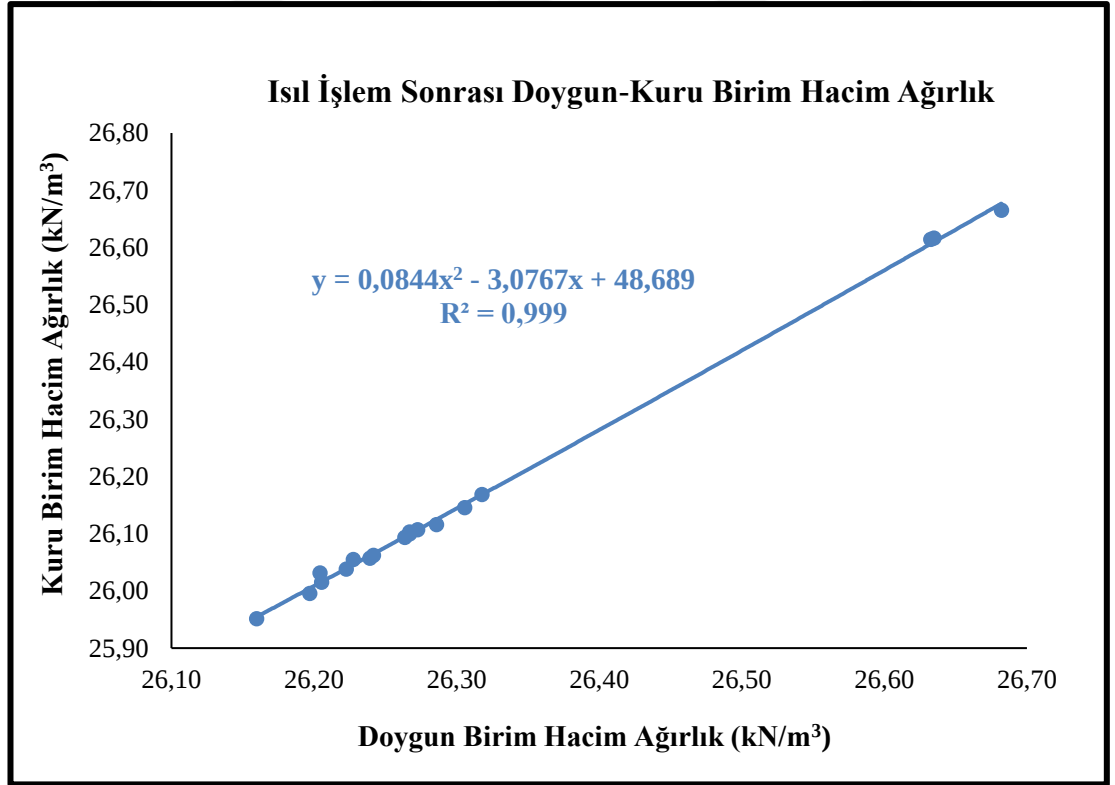
F grubu örneklerin ortalama hacimleri ısıtıl işlem öncesi 269.14 cm³ iken ısıtıl işlem sonrası ortalama hacimleri 274.38 cm³ olmuştur.

Ortalama hacmin ısıtıl işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla E > A > F > B > C > D grubu şeklindedir. ısıtıl işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla E > F > B > C > D > A grubu şeklinde olmuştur.

Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtıl işleme tabi tutulması sonucu mikro çatlakların gelişiminin meydana gelmesi ve bu çatlaklardan su girdisinin olması sebebiyle malzeme ne ölçüde ısıtıl işleme tabi tutulursa o derece bünyesine su almaktadır. Burada doğru orantı vardır. ısıtıl işlem süresi arttıkça, hacim de artış gösterir. Ayrıca A grubu örneklerin hacminin ısıtıl işlem sonrasında azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni örneğin ısıtıl işlem görmemesi ve bekletildiği süre boyunca bünyesine aldığı suyun kısmen buharlaşması ile açıklanmaktadır.



Şekil 6.1 : Isıl işlem öncesi örneklerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



Şekil 6.2 : Isıl işlem sonrası örneklerin kuru ve doymuş birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.

6.1.4 Yoğunluk

3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası yoğunlukları şu şekilde bulunmuştur:

3 grup örneğin de ısıtıl işlem öncesi kuru ve doymuş yoğunlukları 2.71 g/cm^3 bulunmuştur. Literatürde de mermer örneğinin yoğunluğu 2.71 g/cm^3 olarak geçmektedir.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru yoğunlukları sırasıyla $2.71, 2.67, 2.67, 2.66, 2.66, 2.65 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru yoğunlukları sırasıyla $2.72, 2.67, 2.66, 2.66, 2.66, 2.66 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kuru yoğunlukları sırasıyla $2.71, 2.67, 2.67, 2.65, 2.65, 2.66 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Isıtıl işlem öncesi kuru ve doymuş yoğunluklar her örnek ve her grup için 2.71 g/cm^3 olarak bulunmuştur.

Isıtıl işlem sonrası A grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.72 g/cm^3 , B grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.68 g/cm^3 , C grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.68 g/cm^3 , D grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.67 g/cm^3 , E grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.67 g/cm^3 , F grubu örneklerin ortalama kuru yoğunluğu 2.67 g/cm^3 bulunmuştur.

Ortalama hacmin ısıtıl işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $A = B = C = D = E = F$ grubu şeklindedir. Isıtıl işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $A > B > C > D = E = F$ grubu şeklinde olmuştur. Bu tez kapsamında bu sonuçlar beklediğimiz şekilde gerçekleşmiş oldu. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtıl işlem sonucu mikro çatlakların gelişiminin meydana gelmesi ve bu çatlaklardan su girdisinin olması sebebiyle malzeme ne ölçüde ısıtıl işleme tabi tutulmuşsa o derece bünyesine su almaktadır. Isıtıl işlem süresi ve porozite arttıkça, yoğunluk azalmaktadır.

6.1.5 Görünür porozite, boşluk oranı ve doluluk oranı

3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası görünür gözeneklilik (porozite), boşluk oranı ve doluluk oranları şu şekilde bulunmuştur:

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi poroziteleri yüzde olarak değerleri sırasıyla $0.18, 0.19, 0.20, 0.15, 0.17, 0.14$ olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi poroziteleri yüzde olarak $0.19, 0.17, 0.19,$

0.18, 0.17, 0.15 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi poroziteleri yüzde olarak 0.18, 0.17, 0.18, 0.17, 0.14, 0.17 olarak bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası poroziteleri yüzde olarak değerleri sırasıyla 0.19, 0.61, 0.57, 0.64, 0.69, 0.73 olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası poroziteleri yüzde olarak 0.17, 0.77, 0.66, 0.63, 0.65, 0.70 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası poroziteleri yüzde olarak sırasıyla 0.19, 0.65, 0.66, 0.80, 0.71, 0.63 olarak bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.18 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama poroziteleri de aynı değere sahip olarak bulunmuştur. B grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi 0.18 iken ısıtıl işlem sonrası 0.68 olarak bulunmuştur. C grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.19 iken ısıtıl işlem sonrası 0.63 olarak bulunmuştur. D grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.16 iken ısıtıl işlem sonrası 0.69 olarak bulunmuştur. E grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.16 iken ısıtıl işlem sonrası 0.68 olarak bulunmuştur. F grubu örneklerin ortalama poroziteleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.15 iken ısıtıl işlem sonrası 0.69 olarak bulunmuştur.

Ortalama porozite değerlerinin ısıtıl işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $C > A = B > D = E > F$ grubu şeklindedir. ısıtıl işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $D = F > B = E > C > A$ grubu şeklinde olmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtıl işlem süresinin etkisi olduğu kadar tanelerin boyutları (iri veya ince taneli) da önem arz etmektedir. Beklediğimiz sonuç ısıtıl işleminden en çok etkilenen ve ısıtıl işlem süresi daha fazla olan örneklerin çatlak gelişimi de yüksek olacağından porozitesinin yüksek olması beklenirdi fakat burada tane boylarının da önemi ortaya çıkmaktadır. B ve D grubu örnekleri diğer örneklerle nazaran taneler olarak daha iri taneli yapıya sahip olduğu için porozitesi de artmış bulundu.

Boşluk oranları ise 1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi değerleri sırasıyla 0.22, 0.23, 0.25, 0.18, 0.20, 0.16 olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi boşluk oranları 0.23, 0.20, 0.23, 0.22, 0.20, 0.18 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi boşluk oranları 0.22, 0.20, 0.22, 0.20, 0.16, 0.20 olarak bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası boşluk oranları sırasıyla 0.23, 1.56, 1.32, 1.78, 2.22, 2.70 olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası boşluk oranı 0.20, 3.35, 1.94, 1.70, 1.86, 2.33 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtım işlem sonrası boşluk oranları 0.23, 1.86, 1.94, 4.00, 2.45, 1.70 olarak bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.22 iken ısıtım işlem sonrası ortalama boşluk oranı aynı değere sahip olarak bulunmuştur. B grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.21 iken ısıtım işlem sonrası 2.26 olarak bulunmuştur. C grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.23 iken ısıtım işlem sonrası 1.73 olarak bulunmuştur. D grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.20 iken ısıtım işlem sonrası 2.49 olarak bulunmuştur. E grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.19 iken ısıtım işlem sonrası 2.18 olarak bulunmuştur. F grubu örneklerin ortalama boşluk oranı ısıtım işlem öncesi 0.18 iken ısıtım işlem sonrası 2.24 olarak bulunmuştur.

Ortalama boşluk oranları ısıtım işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $C > A > B > D > E > F$ grubu şeklindedir. Isıtım işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $D > B > F > E > C > A$ grubu şeklinde olmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtım işlem süresinin etkisi olduğu kadar tanelerin boyutları (iri veya ince taneli) da önem arz etmektedir. Beklediğimiz sonuç ısıtım işleminden en çok etkilenen ve ısıtım işlem süresi daha fazla olan örneklerin çatlak gelişimi de yüksek olacağından boşluk oranlarının da yüksek olması beklenirdi fakat burada tane boylarının da önemi ortaya çıkmaktadır. B ve D grubu örnekleri diğer örneklerle nazaran taneler olarak daha iri taneli yapıya sahip olduğu için porozitesi de artmış bulundu. Ayrıca örneklerin alındığı lokasyondan, karot alımına, su emme ve ısıtım işleme kadar ki süreçlerde örneklerdeki değişimler de bu sonuçların ortaya çıkmasında önemli role sahiptir.

Doluluk oranı ise boşluk oranı ile ters orantılıdır. Doluluk oranını yüzde olarak ifade edersek boşluk oranından çıkarılması ile malzemedeki doluluk oranı bulunmuş olur. Isıtım işlem öncesi ortalama doluluk oranı A, B, C, D, E ve F grupları için yüzde olarak sırasıyla 99.78, 99.79, 99.77, 99.80, 99.81 ve 99.82 olarak bulunmuştur. Isıtım işlem sonrası ortalama doluluk oranı A, B, C, D, E ve F grupları için yüzde olarak sırasıyla 99.78, 97.74, 98.27, 97.51, 97.82 ve 97.76 olarak bulunmuştur.

Buna göre ortalama doluluk oranları ısıtıl işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $F > E > D > B > A > C$ grubu şeklindedir. Isıtıl işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $A > C > E > F > B > D$ grubu şeklinde olmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtıl işlem süresinin etkisi olduğu kadar tanelerin boyutları (iri veya ince taneli) da önem arz etmektedir. B ve D grubu örnekleri diğer örneklerle nazaran taneler olarak daha iri taneli yapıya sahip olduğu için porozitesi ve boşluk oranı artmış fakat doluluk oranı azalmış olarak bulundu.

6.1.6 Kapiler su emme

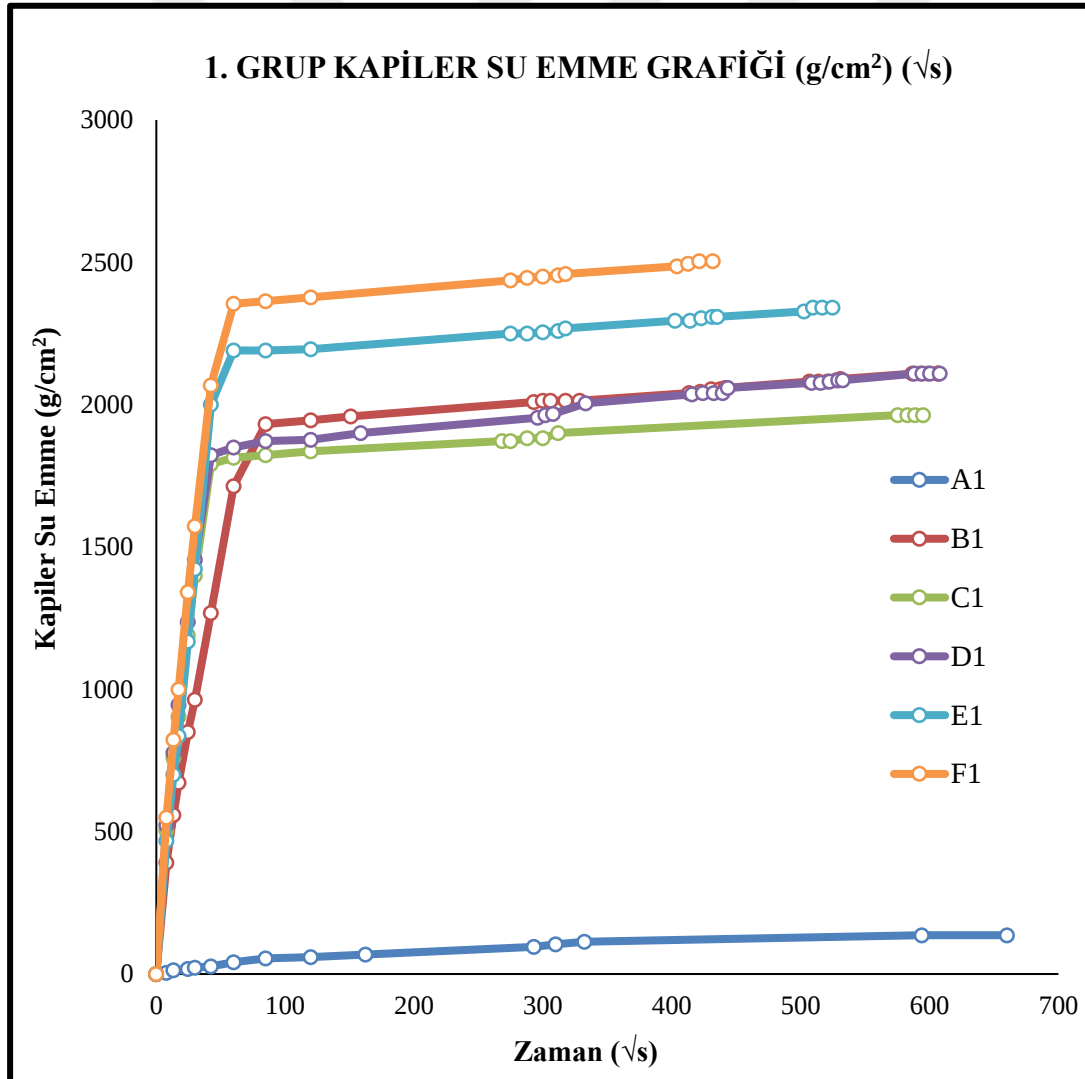
3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri şu şekilde bulunmuştur:

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi kapiler su emme değerleri yüzde olarak sırasıyla 0.07, 0.07, 0.07, 0.05, 0.06, 0.05 olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri yüzde olarak 0.07, 0.06, 0.07, 0.06, 0.06, 0.06 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri yüzde olarak sırasıyla 0.07, 0.06, 0.06, 0.06, 0.05, 0.06 olarak bulunmuştur.

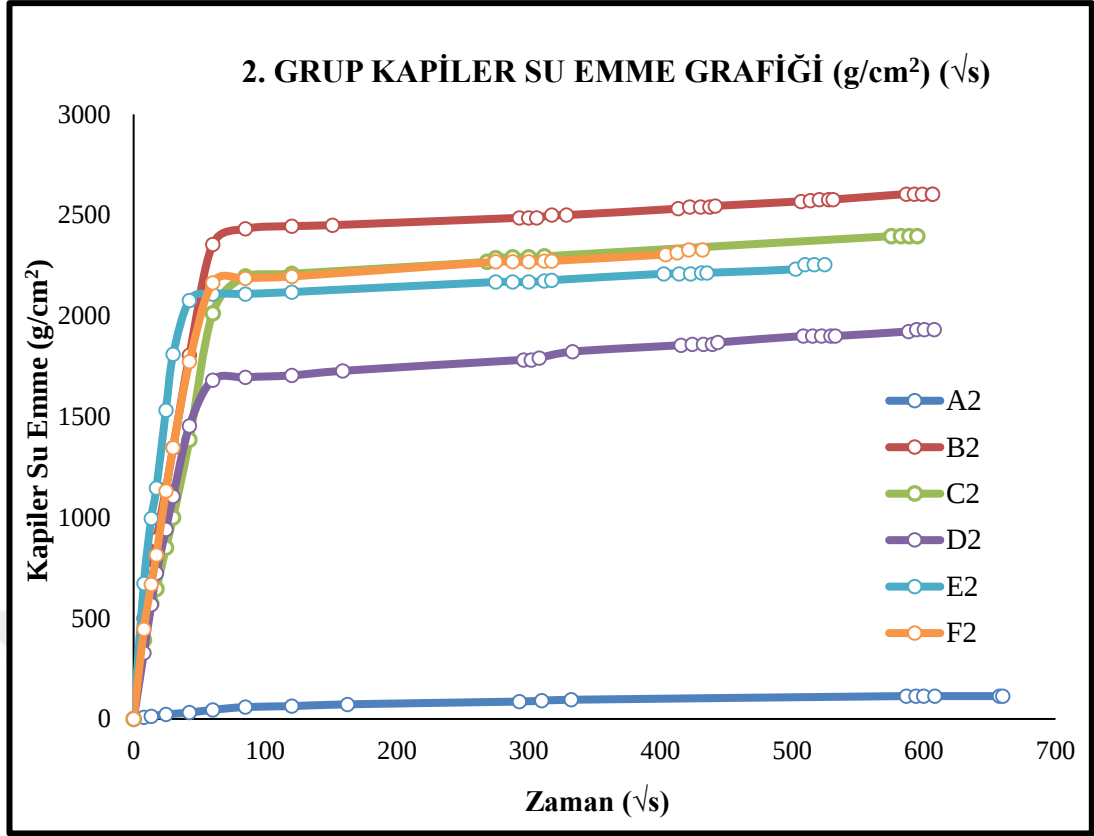
1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri yüzde olarak sırasıyla 0.07, 0.61, 0.57, 0.64, 0.68, 0.73 olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri yüzde olarak 0.06, 0.77, 0.66, 0.63, 0.65, 0.69 olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası kapiler su emme değerleri yüzde olarak sırasıyla 0.07, 0.65, 0.66, 0.80, 0.70, 0.62 olarak bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi yüzde olarak 0.07 iken ısıtıl işlem sonrası ortalama kapiler su emme değerleri de aynı değere sahip olarak bulunmuştur. B grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi 0.07 iken ısıtıl işlem sonrası 0.67 olarak bulunmuştur. C grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi 0.07 iken ısıtıl işlem sonrası 0.63 olarak bulunmuştur. D grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi 0.06 iken ısıtıl işlem sonrası 0.69 olarak bulunmuştur. E grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi 0.06 iken ısıtıl işlem sonrası 0.68 olarak bulunmuştur. F grubu örneklerin ortalama kapiler su emme değerleri ısıtıl işlem öncesi 0.06 iken ısıtıl işlem sonrası 0.68 olarak bulunmuştur.

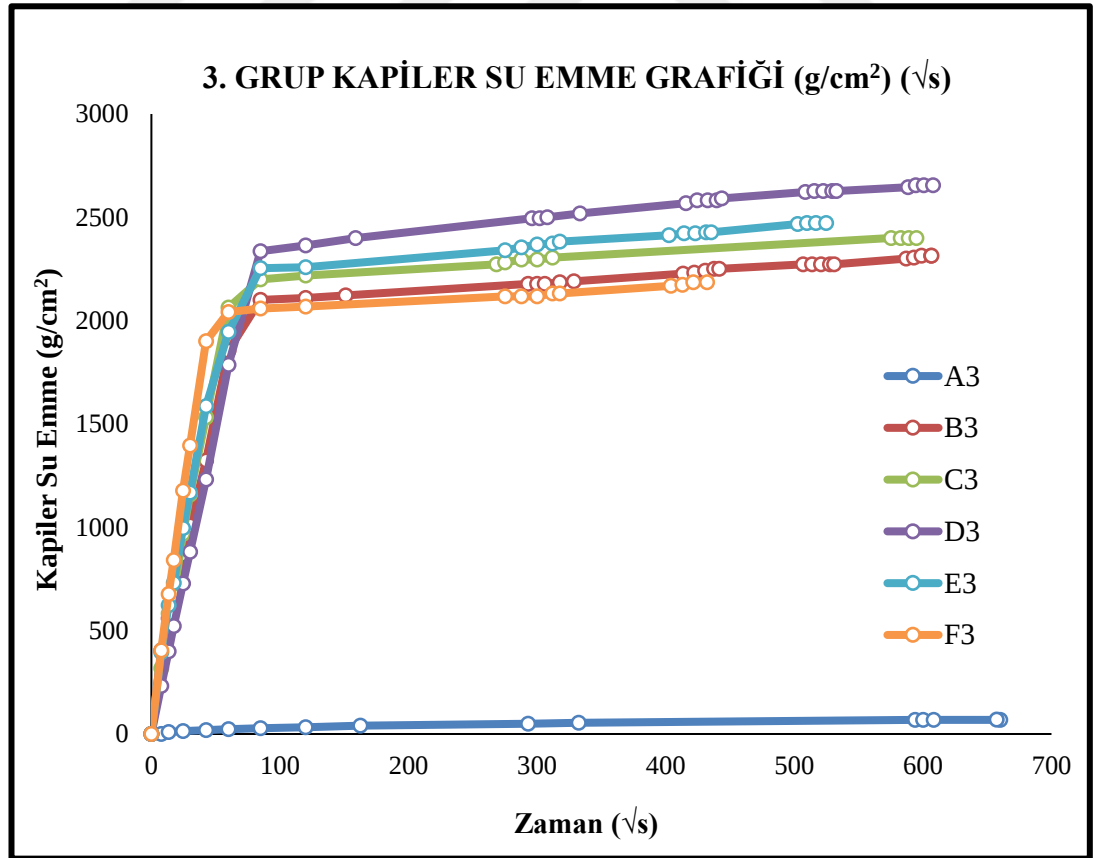
Ortalama kapiler su emme değerlerinin ısıtma işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $A = B = C > D = E = F$ grubu şeklindedir. Isıtma işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $D > F = E > B > C > A$ grubu şeklinde olmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıtma işlem süresinin etkisi olduğu kadar tanelerin boyutları (iri veya ince taneli) da önem arz etmektedir. B ve D grubu örnekleri diğer örneklerle nazaran taneleşik olarak daha iri taneli yapıya sahip olduğu için porozitesi yüksek, kapiler su emme değeri de yüksek bulunmuş oldu. Çünkü porozite ile kapiler su emme arasında doğru orantı vardır. Çatlaklı kısımlara su girdisi olur ve en çok hangi malzemede çatlak ve boşluk varsa o malzemenin kapiler su emmesi daha yüksek olur. A grubu örnekler ısıtma işlem sonrası artışı sabit kalırken, B grubu örnekler ısıtma işlem sonrası yüzdesel olarak 0.60, C grubu örnekler 0.56, D grubu örnekler 0.63, E grubu örnekler 0.62 ve F grubu örnekler 0.62 oranında artmış göstermiş oldu.



Şekil 6.3 : 1. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.



Şekil 6.4 : 2. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.



Şekil 6.5 : 3. grup ortalama kapiler su emme deneyi sonuçları.

[42]'ün Muğla Kavaklıdere mermer örnekleri için yapmış olduğu kapiler su emme deneyi sonucunda ısıtıl işleme bağılı olarak ısıtıl işlem sayısı çok olan grupların daha çok su emdiği bulunmuştur. Bu tezde yapılan kapiler su emme deney sonucunda ise ısıtıl işleme daha fazla maruz bırakılan örneklerin su emmelerinin yüksek olduğu, ayrıca malzemenin tanesel boyutunun (iri ya da ince taneli) da su emme ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre iri taneli malzemelerin ince taneli malzemelere oranla daha çok emdiği çıkarımında bulunulmuştur. Bunu da ısıtıl işleme uyguladığımız zaman iri taneli ve ısıtıl işlem süresi en çok olan malzemeler en çok su emen, ince taneli ve ısıtıl işlem süresi az olan malzemelerin ise daha az su emdiği bu tez kapsamında çıkarılabilecek sonuçlardan birisidir.

6.1.7 Sonik hız

3 grup örneklerin ısıtıl işlem öncesi ve ısıtıl işlem sonrası sonik hız değerleri şu şekilde bulunmuştur. Burada orijinal örnekler kullanılmış olup, kuru halleri dikkate alınmıştır.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi P sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4409, 4296, 5021, 5571, 4114, 4516 m/s olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi P sonik dalga hız değerleri sırasıyla 5221, 5357, 4498, 4296, 5188, 4724 m/s olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi P sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4216, 4526, 4526, 4697, 4409, 4147 m/s olarak bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası P sonik hız dalga değerleri sırasıyla 4438, 1420, 1628, 1977, 943, 1272 m/s olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası P sonik dalga hız değerleri sırasıyla 5242, 2226, 1417, 1255, 1523, 1320 m/s olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası P sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4289, 1487, 1505, 2168, 1358, 1269 m/s olarak bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi S sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4114, 4013, 4819, 5328, 3981, 4360 m/s olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi S sonik dalga hız değerleri sırasıyla 5146, 5197, 4261, 4080, 4980, 4380 m/s olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem öncesi S sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4020, 4291, 4291, 4526, 4184, 3887 m/s olarak bulunmuştur.

1. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası S sonik hız dalga değerleri sırasıyla 4157, 1115, 1581, 1697, 867, 1005 m/s olarak bulunmuştur. 2. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası S sonik dalga hız değerleri sırasıyla 5170, 2186, 1346, 1035, 1420, 1144 m/s olarak bulunmuştur. 3. grup A, B, C, D, E ve F örneklerin ısıtıl işlem sonrası S sonik dalga hız değerleri sırasıyla 4065, 1273, 1217, 1840, 1048, 958 m/s olarak bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4615.33 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 4656.33 m/s olarak bulunmuştur.

B grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4726.33 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1711 m/s olarak bulunmuştur.

C grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4681.67 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1516.67 m/s olarak bulunmuştur.

D grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4854.67 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1800 m/s olarak bulunmuştur.

E grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4570.33 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1274.67 m/s olarak bulunmuştur.

F grubu örneklerin ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4462.33 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1287 m/s olarak bulunmuştur.

Buna göre A grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4426.67 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 4464 m/s olarak bulunmuştur.

B grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4500.33 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1524.67 m/s olarak bulunmuştur.

C grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4457 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1381.33 m/s olarak bulunmuştur.

D grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4644.67 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1524 m/s olarak bulunmuştur.

E grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4381.67 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1111.67 m/s olarak bulunmuştur.

F grubu örneklerin ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıtıl işlem öncesi 4209 m/s iken ısıtıl işlem sonrası 1035.67 m/s olarak bulunmuştur.

[37] sınıflamasına göre A grubu örnekler ısıt işlem öncesi P sonik dalga hızı için yüksek hız, B grubu örnekler yüksek hız, C grubu örnekler yüksek hız, D grubu örnekler yüksek hız, E grubu örnekler yüksek hız, F grubu örnekler yüksek hız olarak bulunmuştur. A grubu örneklerin ısıt işlem öncesi S sonik dalga hızı için yüksek hız, B grubu örnekler yüksek hız, C grubu örnekler yüksek hız, D grubu örnekler yüksek hız, E grubu örnekler yüksek hız, F grubu örnekler yüksek hız olarak bulunmuştur.

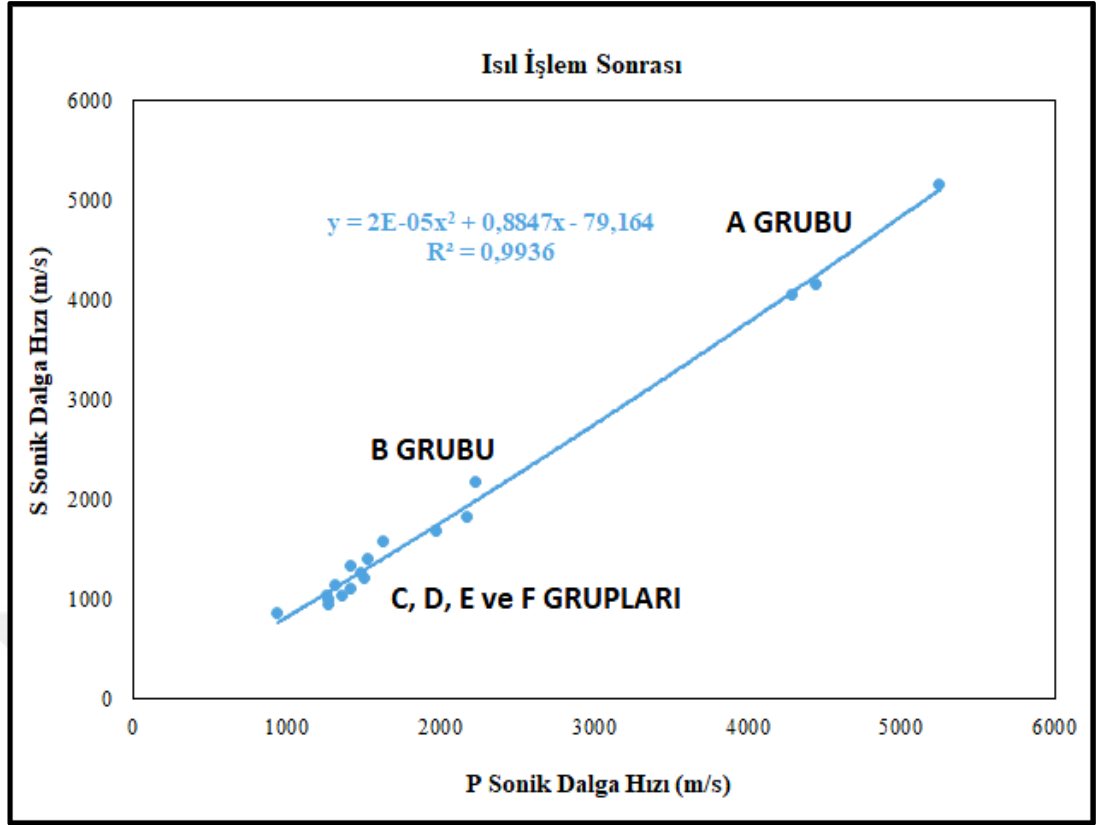
Isıt işlem sonrası A grubu örnekler P sonik dalga hızı yüksek hız, B grubu örnekler çok düşük hız, C grubu örnekler çok düşük hız, D grubu örnekler çok düşük hız, E grubu örnekler çok düşük hız, F grubu örnekler çok düşük hız olarak bulunmuştur. S sonik dalga hızı için A grubu örnekler yüksek hız, B grubu örnekler çok düşük hız, C grubu örnekler çok düşük hız, D grubu örnekler çok düşük hız, E grubu örnekler çok düşük hız, F grubu örnekler çok düşük hız olarak bulunmuştur.

Ortalama P sonik dalga hız değerleri ısıt işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $D > B > C > A > E > F$ grubu şeklindedir. Isıt işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $A > D > B > C > F > E$ grubu şeklinde olmuştur. Ortalama S sonik dalga hız değerleri ısıt işlem öncesi en yüksek olduğu durum sırasıyla $D > B > C > A > E > F$ grubu şeklindedir. Isıt işlem sonrası en yüksek olduğu durumda ise sırasıyla $A > B > D > C > E > F$ grubu şeklinde olmuştur.

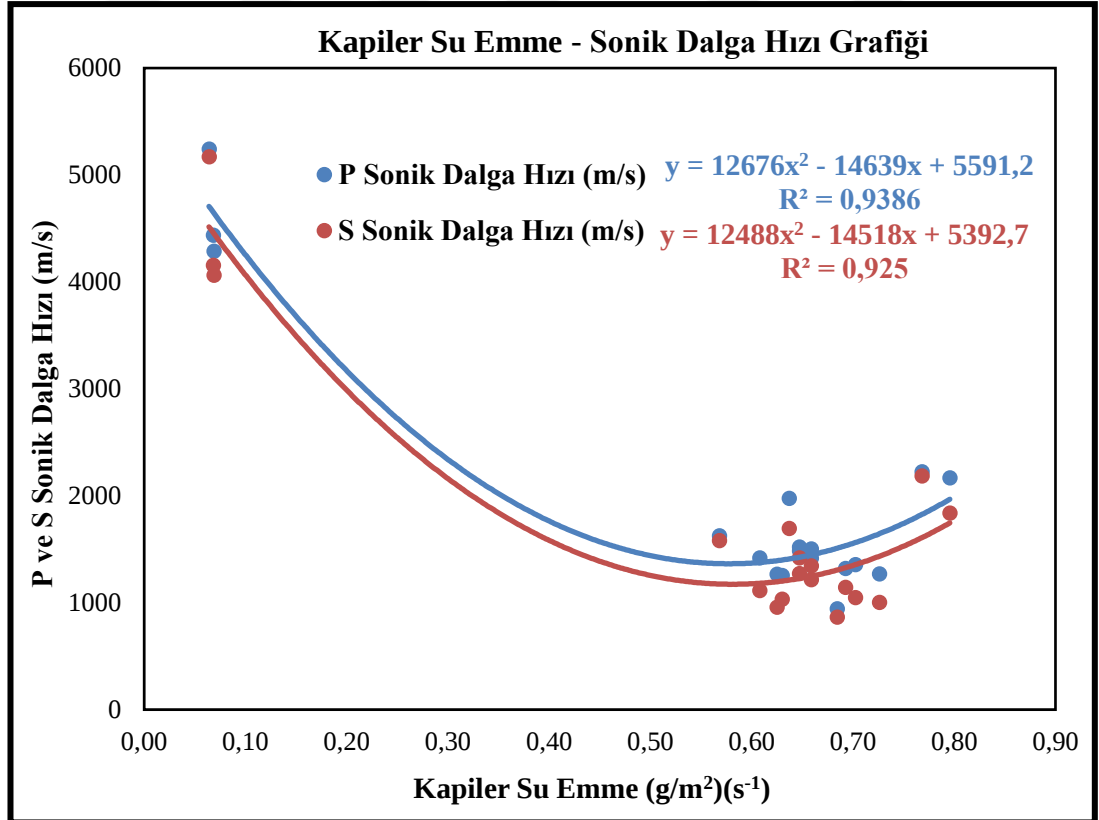
Buradan çıkarılacak sonuç malzemenin ısıt işlem süresi ne ölçüde fazla olursa sonik hıza etkisi de o denli yüksek olmuş olur. Ayrıca ısıt işlemin etkisi olduğu kadar malzemenin tanesal boyutları (iri veya ince taneli) da önem arz etmektedir.

İri taneye sahip mermer örnekleri, ince taneli örneklerle göre daha fazla kalsit minerali içermesi, ısıt etki ile kalsit mineralinin bozunması, mikro çatlaklı yapının gelişmesi ve buna bağlı su emmesi artması sonucu malzeme dayanımı azalması ile neticelenmiştir. Sonik hız değerleri de bu etkilere göre farklılık göstermektedir. Bilakis burada daha çok üzerinde durulması gereken konu ısıt işlem ve bu ısıt işlemin süresidir. Her ne kadar tanesal boyutlar etkili olsa da en çok etki ısıt işlem ile olmuştur.

Isıt işleme en çok maruz kalan örnekler E ve F olduğu için her iki dalga hızında da düşük değerli çıkmıştır. A örneği ise hiçbir şekilde ısıt işleme maruz bırakılmadığı için en yüksek değerli olarak bulunmuştur.



Şekil 6.6 : Isıl işlem sonrası P-S sonik dalga hızlarının örnek gruplarıyla ilişkisinin grafiksel ifadesi.



Şekil 6.7 : Isıl işlem sonrası kapiler su emme ile sonik dalga hızların karşılaştırılması.

Çizelge 6.1 : Kuru koşullarda görünür porozite, tane boyutu ve P sonik dalga hızlarının [43] ile karşılaştırılması.

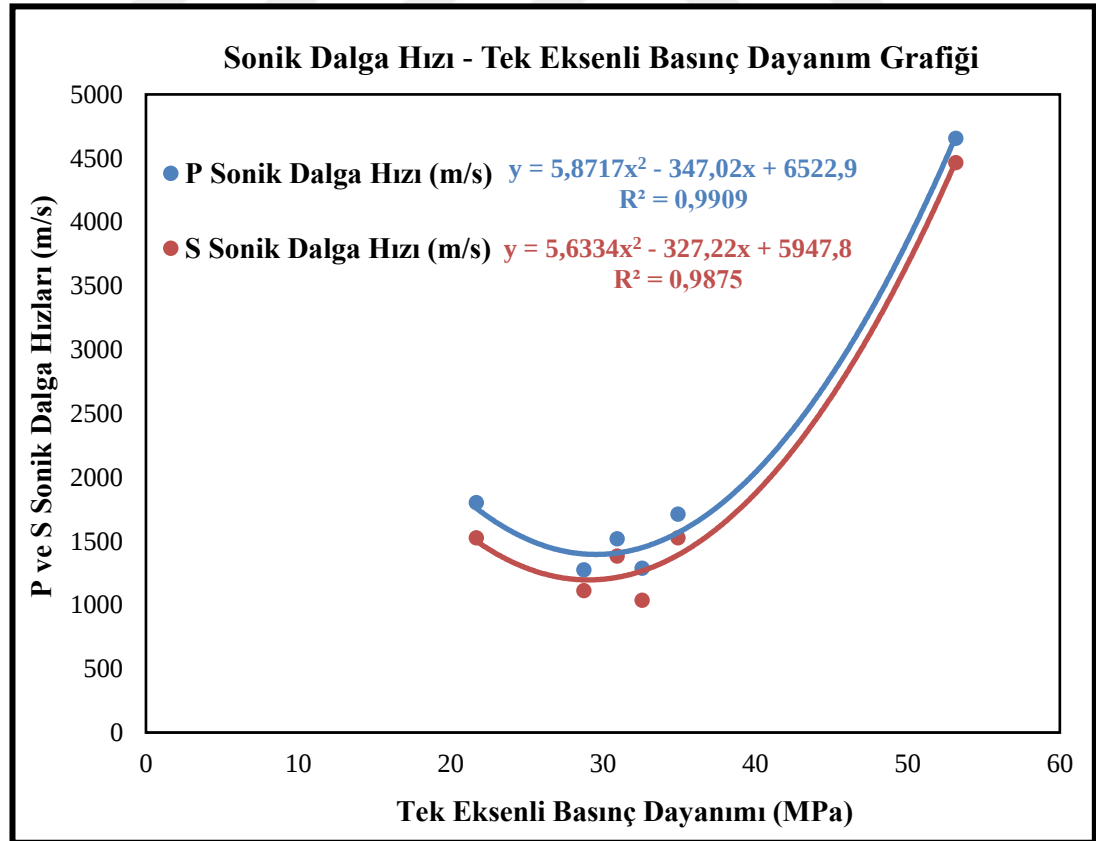
Örnekler	Örnek Durumu	n_a (%)	Yaklaşık Tane Boyu (μm)	$V_{p\text{max}}$ (km/s)	$V_{p\text{min}}$ (km/s)	A (%)
Lasa I	Orijinal	0.43	400	5.10	4.42	13.30
Lasa II	Orijinal	0.37	400	5.39	4.48	16.94
Lasa III	Orijinal	0.38	400	5.39	4.61	14.62
Carrara I	Orijinal	0.20	95	6.42	6.16	4.13
Carrara II	Orijinal	0.14	130	6.53	6.41	6.26
Carrara III	Orijinal	0.44	150	3.45	2.67	22.50
Carrara IV	Bozunmuş	0.94	140	1.54	1.43	7.39
Prieborn	Bozunmuş	0.77	150	3.03	2.11	30.12
Kauffung I	Orijinal	0.23	80	6.58	5.43	17.78
Kauffung II	Bozunmuş	0.32	80	6.34	5.04	20.44
Kauffung III	Bozunmuş	0.26	80	6.97	5.99	14.11
Kauffung IV	Bozunmuş	0.27	80	6.72	5.84	13.05
Grosskunuzendorf I	Orijinal	0.31	1500	5.05	4.37	13.59
Grosskunuzendorf II	Bozunmuş	0.46	1500	4.59	3.63	20.81
Muğla Beyaz A	Orijinal	0.18	500-2000	4.94	3.98	24.12
Muğla Beyaz B	1 döngü	0.68	500-2000	2.23	1.42	57.04
Muğla Beyaz C	2 döngü	0.63	500-2000	1.63	1.42	14.79
Muğla Beyaz D	3 döngü	0.69	500-2000	2.17	1.23	76.42
Muğla Beyaz E	4 döngü	0.68	500-2000	1.51	0.94	60.64
Muğla Beyaz F	5 döngü	0.69	500-2000	1.32	1.27	3.94

*Isıl işlem sonrası elde edilen veriler Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. ($A = (V_{p\text{max}} - V_{p\text{min}}) / V_{p\text{max}} \times 100$)

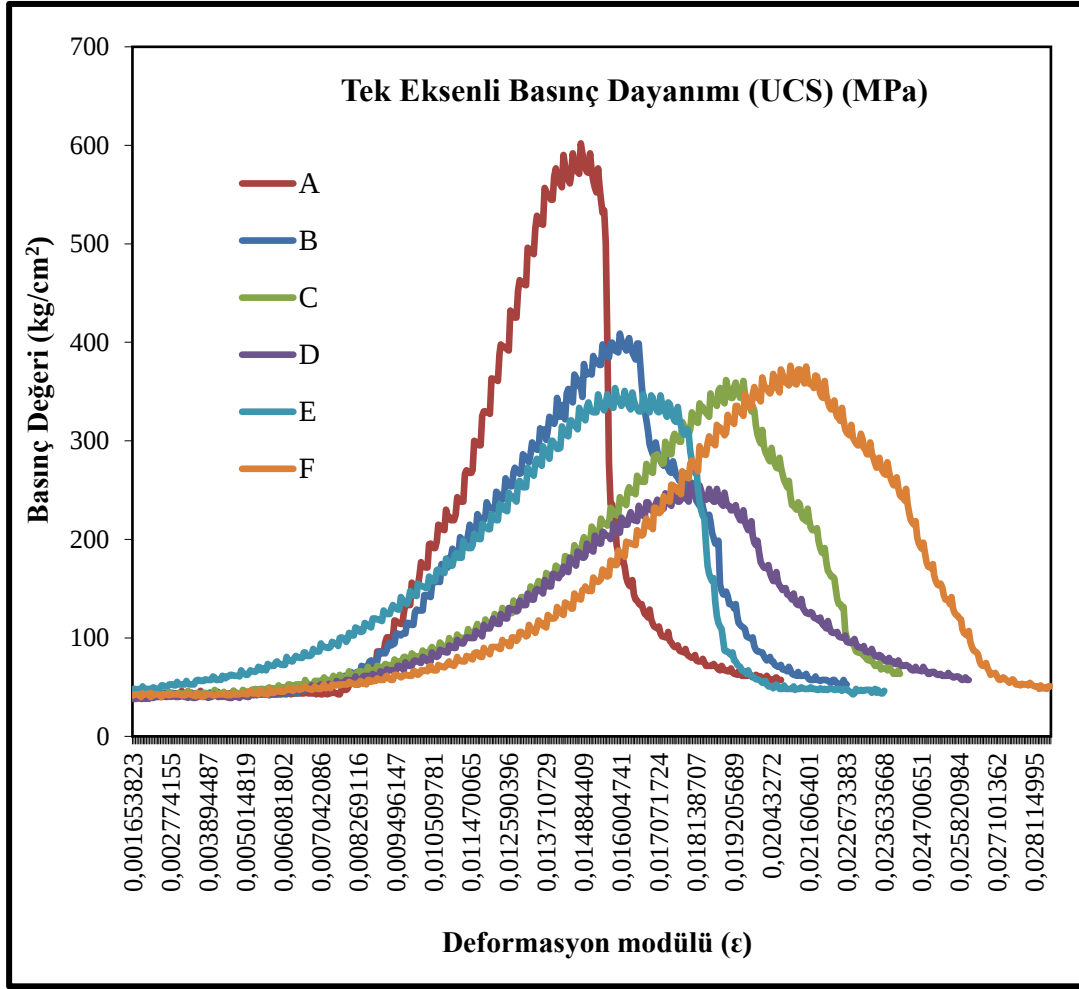
6.1.8 Isıl işlem sonrası tek eksenli basınç dayanımı

3 grup örneklerin 3. grupları tek eksenli deneylere maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda malzemenin tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü ve deformasyon modülleri bulunmuştur. Bulunan değerler porozite, kapiler su emme, sonik dalga hızı gibi fiziksel deneylerle karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca ısıtma işlem sonrası örneklerin yenilme zarfları çizilmiş, bunların ne ifade ettiği açıklanmıştır.

Buna göre A grubu örneği ısıtma işlemine tabi tutulmadığı için diğer örnek gruplarına göre daha yüksek dayanımına sahip çıkmıştır. A grubu örneklerinden D grubu örneklerine doğru dayanımda düzenli bir azalış meydana gelirken, E ve F grup örneklerinde kısmi bir artış gözlenmiştir. Fiziksel deneyler sonucunda da örneğin porozite A grubu örneklerden D grubu örneklerine doğru düzenli bir artışın görüldüğü E ve F örneklerinde ise bu değerlerin azaldığını tespit etmiştik. Burada malzemenin tam homojen yapıya sahip olmadığı bazı örneklerde sapmaların meydana geldiğini söyleyebiliriz. Ayrıca sadece ısıtma işlem için değil, aynı zamanda tanelerin boyutlarının da dayanıma etki ettiği gözlenmiştir.



Şekil 6.8 : Isıl işlem sonrası P ve S sonik dalga hızları ile tek eksenli basınç dayanımının karşılaştırılması.



Şekil 6.9 : Örnek gruplarına göre tek eksenli basınç deney verileri.

Sonik dalga hızı (P-S) ile tek eksenli basınç dayanım korelasyonu sonucu regresyon değerleri $R^2 > 0.98$ üzerinde çıkmıştır. Ayrıca elastisite modülü ile kapiler su emme arasındaki regresyon değeri de $R^2 > 0.99$ bulunmuştur. Tek eksenli deney sonuçlarına göre A grubu örneği diğer örneklerden yüksek dayanımlı olarak bulunmuştur. Isıl işleme tabi tutulan örnekler arasından en az ısı işlem gören B örneği diğer örneklerle kıyasla dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Isıl işleminden etkilenme süresine göre de dayanım azalma göstermiştir. [44] 'ın Muğla mermeri ile benzer özellik gösteren Carrara mermeri üzerinde yaptığı tek eksenli deney sonucu ile bu tez kapsamında kullanılan Muğla-Kavaklıdere mermer örnekleri birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Bazı değerlerde anomalilerin olduğu görülmektedir. Bunlar gerekli teknolojik alt yapının yetersizliği, deney malzemesinin tane boyutunun farklı olması gibi nedenlerle olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 6.2 'de Muğla-Kavaklıdere örneklerinin Carrara mermeri ve Buchberger kumtaşı ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 6.2 : Örnek gruplarının tek eksenli sıkışma deneyi veri sonuçları (Carrara mermeri ve Buchberger kumtaşı ile karşılaştırma) [44].

Örnek Grubu	Carrara Mermeri			Buchberger Kumtaşı			Muğla-Kavaklıdere Mermeri		
	σ_c (MPa)	E (GPa)	ε_{1f} (10^{-3})	σ_c (MPa)	E (GPa)	ε_{1f} (10^{-3})	σ_c (MPa)	E (GPa)	ε_{1f} (10^{-3})
A3	105.0	22.2	6.5	-	-	-	53.15	10.55	1.4
A3	97.2	25.8	7.0	-	-	-	-	-	-
B3	70.2	10.78	19.6	96.1	11.44	13.3	34.92	4.35	1.6
B3	71.3	10.42	19.8	92.5	11.28	13.2	-	-	-
C3	75.0	10.27	20.2	100	10.70	16.8	30.93	3.46	1.8
C3	70.5	9.15	20.3	81.0	9.52	15.3	-	-	-
D3	65.6	7.37	22.2	63.7	6.44	21.2	21.68	2.32	1.9
D3	63.7	7.18	22.5	60.1	6.18	21.1	-	-	-
E3	60	5.73	24.2	66.8	6.70	20.8	28.75	3.49	1.7
E3	58.7	4.22	24.1	53.7	4.88	23.8	-	-	-
F3	51.2	4.10	29.5	55.0	4.76	24.2	32.56	4.09	2.0
F3	47.1	3.77	32.2	46.2	4.08	26.0	-	-	-

*Isıl işlem sonrası deney sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

6.1.9 Kayalarda ısıt işlemler sonrası üç eksenli deneyler ile yenilme durumunun gözlenmesi

3 grup örneklerin, 1. ve 2. grup örneklerine üç eksenli deneyler yapılmıştır. Deneydeki veriler kullanılarak kayanın yenilme zarfı çizilmiş ve çizilen bu zarfın kayanın malzemesindeki kohezyon, deformasyon modülü ve içsel sürtünme açısı parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca çizilen zarflardan Hoek-Brown yenilme ölçütü sabitleri “ m_b ”, “ s ” ve “ a ” değerleri hesaplanmıştır. Bu zarflar excel programı ve RocLab 1.0 programı yardımıyla belirlenmiştir. Farklı kategorilerle belirlediğimiz örneklerin hepsi için yüksek regreasyon değeri ($R^2 > 0.99$) bulunmuştur. Bulduğumuz sonuç ısıt işleme en çok maruz kalmış örneklerin dayanımlarının azaldığı bunun sonucunda ise yenilme zarflarının daha aşağı seviyede kaldığı gözlenmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütü ile karşılaştırdığımız zaman elde edilen verilerin zarflarla çakışmadığı, benzer karakteristik özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Örneklerin dokular ile taneler arası sınırları dikkate alınmış olup, belirlemiş olduğumuz 4 farklı GSI değeri (70,75,80,85) ile örneklerden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Örneklerin SRC değerleri [29] güncellenmiş abaklarından hareketle sağlam mermer örneği için; dolgunuz (6 puan), pürüzlü (5 puan), çatlakların düzensizliği, bozunmanın olmadığı (6 puan) ya da çok az olduğu durumu göze alınarak buradan verilen SRC puanı 17 olarak belirlenmiştir. Laboratuvardan elde edilen verilerin sonuçları ile çizilen yenilme zarflarının, Hoek-Brown yenilme ölçütüyle hesaplanan veriler sonucu elde edilen yenilme zarflarına oranla daha yüksek çıktığı, zarflarının da daha yukarı seviyede olduğu belirlenmiştir. Örneklerin tanesal boyutlarının da iri ya da ince taneli olması dayanıma etkisi olduğunu göstermiştir. Fakat ısıt işlemin süresinin fazla olması ve ısıt derecenin yüksek seviyelerde olması sebebiyle [42]’de vurguladığı ısıt işlemler sonucunda döngü sayısının artması yani zaman bakımından en çok süre ısıt işleme maruz kalan örneklerin tane sınırlarının gittikçe açıldığı kanısı bu tezden çıkarılacak sonuçlardan birisidir. Hoek-Brown yenilme ölçütü sabiti olan “ m ” ile örselenme faktörü “ D ” nin değeri sırasıyla [24] ve [27] abaklarından mermer için m_i değeri 9 ve örselenme faktörü de “ D ” 1 olarak alınmıştır. “ a ” parametresi içinde [24] önermiş olduğu bağıntı da kullanılan mermer örneklerinin GSI değeri 25’den yüksek olduğu için ($GSI > 25$) ve sağlam kayalar için önerilme sebebiyle “ a ” 0.5 olarak alınmıştır. 1. ve 2. grup mermer örneklerinin yenilme öncesi ve yenilme sonrası a_p , a_f , m_p , m_f , σ_{cp} ve σ_{cf} değerlerinin sonuçları Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4 ‘de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 : 1. ve 2. grup mermer örneklerinin yenilme öncesi (pre-failure) (peak) a_p , m_p , σ_c ve σ_{cp} değerlerinin sonuçları.

Örnek Grupları	a_p	m_p	σ_c	σ_{cp}	σ_{cp} / σ_c
A1	0.1435	3.4436	67.0	46.213	0.690
A2	0.32	2.9455	66.25	44.31	0.669
B1	0.2728	2.979	65.12	43.208	0.664
B2	0.013	4.8522	62.63	38.839	0.620
C1	0.0467	4.447	63.53	39.605	0.623
C2	0.122	4.0652	58.49	36.623	0.626
D1	0.0588	4.6721	60.96	35.591	0.584
D2	0.0389	4.6252	54.02	33.219	0.615
E1	0.2709	7.0039	58.88	29.875	0.507
E2	0.0202	4.9573	48.60	29.096	0.600
F1	0.4108	7.7515	55.01	26.779	0.487
F2	0.1089	5.5644	47.44	26.555	0.560

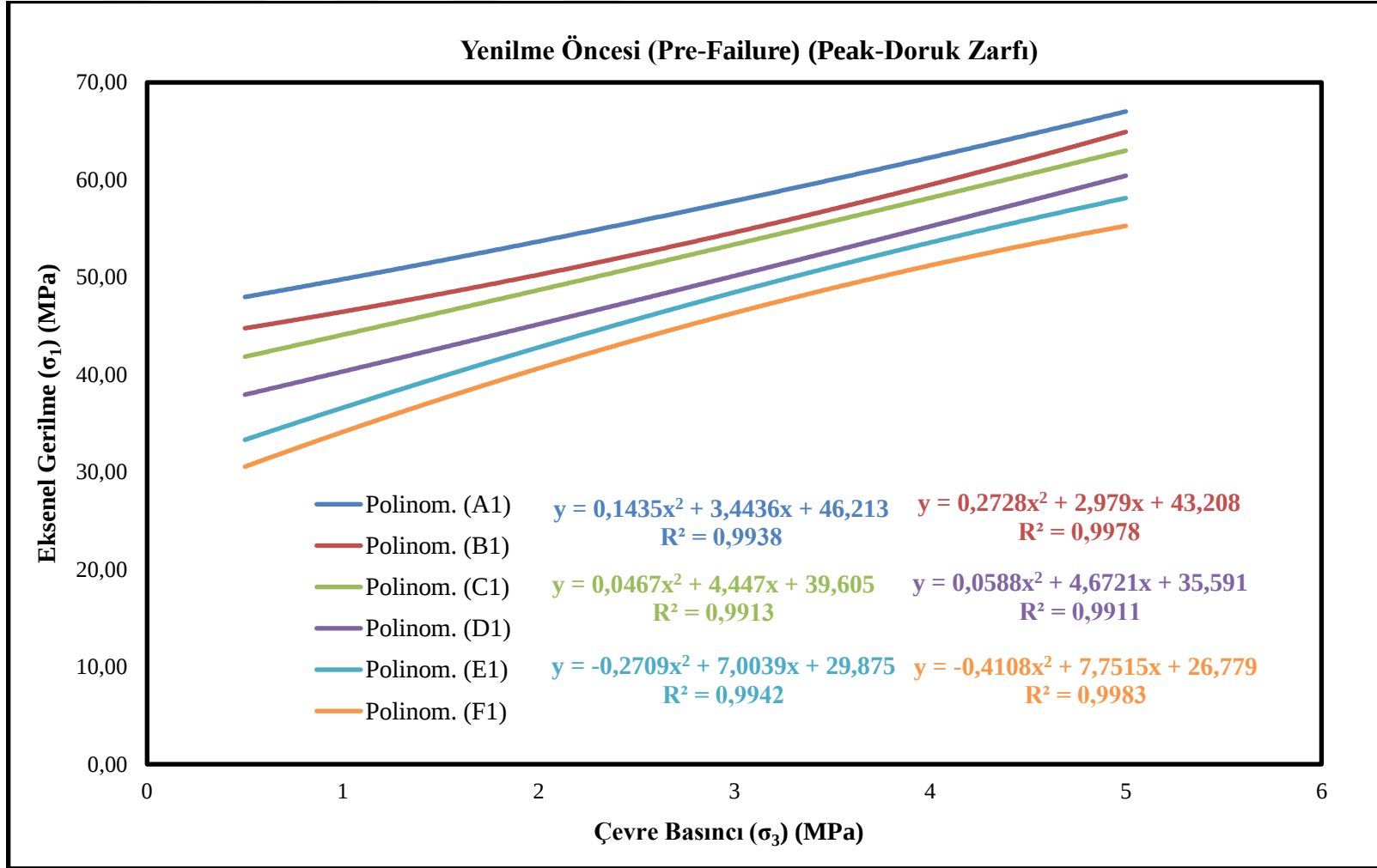
Çizelge 6.4 : 1. ve 2. grup mermer örneklerinin yenilme sonrası (post-failure) (residual) a_f , m_f , σ_c ve σ_{cf} değerlerinin sonuçları.

Örnek Grupları	a_f	m_f	σ_c	σ_{cf}	σ_{cf} / σ_c
A1	0.3487	11.105	65.78	18.882	0.287
A2	0.6575	13.193	66.25	15.896	0.240
B1	0.4538	11.309	62.87	17.251	0.274
B2	0.7378	13.119	62.63	13.952	0.223
C1	0.4094	10.978	61.10	15.807	0.259
C2	0.6653	12.362	58.49	12.320	0.210
D1	0.5414	11.610	58.00	13.549	0.233
D2	0.4122	10.783	54.02	9.2063	0.170
E1	0.8161	13.025	56.23	10.735	0.191
E2	0.2788	9.5194	48.60	7.5921	0.156
F1	1.1486	14.728	52.98	7.1388	0.135
F2	0.1908	9.0459	47.44	6.2908	0.133

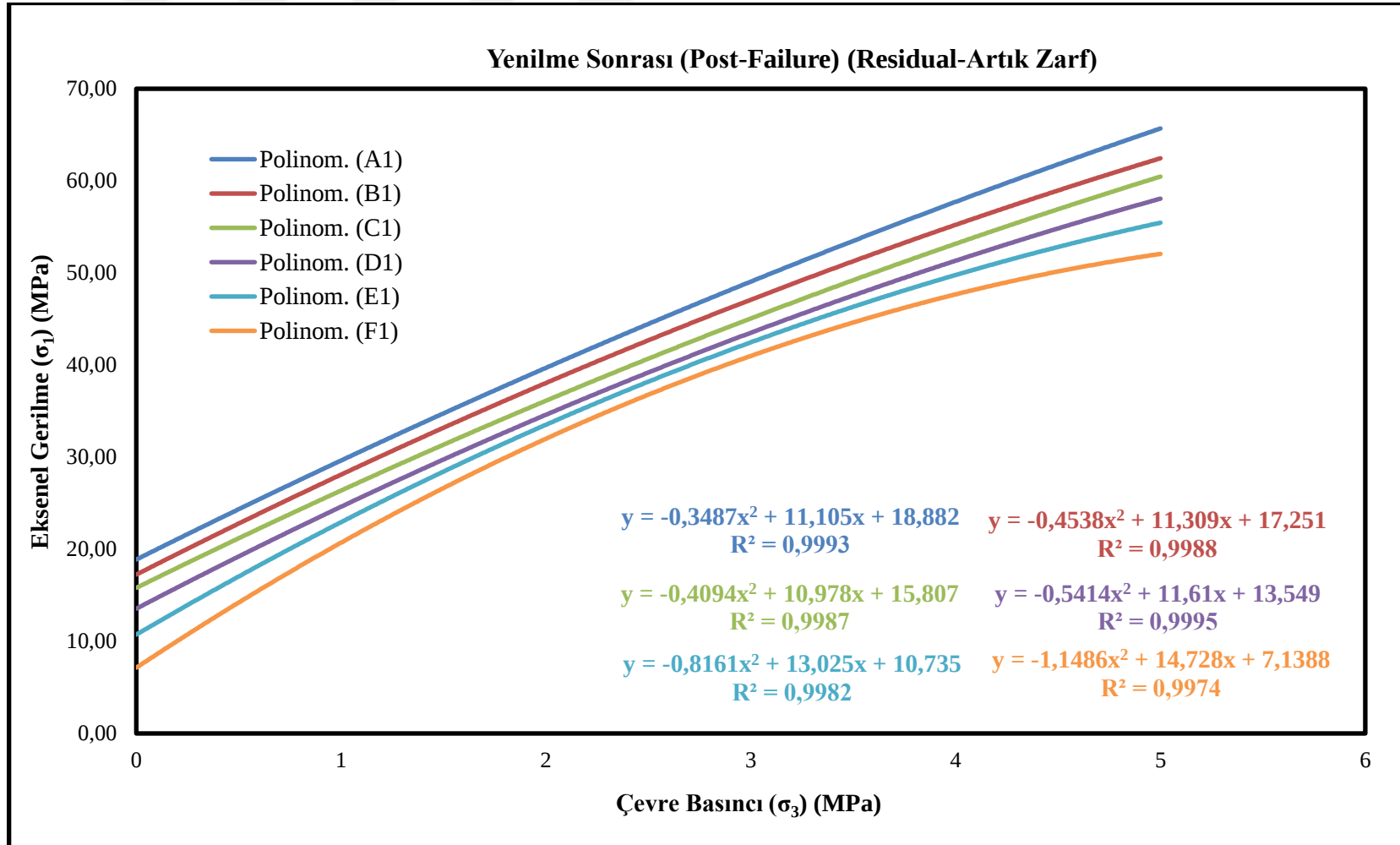
Hoek-Brown yenilme ölçütü ile yapılan karşılaştırmalar, üç eksenli deneyde kullanılan mermer örneklerinin yenilme sonrası mukavemetini temsil eden zarfların eşleşmediğini fakat residual mukavemet eğrilerinin Hoek-Brown yenilme ile benzerlik taşıdığını göstermiştir. Ayrıca bu ölçüte göre tahmini dayanımın; yüksek çevre basıncında daha düşük olduğu, düşük çevre basıncında (sığ derinlik) ise sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden elde edilen verilere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle Hoek-Brown ‘un önerdiği yüksek maliyetli ve yüksek güvenlik katsayılı değerlerin daha az maliyetli ve gerekli statik koşullar sağlanması durumunda daha az güvenlik katsayısına düşürülebileceği sonucunu çıkarabiliriz. Ayrıca sistem büyüklüğünün çevre basıncının artmasıyla makaslama parametrelerinde de farklı değerler gösterdiği, bunun etkisi ile de çevre basıncı artması sonucu tasarımların ona göre yapılması gerektiği sonucuna varabiliriz.

Farklı GSI değerleriyle (70,75,80,85) yapılan karşılaştırmalarda ise GSI arttığı durumlar bize malzemenin daha sağlam yapıda olduğu, GSI düşük olduğu ve düştüğü durumlarda ise malzemenin gevşek, kırık, çatlakların açıldığı ve daha düşük dayanıma sahip olduğu bilgisini vermektedir. Özellikle bu konular tünel projelerinde ve tünellerle ilgili yapılan çalışmalarda bize tünelin fay zonları, ayrılmış kaya kütlelerinde geçme durumu hakkında, kaya kütlesi tanımını yapma açısından önemli bilgiler vermektedir. Bilakis şev duraylılığı tasarımı, tünel tasarımı ve en önemli kısmı da oluşturan sistem büyüklüğü ile ilgili de çıkarımlar hakkında bilgiler vermektedir. Mermer örnekleri ile ilgili de 1. ve 2. grup örneklerin yenilme öncesi (pre-failure) üç eksenli deney veri sonuçları ve bu veriler kullanılarak çizilen zarflar Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 ‘de gösterilmiştir. Yenilme sonrası (post-failure) zarflar ise de Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 ‘de gösterilmiştir. Buna göre orijinal A grubu örneklerinin yenilme öncesi ve yenilme sonrası durumlarında tüm grup örneklerden sağlam kaya dayanımları (σ_{ci}) daha yüksek değerlikli olarak bulunmuştur. Burada ısıtılma en çok maruz kalan örneklerin sağlam kaya dayanımlarının (σ_c) düşük çıktığı sonucu elde edilmiştir. Bunu ısıtılma işlem sonrası mikro çatlakların gelişmeleri, porozitelerin artması nedeniyle dayanımlarının düşmesi şeklinde düşünebiliriz. Bu nedenle F grubu örnekleri diğer grup örneklerine göre daha düşük dayanıma sahiptir.

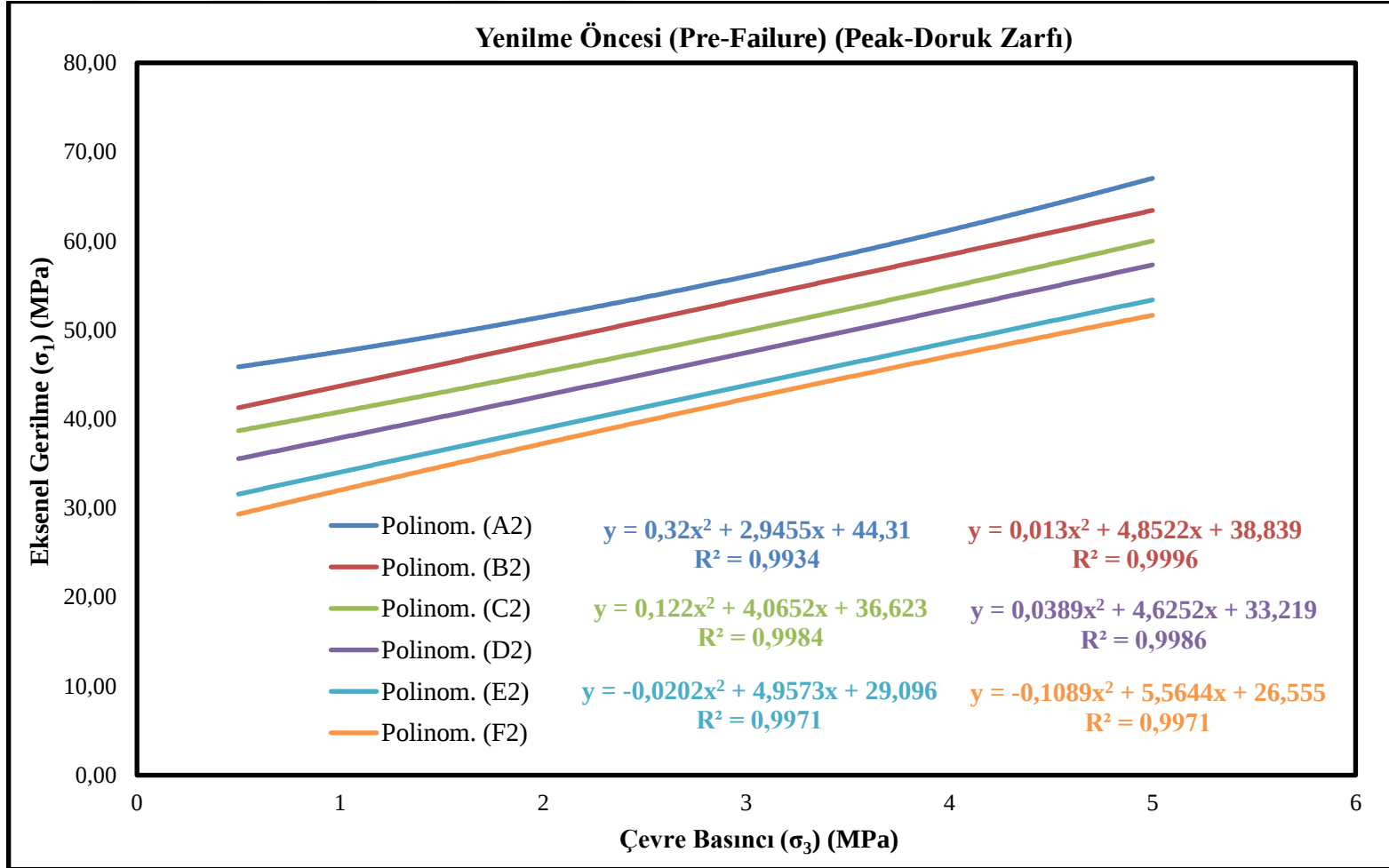
“EK” kısmında gerekli diğer hesaplamalar, sonuçlar, veriler ve GSI durumlarına göre gerekli parametreler tablolarla, fotoğraflarla, çizimlerle desteklenmiştir.



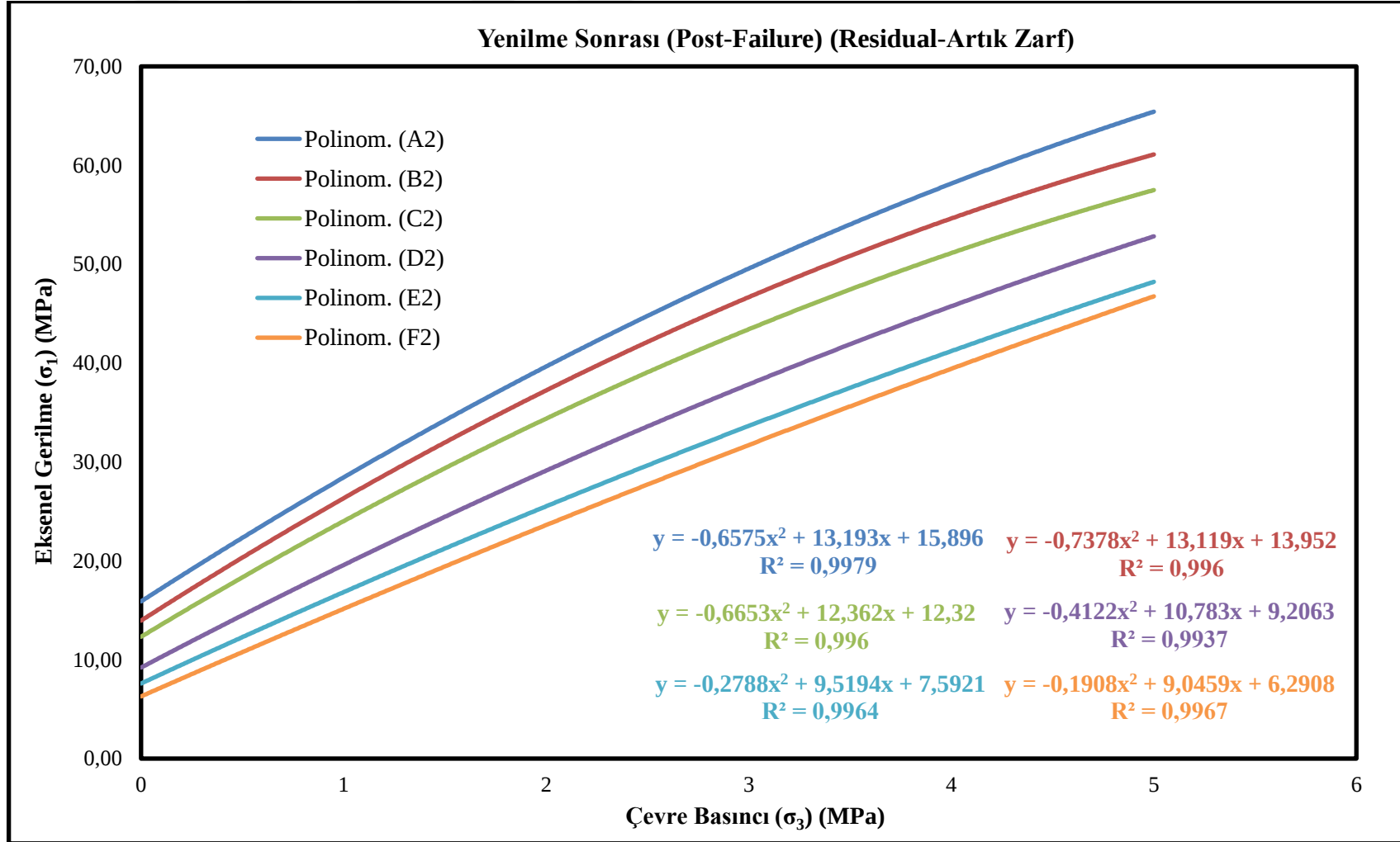
Şekil 6.10 : 1. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme öncesi, pre-failure, peak-doruk zarfı).



Şekil 6.11 : 1. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme sonrası, post-failure, residual-doruk zarf).



Şekil 6.12 : 2. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme öncesi, pre-failure, peak-doruk zarfı).



Şekil 6.13 : 2. grup mermer örneklerinin üç eksenli deney veri sonuçları (yenilme sonrası, post-failure, residual-doruk zarf).

Çizelge 6.5 : 1. grup örneklerin yenilme öncesi içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ve kohezyon (c_p) değerlerinin sonuçları.

Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Ortalama Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Örnek Grupları											
		A1		B1		C1		D1		E1		F1	
		ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)
0.0-0.5	0.25	90.55	1.72	90.54	1.61	89.72	1.60	89.33	1.49	88.96	1.29	88.24	1.24
0.5-1.0	0.75	84.37	2.85	83.85	2.76	83.59	2.57	82.87	2.41	80.61	2.29	81.04	2.01
1.0-1.5	1.25	80.40	3.59	79.58	3.49	79.38	3.23	78.40	3.39	77.65	2.65	77.10	2.43
1.5-2.0	1.75	77.28	4.17	76.56	4.02	76.21	3.74	74.85	3.96	74.52	3.03	74.03	2.76
2.0-2.5	2.25	74.69	4.65	74.04	4.47	73.88	4.12	72.94	4.27	72.02	3.34	71.58	3.03
2.5-3.0	2.75	72.63	5.05	72.03	4.82	71.43	4.52	70.85	4.61	70.56	3.52	69.44	3.28
3.0-3.5	3.25	70.85	5.38	69.99	5.19	69.58	4.82	68.49	5.00	68.49	3.77	67.69	3.47
3.5-4.0	3.75	69.30	5.68	68.62	5.43	68.09	5.07	67.18	5.21	66.79	3.98	66.28	3.63
4.0-4.5	4.25	68.09	5.91	67.43	5.65	67.04	5.24	66.16	5.38	65.41	4.16	65.04	3.77
4.5-5.0	4.75	66.79	6.17	66.41	5.83	66.03	5.41	65.29	5.52	64.68	4.25	63.48	3.95

Çizelge 6.6 : 2. grup örneklerin yenilme öncesi içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ve kohezyon (c_p) değerlerinin sonuçları.

Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Ortalama Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Örnek Grupları											
		A2		B2		C2		D2		E2		F2	
		ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)	ϕ_p ($^\circ$)	c_p (MPa)
0.0-0.5	0.25	90.13	1.72	89.72	1.57	89.72	1.48	88.96	1.44	88.59	1.31	88.24	1.23
0.5-1.0	0.75	84.11	2.78	83.35	2.55	82.63	2.51	82.16	2.34	81.26	2.16	80.40	2.06
1.0-1.5	1.25	79.99	3.51	79.18	3.20	78.40	3.14	77.65	2.94	76.56	2.71	76.04	2.53
1.5-2.0	1.75	76.74	4.09	76.04	3.69	75.35	3.59	74.52	3.37	73.25	3.10	72.63	2.89
2.0-2.5	2.25	74.20	4.55	73.56	4.09	72.63	3.99	72.17	3.69	70.71	3.41	70.42	3.14
2.5-3.0	2.75	72.02	4.95	71.43	4.43	70.56	4.31	69.86	4.01	68.89	3.63	68.22	3.38
3.0-3.5	3.25	70.42	5.24	69.86	4.68	68.76	4.58	68.09	4.25	67.05	3.85	66.28	3.60
3.5-4.0	3.75	68.89	5.52	68.36	4.93	67.30	4.81	66.54	4.47	65.17	4.08	64.92	3.75
4.0-4.5	4.25	67.69	5.74	67.05	5.14	66.16	4.98	65.29	4.64	64.20	4.20	63.49	3.91
4.5-5.0	4.75	66.41	5.98	65.91	5.33	65.04	5.16	64.32	4.78	63.02	4.35	62.33	4.05

Çizelge 6.7 : 1. grup örneklerin yenilme sonrası içsel sürtünme açısı (ϕ_r) ve kohezyon (c_r) değerlerinin sonuçları.

Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Ortalama Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Örnek Grupları											
		A1		B1		C1		D1		E1		F1	
		ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)	ϕ_r ($^\circ$)	c_r (MPa)
0.0-0.5	0.25	85.45	1.08	84.37	1.06	83.85	1.01	82.39	0.94	80.40	0.83	75.35	0.69
0.5-1.0	0.75	77.83	1.66	77.46	1.54	76.39	1.48	75.02	1.35	73.25	1.14	70.85	0.83
1.0-1.5	1.25	73.72	1.98	72.78	1.87	72.48	1.73	71.88	1.52	71.28	1.23	69.99	0.86
1.5-2.0	1.75	71.73	2.13	70.99	1.99	70.14	1.89	69.44	1.66	68.49	1.36	67.83	0.92
2.0-2.5	2.25	70.14	2.25	69.58	2.10	68.89	1.97	67.96	1.74	67.69	1.39	67.43	0.93
2.5-3.0	2.75	68.89	2.35	68.36	2.19	67.43	2.07	67.18	1.78	66.92	1.43	66.28	0.97
3.0-3.5	3.25	68.09	2.42	67.43	2.25	66.79	2.11	65.78	1.86	65.53	1.49	64.92	1.01
3.5-4.0	3.75	66.28	2.56	66.28	2.34	65.66	2.18	64.92	1.91	64.56	1.53	63.61	1.05
4.0-4.5	4.25	66.16	2.57	65.29	2.41	64.68	2.25	64.44	1.94	63.48	1.58	62.67	1.08
4.5-5.0	4.75	65.41	2.63	64.56	2.46	63.84	2.31	63.49	1.99	62.67	1.62	61.88	1.10

Çizelge 6.8 : 2. grup örneklerin yenilme sonrası içsel sürtünme açısı (ϕ_r) ve kohezyon (c_r) değerlerinin sonuçları.

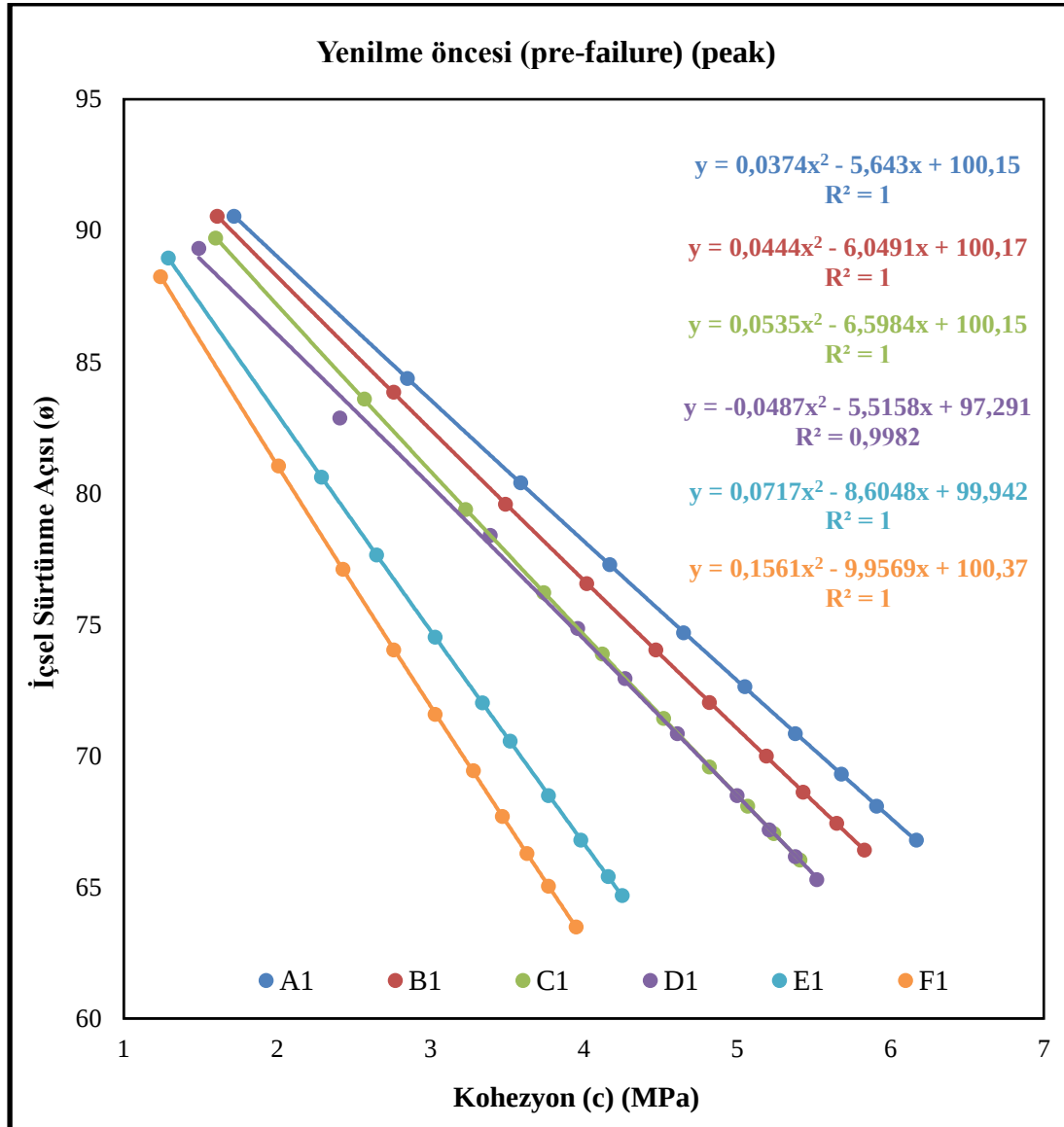
Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Ortalama Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Örnek Grupları											
		A2		B2		C2		D2		E2		F2	
		ϕ_r (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	c_r (MPa)
0.0-0.5	0.25	83.59	1.03	82.87	0.94	81.93	0.88	79.78	0.74	77.46	0.68	76.21	0.59
0.5-1.0	0.75	76.74	1.47	75.69	1.35	73.88	1.28	70.71	1.08	69.03	0.94	65.91	0.86
1.0-1.5	1.25	73.56	1.67	72.33	1.54	71.29	1.41	67.20	1.21	65.04	1.07	63.37	0.93
1.5-2.0	1.75	72.02	1.77	70.71	1.63	69.58	1.50	67.32	1.21	63.95	1.10	61.88	0.97
2.0-2.5	2.25	70.42	1.88	69.86	1.68	68.76	1.54	66.40	1.24	64.19	1.10	62.56	0.95
2.5-3.0	2.75	68.76	1.99	68.36	1.77	67.05	1.63	64.44	1.32	62.97	1.14	61.76	0.97
3.0-3.5	3.25	67.83	2.05	67.18	1.84	65.78	1.69	63.30	1.36	61.20	1.19	60.76	1.00
3.5-4.0	3.75	67.05	2.10	65.78	1.92	64.80	1.75	63.37	1.36	60.59	1.21	59.67	1.03
4.0-4.5	4.25	66.28	2.15	64.80	1.98	63.60	1.81	61.76	1.42	60.11	1.23	59.35	1.04
4.5-5.0	4.75	65.41	2.21	64.32	2.01	63.48	1.82	61.30	1.44	59.89	1.24	58.82	1.05

Çizelge 6.5, Çizelge 6.6, Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8 ‘de bulunan ϕ_p , c_p ve ϕ_r , c_r parametreleri aşağıdaki formül ile bulunmuştur. Taneler arasındaki bağların ısıtılma işlemle kısmen parçalanmasına rağmen içsel sürtünme açıları değerlerinde yaklaşık % 25 oranında artış olmuştur. Kohezyon değerleri ise yaklaşık yarı oranda azaldığı görülmüştür.

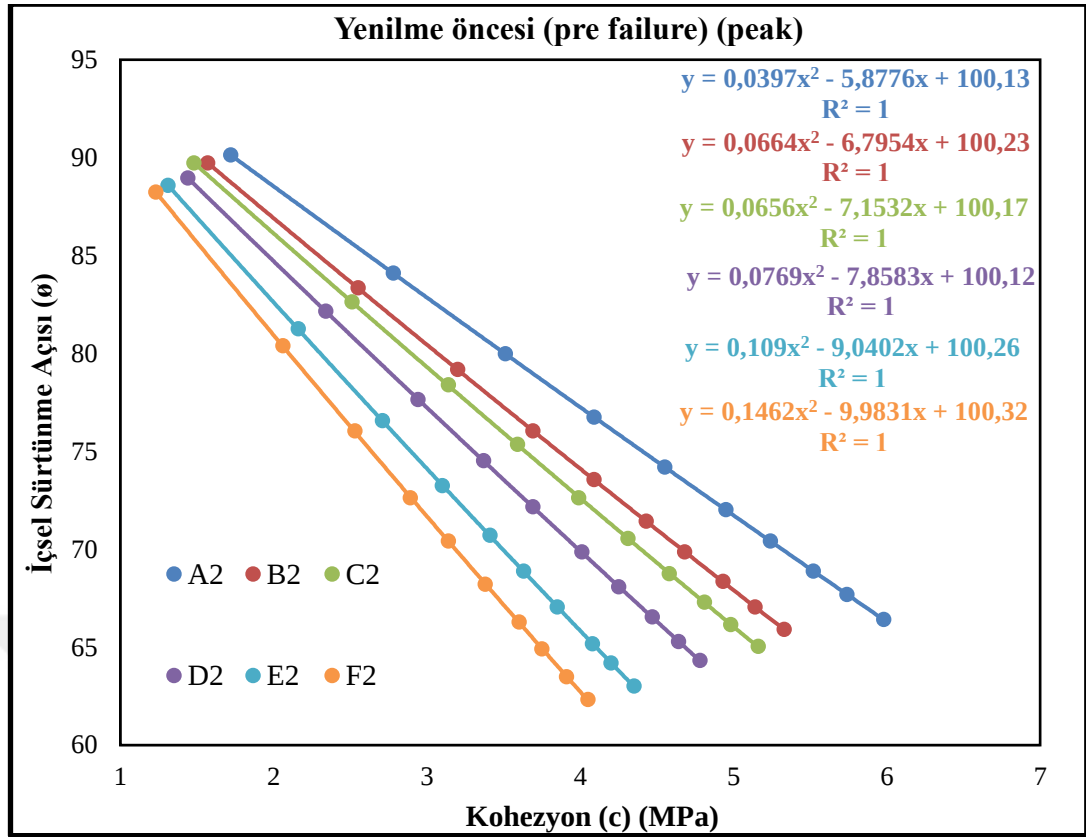
$$\phi_p = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad (6.1)$$

$$c_p = \sigma_c \cdot \frac{1-\sin\phi}{2\cos\phi} \quad (6.2)$$

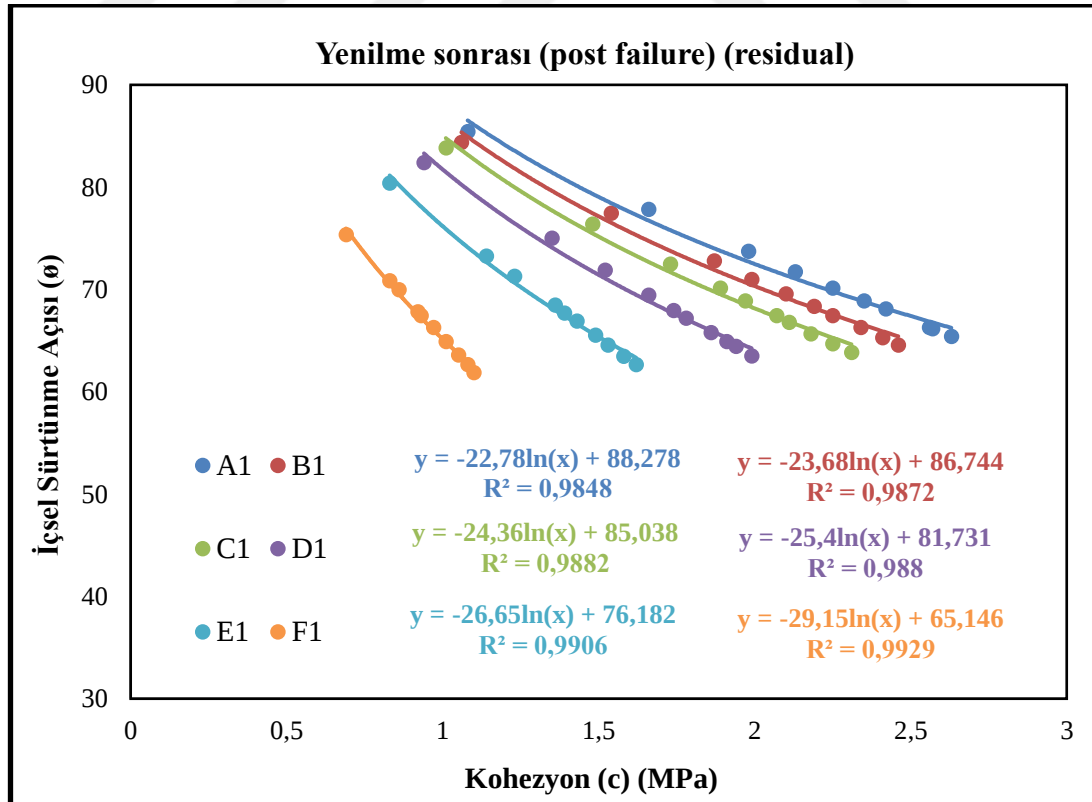
$$m = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3} \quad (6.3)$$



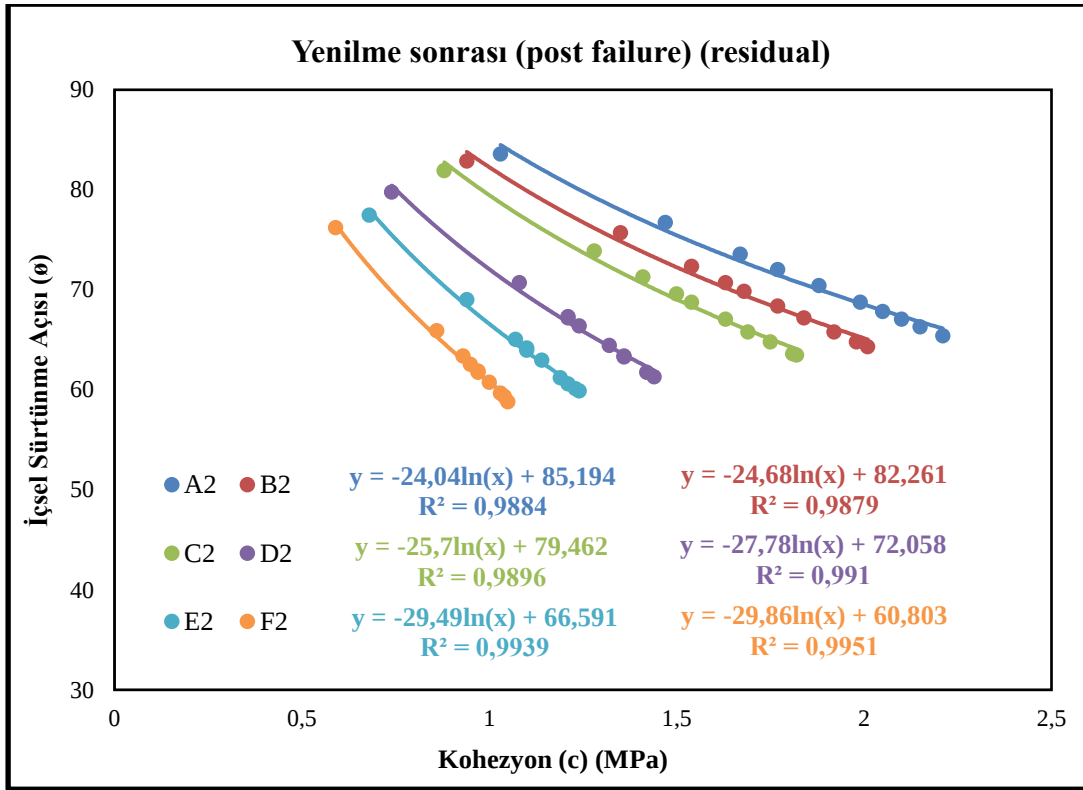
Şekil 6.14 : 1. grup örneklerin yenilme öncesi c ve ϕ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.



Şekil 6.15 : 2. grup örneklerin yenilme öncesi c ve ϕ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.

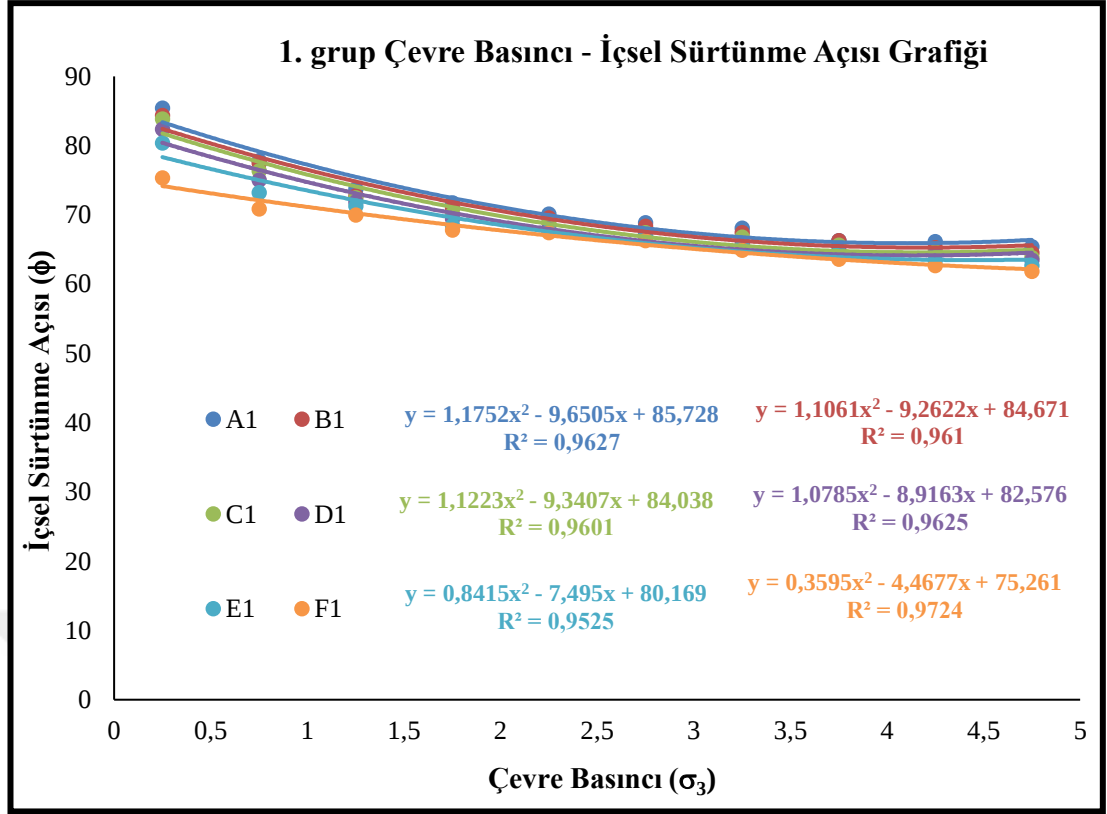


Şekil 6.16 : 1. grup örneklerin yenilme sonrası c ve ϕ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.

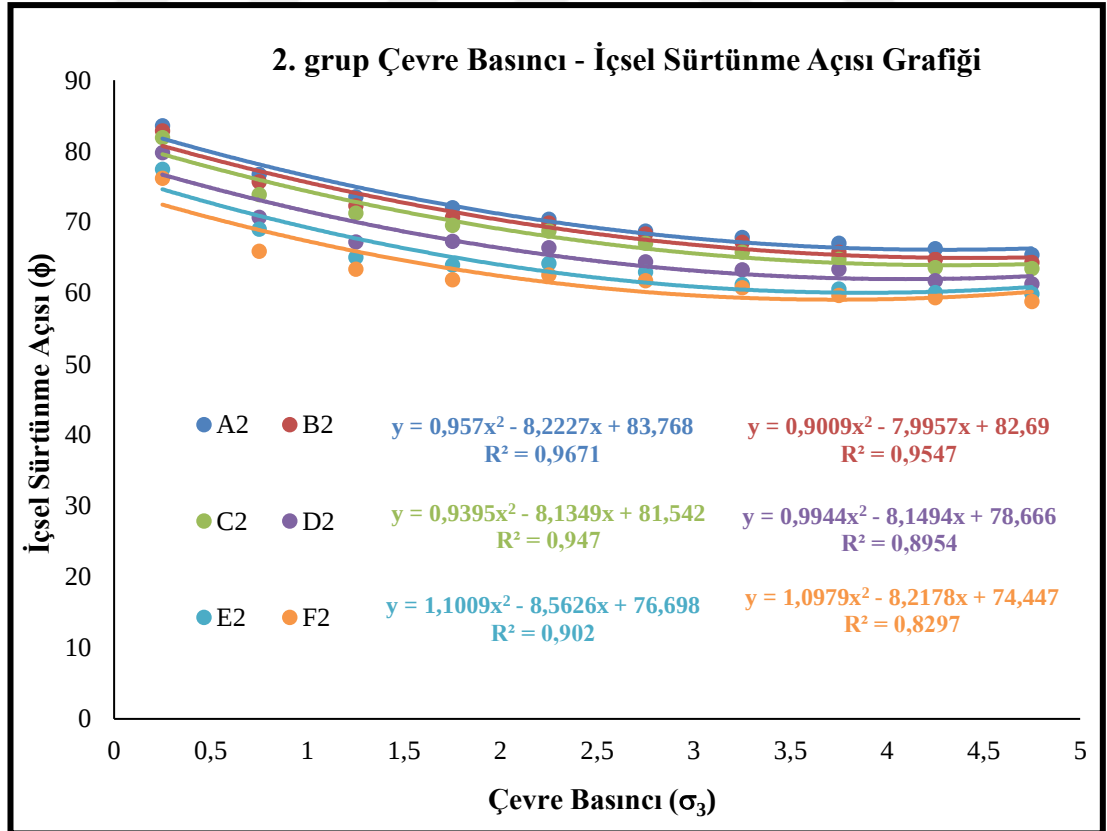


Şekil 6.17 : 2. grup örneklerin yenilme sonrası c ve ϕ arasındaki bağıntıyı gösteren grafik.

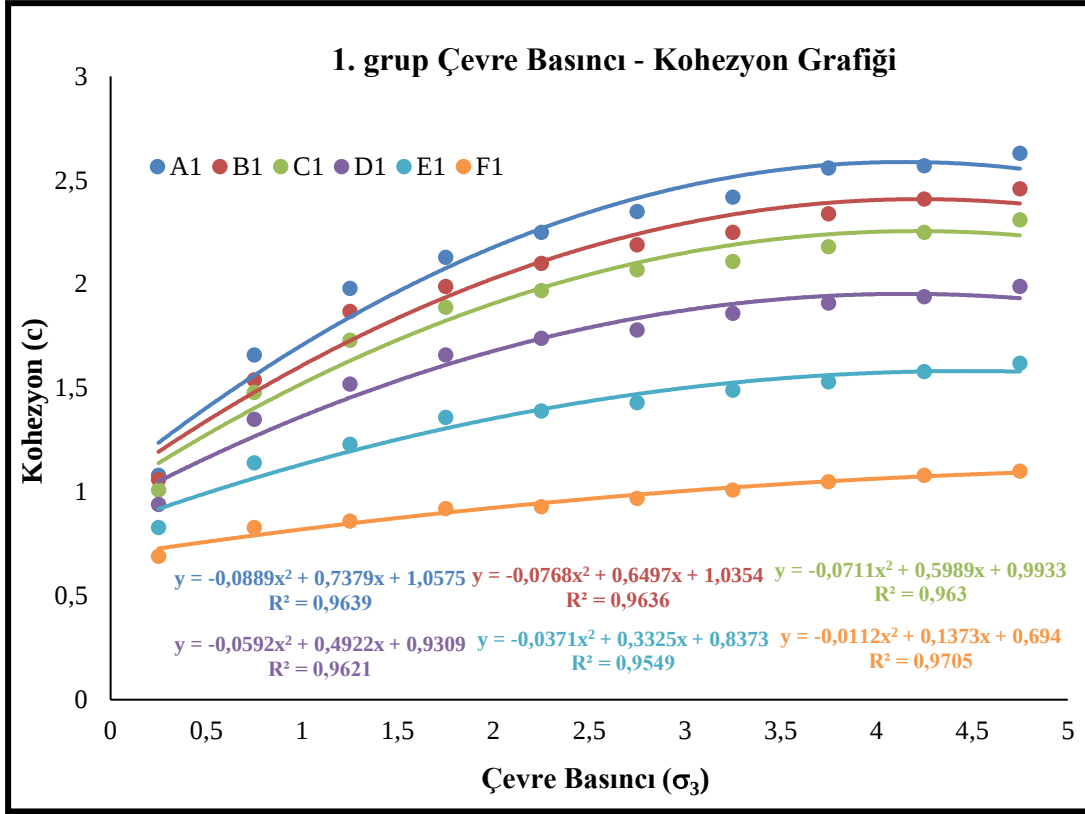
Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 'de 1. ve 2. grup örneklerin yenilme öncesi kohezyon ve içsel sürtünme açılarının ilişkisi gösterilmiştir. Korelasyon değerleri çoğu örnekte doğrusal olarak çıkmıştır ($R^2 > 1$). Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 'da ise 1. ve 2. grup örneklerin yenilme sonrası kohezyon ve içsel sürtünme açılarının ilişkisi gösterilmiştir. Logaritmik korelasyon değerleri $R^2 > 0.98$ olarak bulunmuştur. Buna göre A grubu örneklerinin içsel sürtünme açıları çevre basıncının artmasıyla diğer grup örneklere göre azalırken, kohezyon değerleri ise daha düşük değerlikli çıkmıştır. Isıl işlemin etkisine göre en çok ısıl işleme maruz kalan F grubu örneklerin içsel sürtünme açıları düşük, kohezyonları ise yüksek çıkmıştır. İçsel sürtünme açılarının yüksek değerden düşük değere doğru grup örneklerinde sıralanışı sırasıyla $A > B > C > D > E > F$ şeklindedir. Kohezyon değerlerinin yüksek değerden düşük değere doğru grup örneklerinde sıralanışı sırasıyla $A > B > C > D > E > F$ şeklindedir. Ayrıca çevre basıncının artmasıyla da kohezyon değeri artarken, içsel sürtünme açısı değerleri de düşmüştür. Buradan dayanımın yüksek çevre basıncında daha düşük olduğu, düşük çevre basıncında ise sürekli yenilme durumunda üç eksenli deneylerden elde edilen verilere göre daha yüksek olduğunu sonucuna varabiliriz.



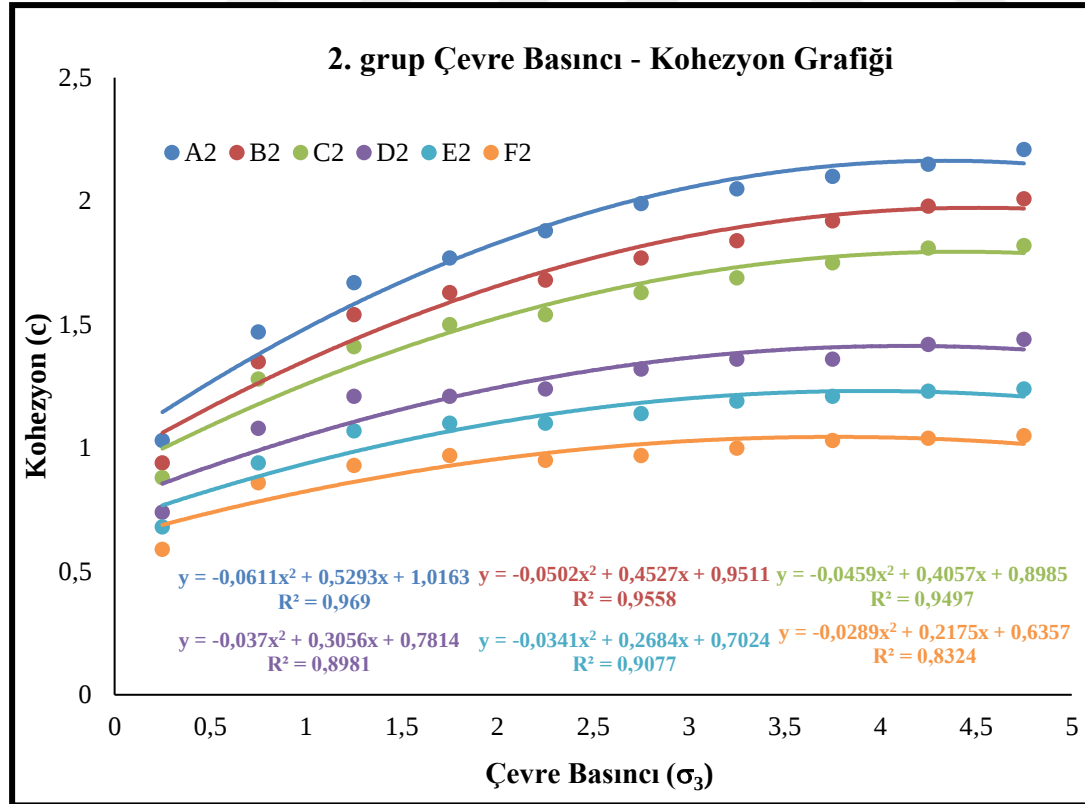
Şekil 6.18 : 1. grup örneklerin içsel sürtünme açısı ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



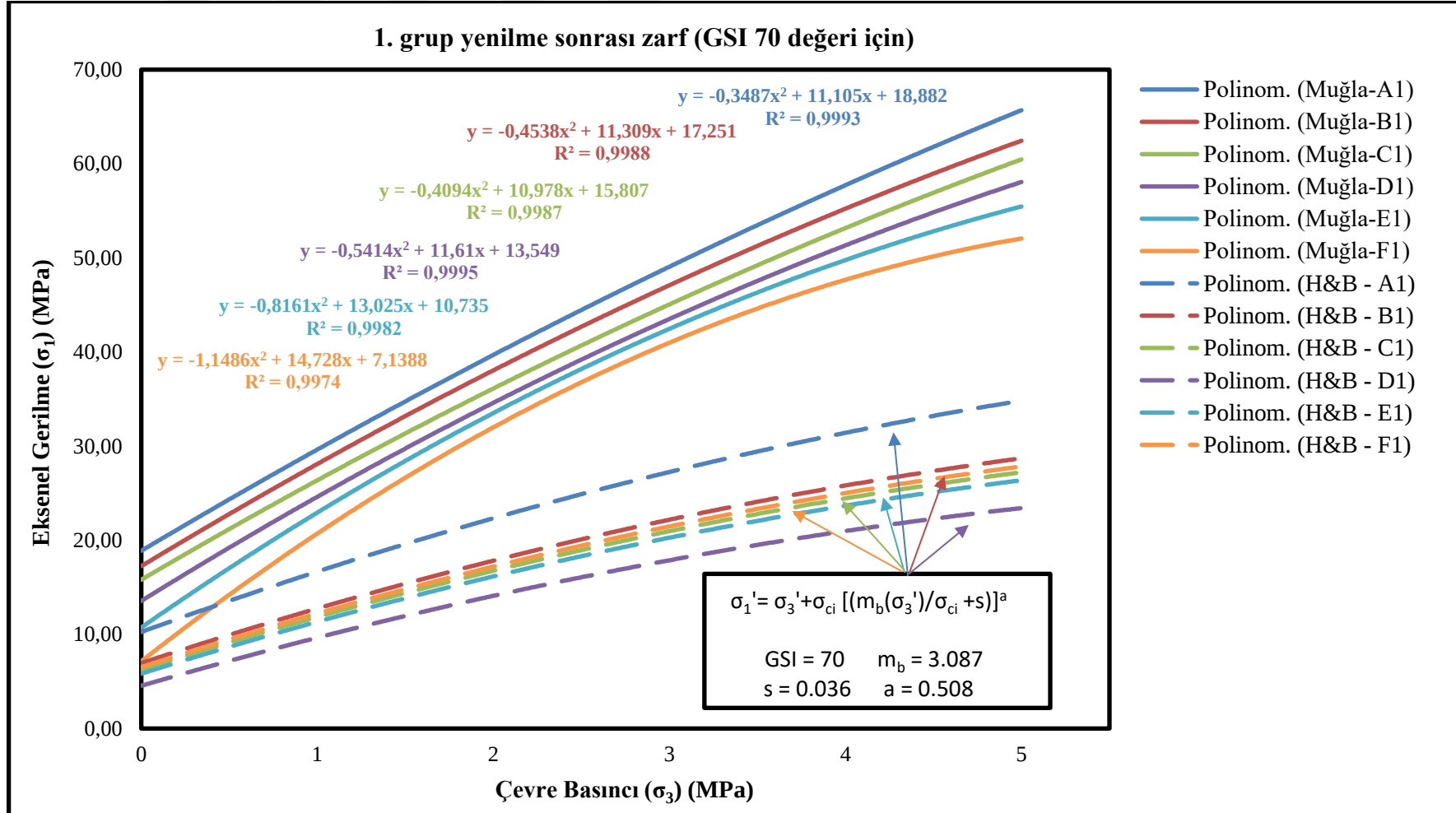
Şekil 6.19 : 2. grup örneklerin içsel sürtünme açısı ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



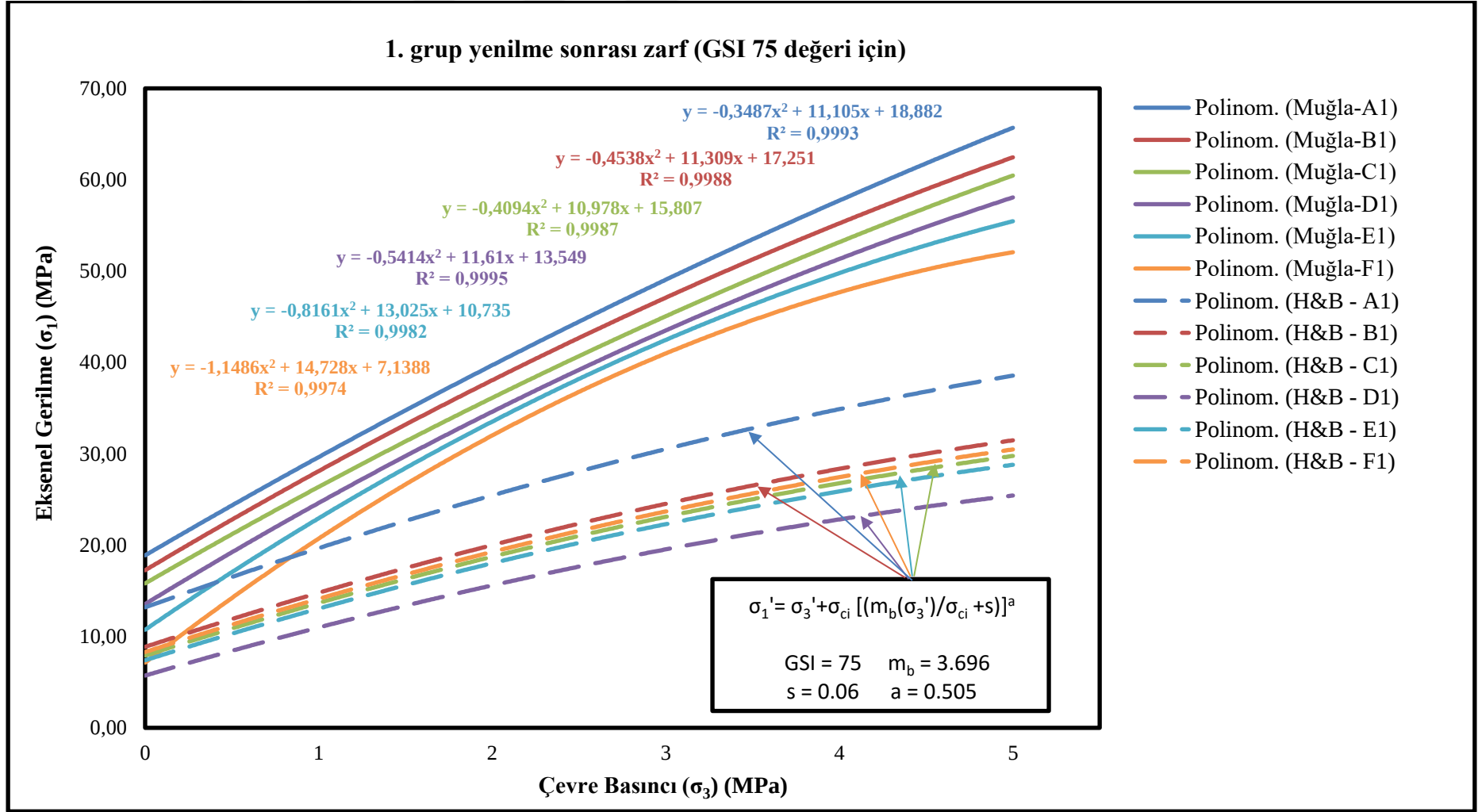
Şekil 6.20 : 1. grup örneklerin kohezyon ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



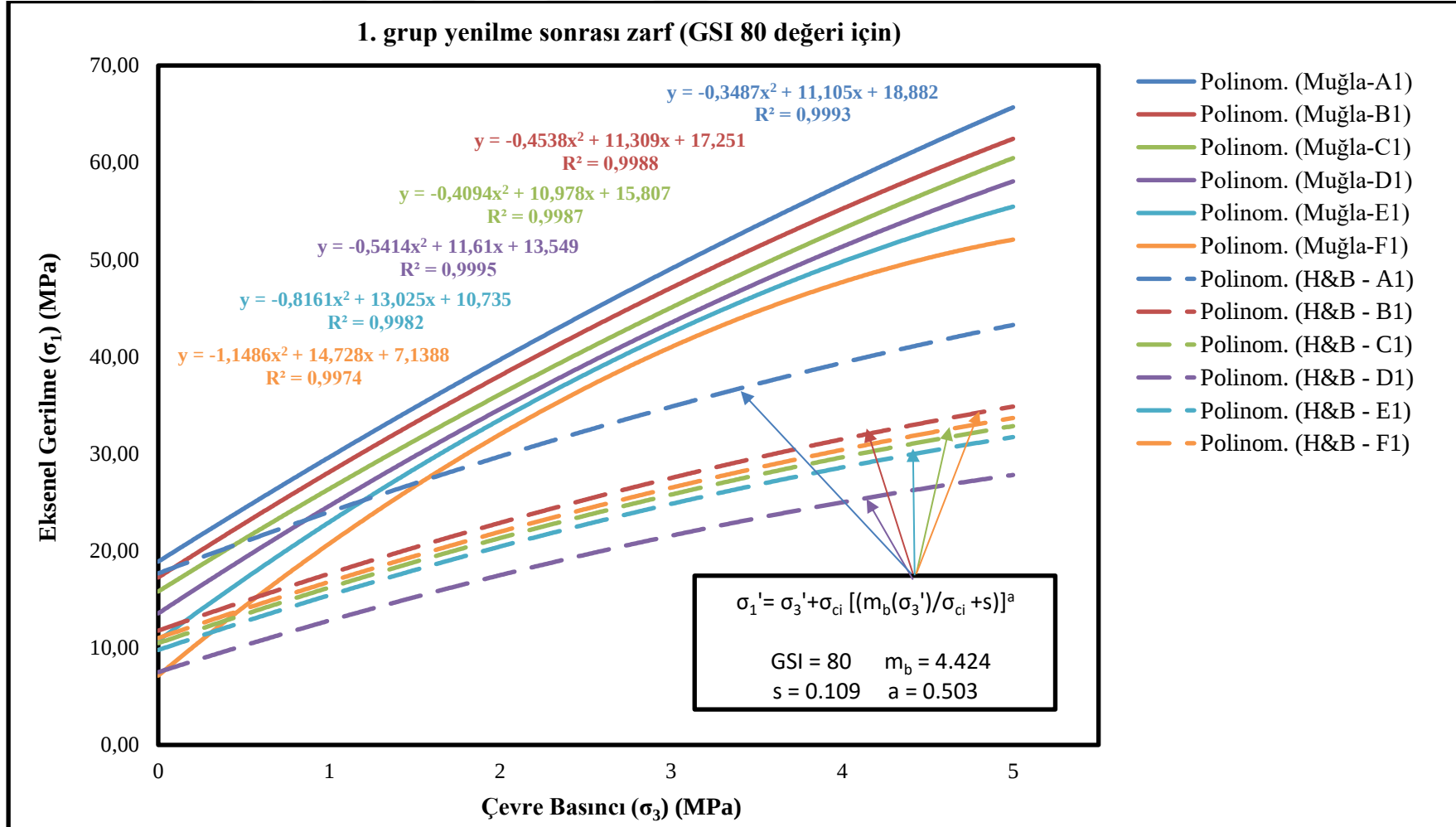
Şekil 6.21 : 2. grup örneklerin kohezyon ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik.



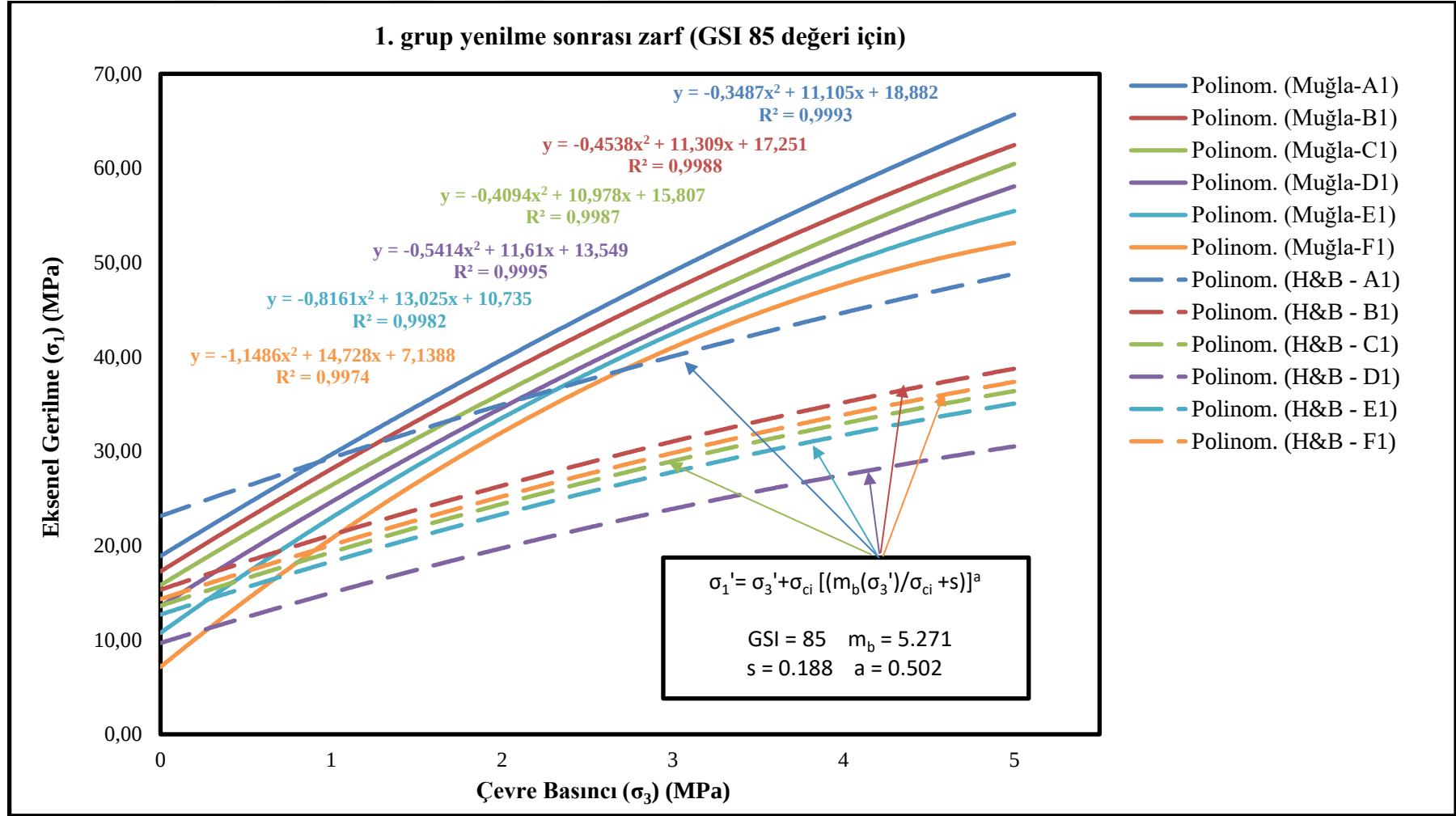
Şekil 6.22 : 1. grup örneklerin GSI 70 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



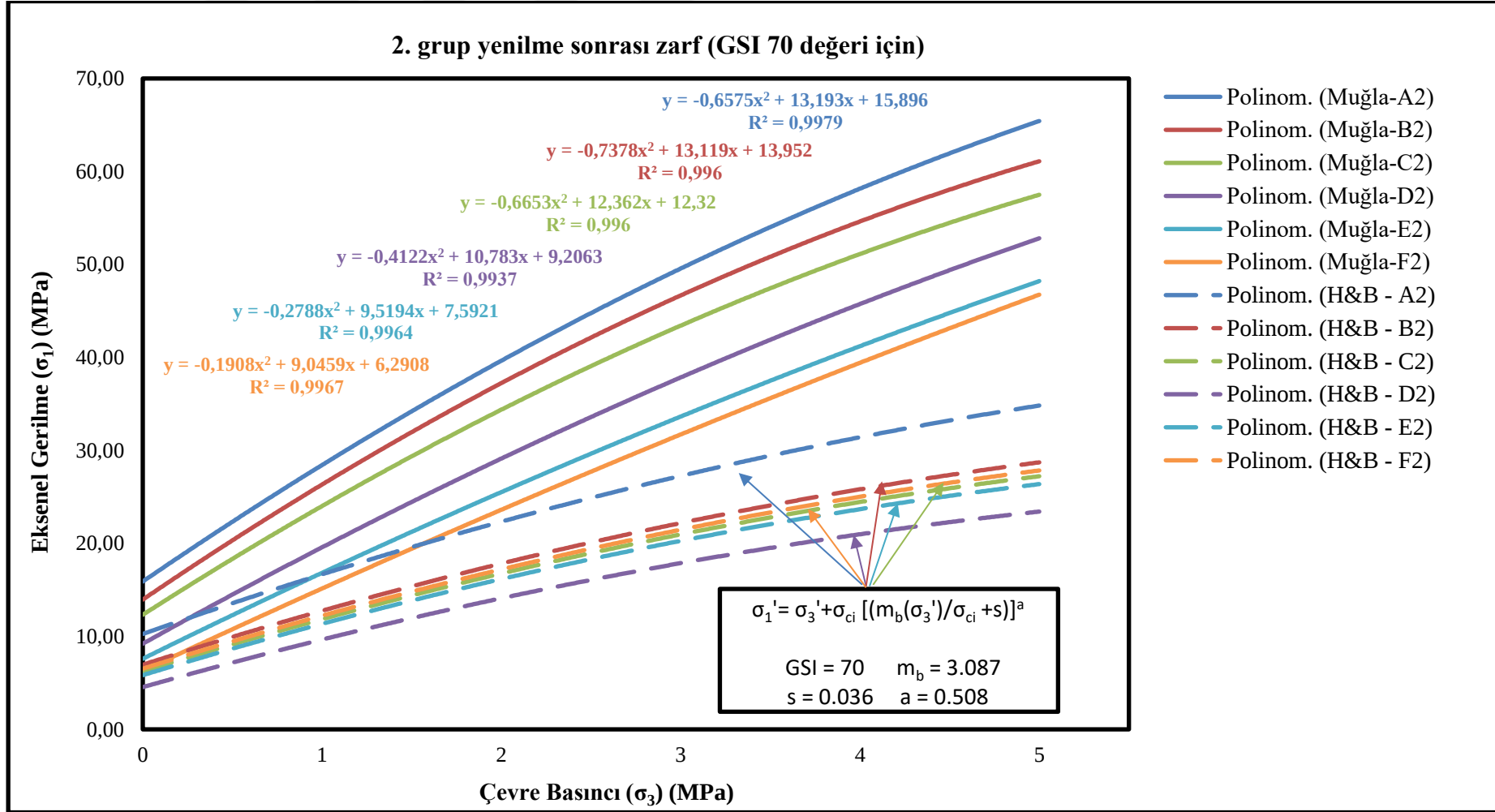
Şekil 6.23 : 1. grup örneklerin GSI 75 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



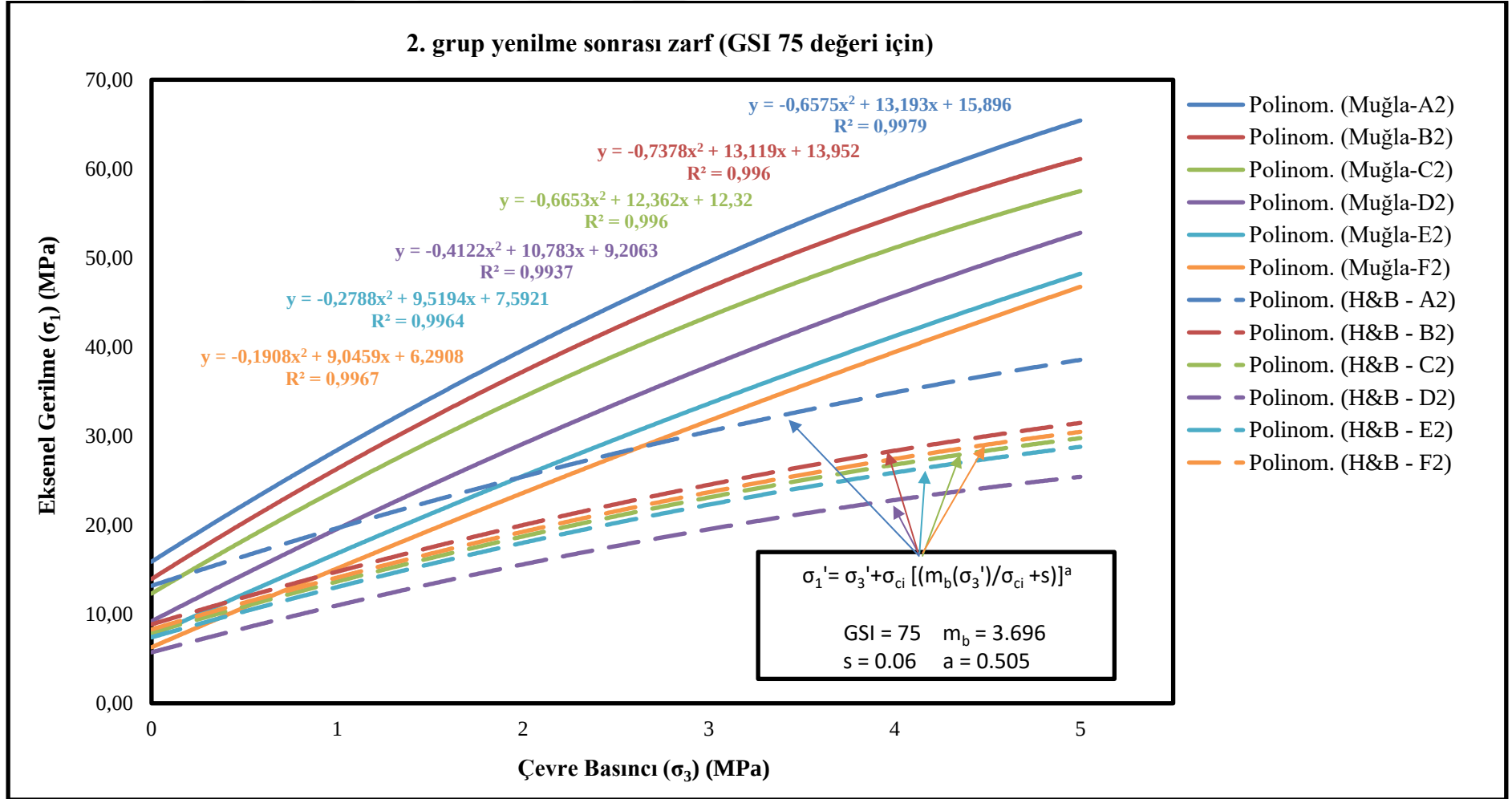
Şekil 6.24 : 1. grup örneklerin GSI 80 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



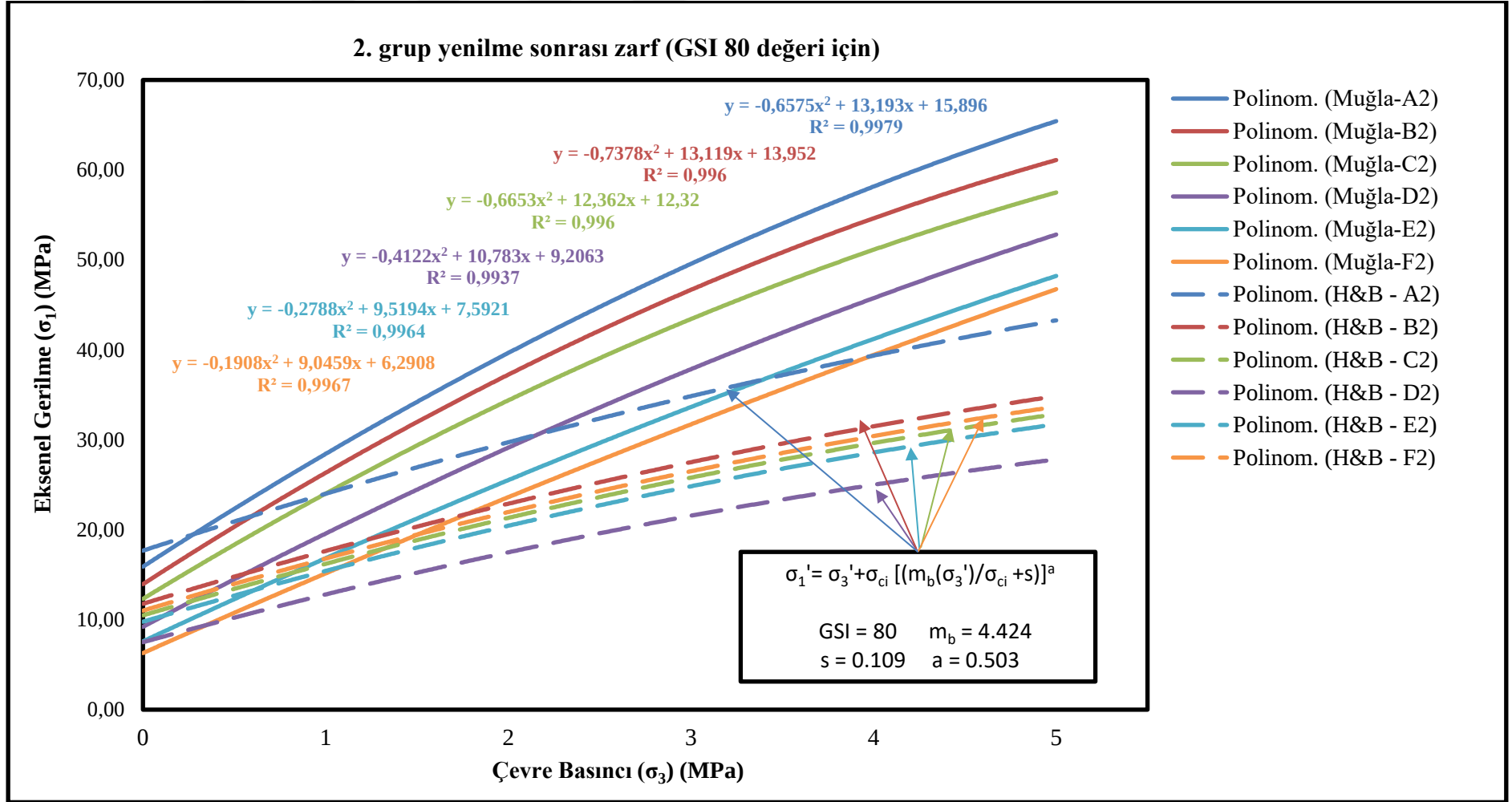
Şekil 6.25 : 1. grup örneklerin GSI 85 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



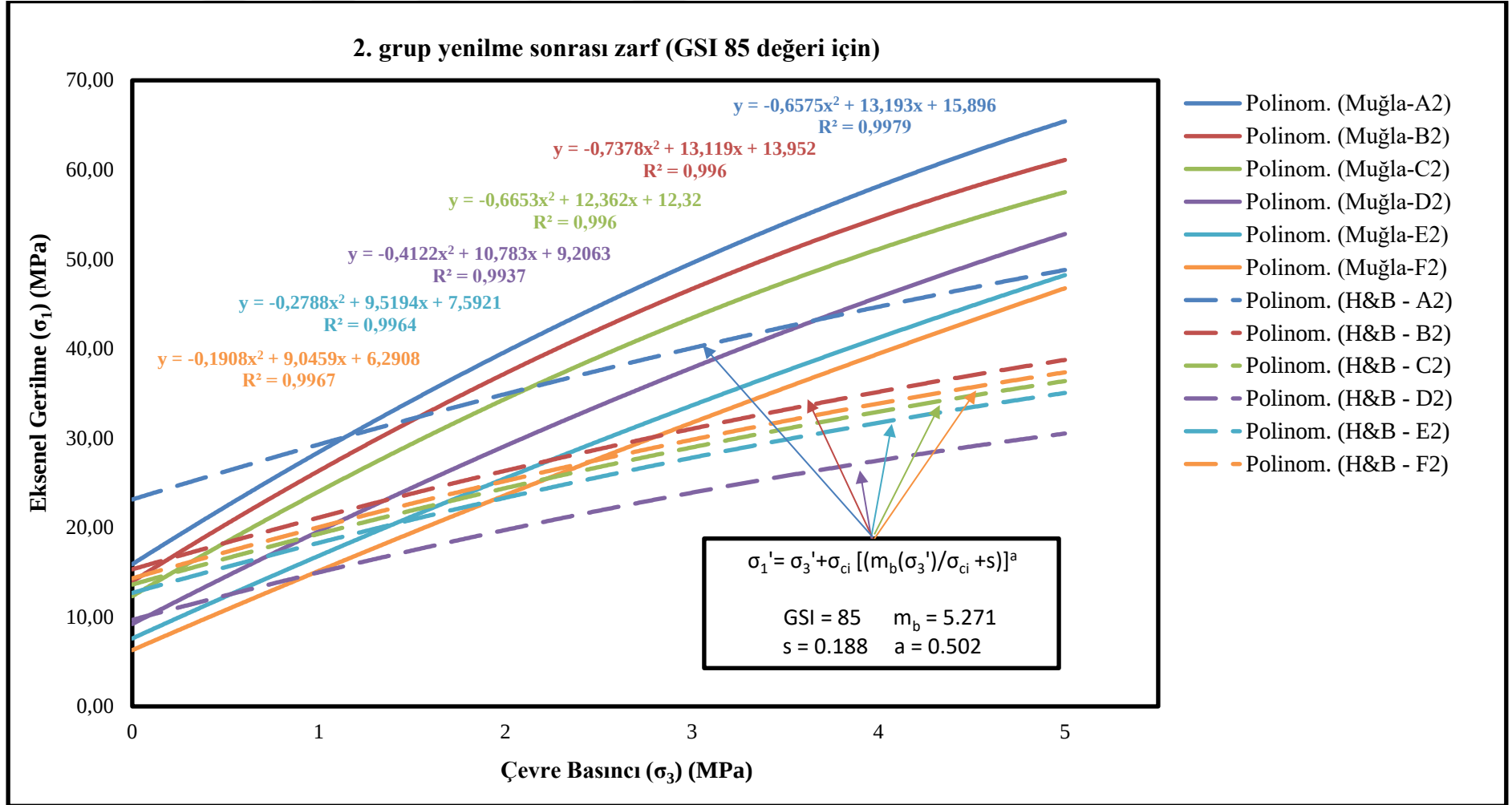
Şekil 6.26 : 2. grup örneklerin GSI 70 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



Şekil 6.27 : 2. grup örneklerin GSI 75 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



Şekil 6.28 : 2. grup örneklerin GSI 80 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.



Şekil 6.29 : 2. grup örneklerin GSI 85 değeri için Hoek-Brown ölçütü ile karşılaştırılması.

Muğla mermer örneklerinin Jeolojik Dayanım İndisi (*Geological Strength Index*) değeri Şekil 4.7 'de verilen yapısal tanımlama açısından “*Cubic block formed by the orthogonal discontinuity set, well interlocked, undisturbed rock mass.*” yani ortagonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi tanımlaması seçilmiştir. Şekil 4.7 'de verilen bu tanımlamaya ait sayısal değer 80 olarak seçilmiştir.

Muğla mermeri için Çizelge 4.2 'de verilen tablodan m_i değeri mermerler için 9, örselenme faktörü ise Şekil 4.6 'daki tablodan “gerilme boşalmasında örselenmeye yol açması ve patlatmalar sonucu örtü kalınlığının kaldırılmış olması sonucu örselenmeye maruz kalmasından dolayı “D” 1 değeri seçilmiştir.

Ayrıca Jeolojik Dayanım İndisi (GSI) 70,75,80 ve 85 değerleri baz alınarak kullanılan mermer örnekleri ile bu değer aralıklarına karşılık gelen değerlerin karşılaştırılması yapılarak dayanım ve parametreler hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. İlgili hesaplamalar yapıldıktan sonra laboratuvarından elde edilen veriler ile Hoek-Brown yenilme ölçütünden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır ve bunların yenilme zarfları çizilmiştir.

Buna göre grafiklerde de görüldüğü gibi laboratuvar deneyleri ile ısıtma soğutma çevrimi uygulanan örneklerin kalıntı (rezidüel) yenilme zarfları, aynı çevre gerilmeleri altında, Hoek & Brown ölçütüne göre hesaplanan eksenel gerilme değerlerinden daha yüksek olarak bulunmuştur. Doruk yenilme zarfları ise, aynı çevre gerilmeleri altında, Hoek & Brown ölçütüne göre hesaplanan eksenel gerilme değerleri ile uyumludur. Bu bize düşük çevre basınçları altında, yenilme zarflarının eğiminde önemli artışın olduğu belirlenmiş, bu durum sığ derinliklerde kaya kütlesi dayanımını içsel sürtünme açısı tarafından denetlendiği anlaşılmıştır. Çatlaklı kaya kütlesi dayanımlarının tanımlanmasında kullanılan kesme mukavemeti parametrelerinin (içsel sürtünme açısı ve kohezyon) sabit birer değer olarak alınmasının doğru olmayacağı, bu büyüklüklerin çevre gerilmesinin fonksiyonu olarak değişeceği belirlenmiştir.

GSI değerinin yüksek olduğu ve arttığı durumlarda malzemenin daha sağlam yapıda olduğu, örselenmenin olmadığı veya çok az olduğu, GSI değerinin düşük olduğu ve düştüğü durumlarda ise malzemenin gevşek, kırık, çatlakların açıldığı ve daha düşük dayanıma sahip olduğu bilgisini vermektedir. Buna göre Jeolojik Dayanım İndisi 85

değerine sahip malzemenin neredeyse örselenmediği, çatlakların görülmediği veya çok az görüldüğü, kaya malzemesinin geniş aralıklı, birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca içsel sürtünme açısının bu değerlerde daha yüksek olduğu ve kohezyonunda orantılı olarak arttığını görmekteyiz. Jeolojik Dayanım İndisi 70 değerine sahip malzeme ise yer yer çatlakların görüldüğü, dört veya daha fazla süreksizlik setinin kesişmesiyle oluşmuş köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi olduğu, içsel sürtünme açısının bu değerlerde düşük ve aynı şekilde kohezyonun da düşük değerlere olduğunu görmekteyiz. Çevre basıncının etkisiyle beraber artma yönünde davranış göstermesi durumunda içsel sürtünme açısının azaldığı kohezyonun arttığı, çevre basıncının azaldığı durumda ise yani sığ derinlikte içsel sürtünme açısının bu deneyler sonucu arttığı, kohezyonun ise azaldığını söyleyebiliriz. Bu sonuçlardan hareketle sistem büyüklüğünün çevre basıncının artmasıyla makaslama parametrelerinde de farklı değerler gösterdiği, bunun etkisi ile de çevre basıncı artması sonucu tasarımların ona göre yapılması gerektiği sonucuna varabiliriz. Özellikle bu konular tünel projelerinde ve tünellerle ilgili yapılan çalışmalarda bize tünelin fay zonları, ayrılmış kaya kütlelerinde geçme durumu hakkında, kaya kütlesi tanımını yapma açısından önemli bilgiler vermektedir. Bilakis şev duraylılığı tasarımı, tünel tasarımı ve en önemli kısmı da oluşturan sistem büyüklüğü ile ilgili de çıkarımlar hakkında bilgiler vermektedir.

Malzemelerin ısı işlemin etkisiyle çatlak gelişiminin artması, buna bağlı porozite, su emme gibi fiziksel ve mekanik süreçlerin gelişimi GSI değerinin düşmesine, tersi durumunda ise GSI değerinin artması ile sonuçlanmaktadır. Malzemenin taneseli olarak farklılığı da dayanım konusunda önemli bir etkidir. İri taneye sahip malzemenin dayanımının düşük olduğu, ince taneli yapıya sahip malzemenin dayanımının daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ulusay, R. & Sönmez, H.** (2007). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2. Baskı, Ankara, 292s.
- [2] **ISRM** (1981). “Basic technical description of rock masses”, International Journal of Rock Mech. and Mining Sci. And Geomech. Abst. 18, 85-110.
- [3] **Hudson, J. A.** (1989). Rock Mechanics Principles in Rock Engineering Practice. Butterworths, 72 p.
- [4] **Yüzer, E. & Vardar M.** (1986). Kaya Mekaniği. İTÜ Yayın No:11, İTÜ Maden Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 107 s.
- [5] **Vardar, M.** (2005). Time dependent stability problems in tunnels and time-dependent behavior of the rock mass. ITA/AITES – Training Course Tunnel Engineering, İstanbul, 42 s.
- [6] **Hoek, E., & Brown, E. T.** (1980a). Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy. Stephen Austin and Sons, London, 527 p.
- [7] **Hoek, E., & Brown, E. T.** (1980b). Empirical strength criterion for rock masses. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106 (GT9), 1013-1035.
- [8] **Hoek, E.** (1995a). Strength of rock and rock masses. ISMR News Journal, 2 (2), 4-16.
- [9] **Erguvanlı, K.** (1994). “Mühendislik Jeolojisi”, Seç Yayın Dağıtım, 590s., İstanbul.
- [10] **Url-1**
http://yunus.hacettepe.edu.tr/~etuncay/Kaya_Mekanigi_Ders_Notu_Ergun_Tuncay.pdf, 17.06.2020 tarihinde erişilmiştir.
- [11] **Mohr O.** (1900). Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? Zeit des Ver Deut Ing 44:1524–1530.
- [12] **Coulomb CA.** (1776). Sur une application des regles maximis et minimis a quelques problems de statique, relatives a l’architecture. Acad Sci Paris Mem Math Phys 7:343–382.
- [13] **Bieniawski Z.T.** (1989). ”Engineering Rock Mass Classification”, Mc Graw Hill, 237 p.
- [14] **Hoek, E., Wood, D., & Shah, S.** (1992). A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. ISRM Symposium: Eurock '92-Rock Characterization, J. A. Hudson (ed.), Thomas Telford, pp. 209-213.
- [15] **Ünal, E. & Tutluoğlu, L.** (1986). Kaya Mekaniği İlkeleri, TKİ Genel Müdürlüğü, 86-03-05-01-010 kod nolu Proje, ODTÜ Maden Müh. Böl., Maden İşletme Anabilim Dalı, Ankara, 223 s.
- [16] **Griffith, A. A.** (1924). Theory of rupture. Proceedings of International Congress on Applied Mechanics, Delft, pp. 55-63.
- [17] **Griffith, A. A.** (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of Royal Society of London, Series A, 221, 163-98.

- [18] **McClintock, F. A., & Walsh, J.B.** (1962). Friction on Griffith cracks under pressure. Proceedings of the 4th National Congress on Applied Mechanics, pp. 1015-1021.
- [19] **Hoek, E.** (1983). Strength of jointed rock masses: 1983 Rankine Lecture. Geotechnique, 33 (3), 187-223.
- [20] **Hoek, E., & Brown, E. T.** (1988). The Hoek-Brown failure criterion: a 1988 update. Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium: Rock Engineering for Underground Excavations, J. C. Juran (ed.), University of Toronto, pp. 31-38.
- [21] **Bieniawski Z.T.** (1976). Rock mass classification in rock engineering. Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Cape Town, Balkema, pp. 97-106.
- [22] **Hoek, E.** (1990). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 27 (3), 227-29.
- [23] **Balmer, G.** (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. American Society of Testing Materials, 52, 1269-1271.
- [24] **Hoek, E., Kaiser, P.K., & Bawden, W. F.** (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema Rotterdam, 214 p.
- [25] **Hoek, E., & Brown, E. T.** (1997). Practical estimates of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34 (8), 1165-1186.
- [26] **Hoek, E.** (1998). Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35 (1), 63-8.
- [27] **Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., & Corkum, B.** (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273.
- [28] **Sönmez, H., & Ulusay, R.** (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36 (6), 743-60.
- [29] **Sönmez, H., & Ulusay, R.** (2002). A discussion on the Hoek – Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilimleri, 26, 77-9.
- [30] **Hoek, E & Diederichs, M.S.** (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203–215.
- [31] **Bozorgzadeh N, Escobar MD, Harrison JP.** (2018). Comprehensive statistical analysis of intact rock strength for reliability-based design. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2018;106:374e87.
- [32] **Contreras LF, Brown ET.** (2018). Bayesian inference of geotechnical parameters for slope reliability analysis. In: Slope stability 2018 e XIV

international congress on energy and mineral resources. Seville, Spain: Asociación Nacional de Ingenieros de Minas; 2018. p. 1998e2026.

- [33] **Hoek E, Brown ET.** (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [34] **ASTM (American Society for Testing and Materials).** (1994). Annual Book of ASTM Standards – Construction : Soil and Rock, ASTM Publication, V.04.08, 978 p.
- [35] **ISRM** (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 628 p.
- [36] **ASTM D2845–08** (2008). Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.
- [37] **Anon.** (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping Part I- Rock and soil materials Bull Int Ass Geo, 19, pp 364-371.
- [38] **Mahmutoglu Y.** (2006). The effects of strain rate and saturation on a micro-cracked marble. *Eng Geol* 82:137–144.
- [39] **EN 1925** (1999). Natural stone test methods – Determination of water absorption coefficient by capillarity.
- [40] **EN 1936** (1999). Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density and of total and open porosity.
- [41] **Url-2** < <https://www.mta.gov.tr> >, 15.10.2020 tarihinde sadece verilere erişilmiştir.
- [42] **Mahmutoglu Y.** (2017). Prediction of weathering by thermal degradation of a coarse-grained marble using ultrasonic pulse velocity, *Environmental Earth Sciences*, 76, 435, DOI 10.1007/s12665-017-6770-y.
- [43] **Weiss T, Rasolofosaon PNJ, Siegesmund S.** (2002). Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble. In: Siegesmund S, Weiss T, Vollbrecht A (eds) *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*, Geological Society of London special publications, p 149–164.
- [44] **Mahmutoglu Y.** (1998). Mechanical Behaviour of Cyclically Heated Fine Grained Rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31, 169-179.
- [45] **Scholz C. H.** (1968). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73, No. 4, 1417-1432.
- [46] **Jaeger, J. C. & Rosengken, K. J.** (1969). Friction and sliding of joints, *Proc. Aust. Inst. Min. Metall.* M0229, 93 104.
- [47] **Jaeger, J. C.** (1970). The behaviour of closely jointed rock, *Proc. 11th Symp. Rock Mech. Berkeley, California*, Chapter 4, 57-68.

- [48] **Handin J.** (1957). Experimental Deformation of Sedimentary Rocks Under Confining Pressure: Tests at Room Temperature on Dry Samples, *AAPG Bulletin*, Vol. 41, No. 1, 1-50.
- [49] **Handin J.** (1958). Experimental Deformation of Sedimentary Rocks Under Confining Pressure: Tests at High Temperature, *AAPG Bulletin*, Vol. 42, No. 12, 2892-2934.
- [50] **Griggs, D. T., & Handin, J.** (1960). Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes, in D. T. Griggs and John Handin (eds.), *Rock Deformation*. Geol. Soc. America Mem. 79, 349.
- [51] **Raleigh C. B., & Paterson M. S.** (1965). Experimental Deformation of Serpentine and Its Tectonic Implications, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, No. 16, 3965-3985.
- [52] **Heuze F. E.** (1983). High-temperature mechanical, physical and Thermal properties of granitic rocks-A review, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 20, No. 1, 3-10.
- [53] **Robinson RH.** (1959). The effect of pore and confining pressure on the failure process in sedimentary rocks. *Colorado Sch Mines Q* 54:177–199.
- [54] **Handin, J.** (1966). Strength and ductility, in *Handbook of Physical Constants*, 2nd Boulder, Colo.: Geological Society America (Mem. 97).
- [55] **Byerlee J. D.** (1967). Frictional Characteristics of Granite under High Confining Pressure, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 14, 3639-3648.
- [56] **Lane, K. S.** (1969). "Engineering Problems Due to Fluid Pressure in Rock," *Hth Symposium of Rock Mechanics*, pp. 501-537.
- [57] **Byerlee J. D., & Zoback M. D.** (1975). The Effect of Microcrack Dilatancy on the Permeability of Westerly Granite, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. 5, 752-755.
- [58] **Jaeger C., & Cook, N. G. W.** (1976). *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman Hall, London.
- [59] **Rüsch, H.** (1960). "Researches toward a general flexural theory for structural concrete." *J. Am. Concr. Inst.*, 57(1), 1–28.
- [60] **Vardar, M.** (1977). Zeiteinfluß auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln. – Dissertation Thesis, Universität Karlsruhe, 117 pp.; Karlsruhe.
- [61] **Lajtai, E.Z., Bielus, L.P.** (1986). Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet Granite in tension and compression. *Rock Mech. Rock Eng.* 19, 71–87.
- [62] **Lajtai, E.Z., Duncan, E.J.S. & Carter, B.J.** (1991). The effect of strain rate on rock strength. *Rock Mech Rock Engng* 24, 99–109.
- [63] **Chong K. P., Hoyt P. M., Smith J. W. & Paulsen B. Y.** (1980). Effects of strain rate on oil shale fracturing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Abstr.*, 17, 35-43.

- [64] **Peterson, R.** (1958). Rebound in Bearpaw Shale, Western Canada, *Bull. Geol. Soc. America*, 69, 1113-1124.
- [65] **Mahmutoğlu Y.** (2009). Jeomekanik Ders Notları.
- [66] **Attard M. M., & Foster S. J.** (2001). Strength and ductility of fiber-reinforced high-strength concrete columns. *American Society of Civil Engineers*, Vol. 127, No. 1, 28-34.
- [67] **J. L. Hewett, F. J. Petriello & T. G. Rizzo.** (2001). "Signals for non-commutative interactions at linear colliders," *Phys. Rev. D* 64, 075012. See also hep-ph/0112003.
- [68] **Kovári K, Tisa A, Attinger O.** (1983a). The concept of "continuous failure state" triaxial tests. *Rock Mech.* 16 (2):117–131.
- [69] **Mahmutoğlu, Y., & Şans, G.** (2020). "Comparison of post-failure strength of micro-cracked marble with Hoek-Brown failure criterion". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 26: 1365-1372.
- [70] **Kovári K, Tisa A, Einstein HH, Franklin, JA.** (1983b). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *Int. Soc. for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 20 (6):283–290.



EKLER

EK A: GSI 70 değerlerine göre m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , $\emptyset$, σ_3 , σ_1 parametrelerinin belirlenmesi.

EK B: GSI 75 değerlerine göre m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , $\emptyset$, σ_3 , σ_1 parametrelerinin belirlenmesi.

EK C: GSI 80 değerlerine göre m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , $\emptyset$, σ_3 , σ_1 parametrelerinin belirlenmesi.

EK D: GSI 85 değerlerine göre m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , $\emptyset$, σ_3 , σ_1 parametrelerinin belirlenmesi.

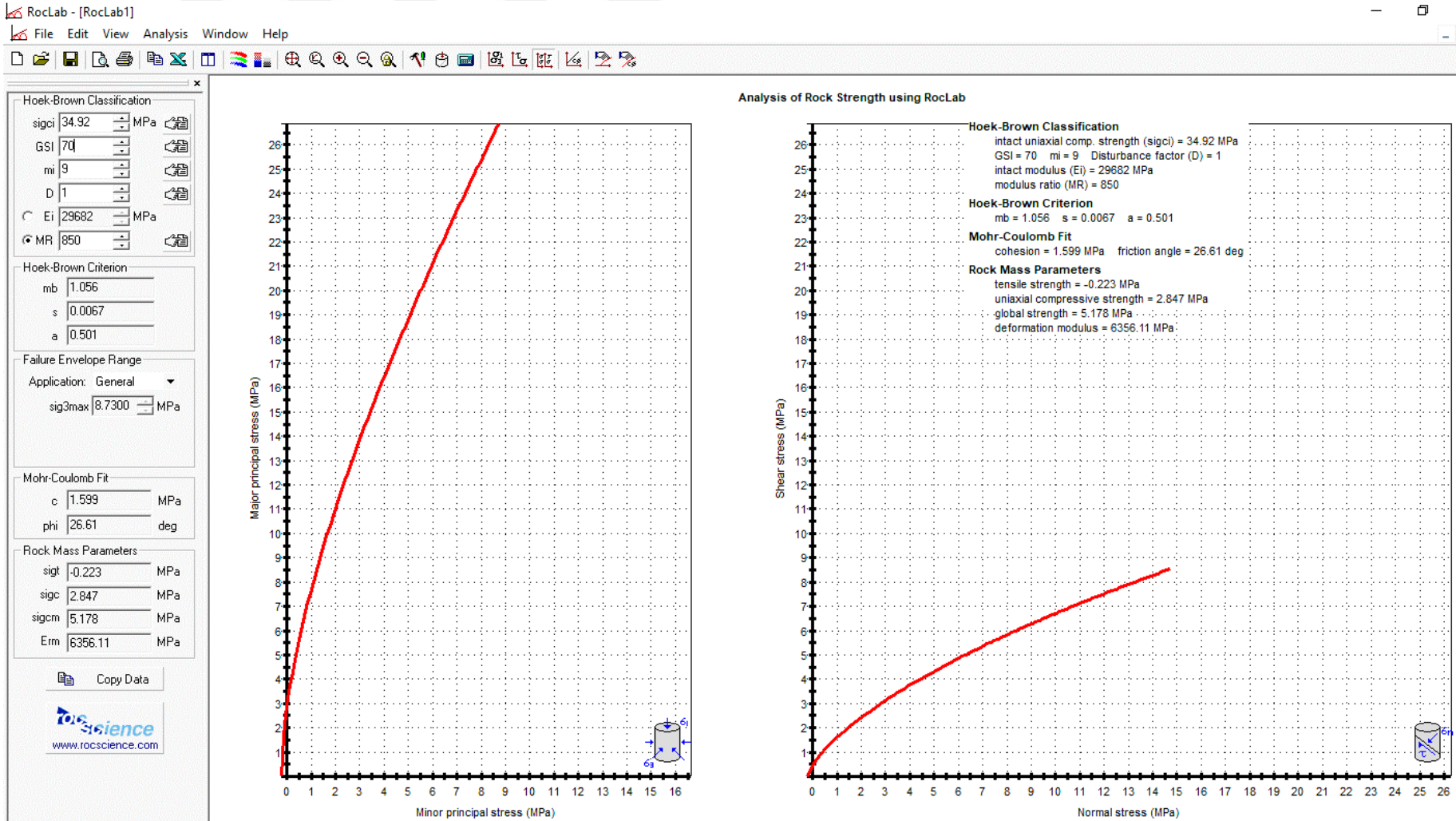
EK E: Üç eksenli deney veri sonuçları (σ_3 – Çevre Basıncı, σ_1 - Eksenel Gerilme) (MPa).



EK A

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS							
Rock Type:	General	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR			
GSI Selection:	70	OK							
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →								
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	50	40	30	20	10
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70	60	50	40	30	20	10		
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets									
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity									
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces									
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes									

Şekil A.1 : [28] GSI abağından GSI değeri 70 olarak alındığı durum.



Şekil A.2 : B1 grubu örneğinin (GSI 70 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.

Çizelge A.1 : A1 ve A2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	9.82
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	13.76
1	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	17.00
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	19.84
2	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	22.42
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	24.82
3	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	27.07
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	29.20
4	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	31.24
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	33.20
5	9	1	0.508	0.036	3.087	53.15	2.433	26.61	35.09

Çizelge A.2 : B1 ve B2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	6.45
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	10.19
1	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	13.11
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	15.64
2	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	17.91
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	20.01
3	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	21.98
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	23.85
4	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	25.63
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	27.35
5	9	1	0.508	0.036	3.087	34.92	1.599	26.61	29.00

Çizelge A.3 : C1 ve C2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	5.71
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	9.39
1	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	12.22
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	14.65
2	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	16.84
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	18.86
3	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	20.76
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	22.55
4	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	24.27
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	25.92
5	9	1	0.508	0.036	3.087	30.93	1.416	26.61	27.51

Çizelge A.4 : D1 ve D2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	4.01
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	7.47
1	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	10.03
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	12.21
2	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	14.17
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	15.97
3	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	17.66
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	19.27
4	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	20.80
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	22.28
5	9	1	0.508	0.036	3.087	21.68	0.993	26.61	23.71

Çizelge A.5 : E1 ve E2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	5.31
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	8.95
1	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	11.72
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	14.10
2	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	16.24
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	18.21
3	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	20.06
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	21.82
4	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	23.50
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	25.11
5	9	1	0.508	0.036	3.087	28.75	1.316	26.61	26.66

Çizelge A.6 : F1 ve F2 grubu örneklerin GSI 70 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	6.02
0.5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	9.72
1	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	12.59
1.5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	15.06
2	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	17.28
2.5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	19.34
3	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	21.26
3.5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	23.09
4	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	24.83
4.5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	26.51
5	9	1	0.508	0.036	3.087	32.56	1.491	26.61	28.13

EK B

Pick GSI Value
×

Rock Type: General ▼

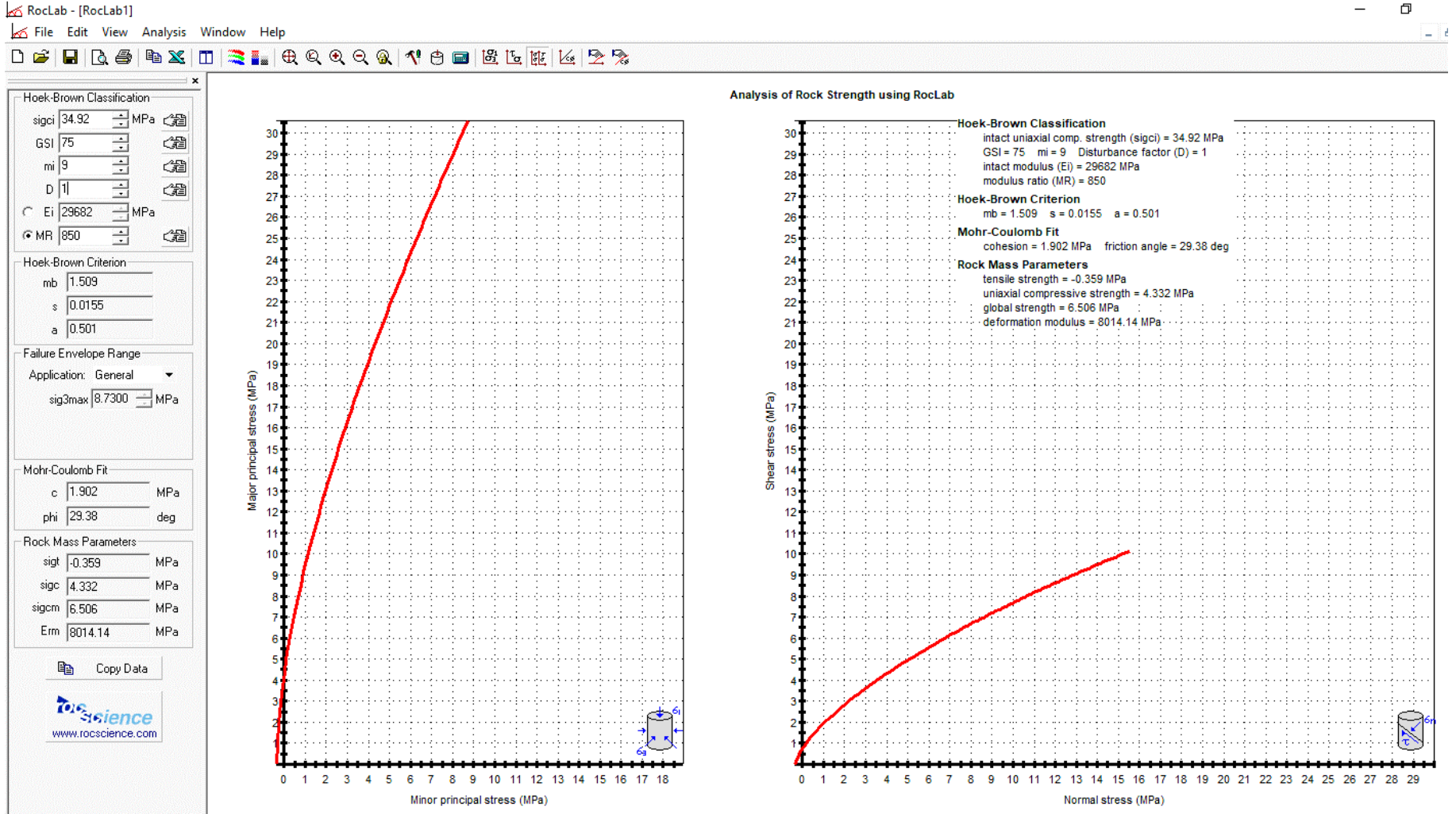
GSI Selection: 75 OK

SURFACE CONDITIONS

VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
-----------	------	------	------	-----------

STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →				
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	50
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	75	60	50	40	30
VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	60	50	40	30	20
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	50	40	30	20	10
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	40	30	20	10	N/A
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	30	20	10	N/A	N/A

Şekil B.1 : [28] GSI abağından GSI değeri 75 olarak alındığı durum.



Şekil B.2 : B1 grubu örneğinin (GSI 75 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.

Çizelge B.1 : A1 ve A2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	12.84
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	16.67
1	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	19.94
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	22.85
2	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	25.52
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	28.02
3	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	30.37
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	32.60
4	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	34.74
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	36.80
5	9	1	0.505	0.06	3.696	53.15	2.894	29.38	38.78

Çizelge B.2 : B1 ve B2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	6.02
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	9.72
1	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	12.59
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	15.06
2	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	17.28
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	19.34
3	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	21.26
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	23.09
4	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	24.83
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	26.51
5	9	1	0.505	0.06	3.696	34.92	1.902	29.38	28.13

Çizelge B.3 : C1 ve C2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	7.47
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	11.09
1	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	13.99
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	16.52
2	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	18.81
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	20.93
3	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	22.92
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	24.81
4	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	26.62
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	28.35
5	9	1	0.505	0.06	3.696	30.93	1.684	29.38	30.03

Çizelge B.4 : D1 ve D2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	5.24
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	8.68
1	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	11.33
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	13.61
2	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	15.67
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	17.56
3	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	19.34
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	21.03
4	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	22.65
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	24.20
5	9	1	0.505	0.06	3.696	21.68	1.181	29.38	25.70

Çizelge B.5 : E1 ve E2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	6.94
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	10.53
1	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	13.38
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	15.86
2	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	18.10
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	20.17
3	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	22.12
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	23.96
4	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	25.73
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	27.42
5	9	1	0.505	0.06	3.696	28.75	1.566	29.38	29.06

Çizelge B.6 : F1 ve F2 grubu örneklerin GSI 75 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

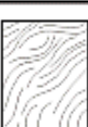
Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	7.86
0.5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	11.51
1	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	14.44
1.5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	17.01
2	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	19.34
2.5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	21.49
3	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	23.51
3.5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	25.43
4	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	27.27
4.5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	29.03
5	9	1	0.505	0.06	3.696	32.56	1.773	29.38	30.73

EK C

Pick GSI Value

Rock Type: General

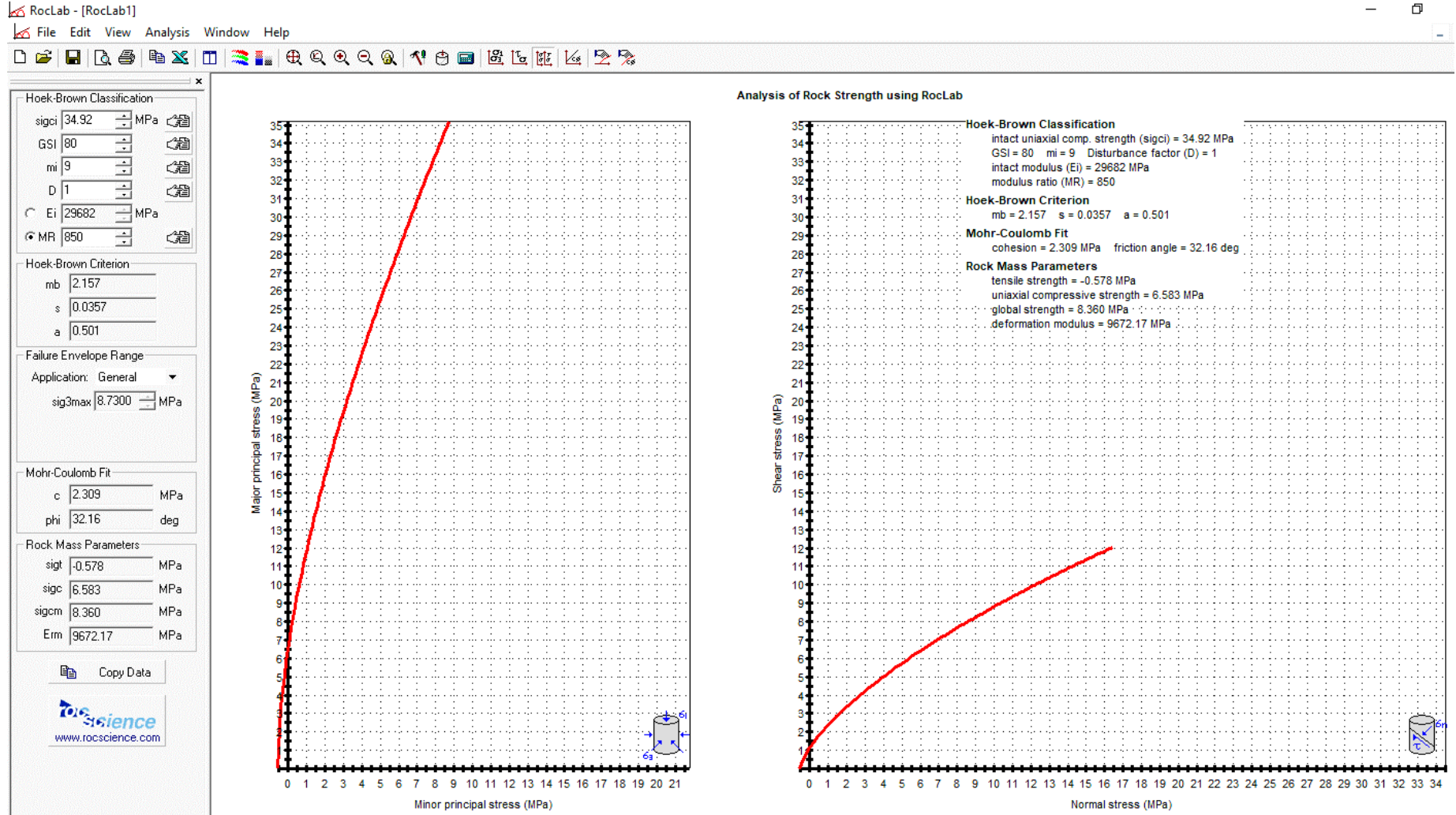
GSI Selection: 80 OK

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES

↓

Şekil C.1 : [28] GSI abağından GSI değeri 80 olarak alındığı durum.



Şekil C.2 : B1 grubu örneğinin (GSI 80 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.

Çizelge C.1 : A1 ve A2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	17.43
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	21.01
1	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	24.19
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	27.09
2	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	29.79
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	32.33
3	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	34.73
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	37.04
4	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	39.25
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	41.38
5	9	1	0.503	0.109	4.424	53.15	3.515	32.16	43.44

Çizelge C.2 : B1 ve B2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	11.45
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	14.92
1	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	17.88
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	20.53
2	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	22.96
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	25.23
3	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	27.37
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	29.41
4	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	31.36
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	33.24
5	9	1	0.503	0.109	4.424	34.92	2.309	32.16	35.06

Çizelge C.3 : C1 ve C2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	10.14
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	13.57
1	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	16.46
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	19.03
2	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	21.39
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	23.58
3	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	25.65
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	27.61
4	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	29.50
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	31.31
5	9	1	0.503	0.109	4.424	30.93	2.045	32.16	33.06

Çizelge C.4 : D1 ve D2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	7.11
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	10.41
1	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	13.09
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	15.43
2	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	17.56
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	19.53
3	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	21.39
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	23.16
4	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	24.85
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	26.48
5	9	1	0.503	0.109	4.424	21.68	1.434	32.16	28.05

Çizelge C.5 : E1 ve E2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , $\emptyset$, σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	$\emptyset$	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	9.43
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	12.83
1	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	15.68
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	18.21
2	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	20.51
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	22.66
3	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	24.68
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	26.61
4	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	28.45
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	30.22
5	9	1	0.503	0.109	4.424	28.75	1.901	32.16	31.93

Çizelge C.6 : F1 ve F2 grubu örneklerin GSI 80 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	10.68
0.5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	14.12
1	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	17.04
1.5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	19.65
2	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	22.03
2.5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	24.26
3	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	26.36
3.5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	28.35
4	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	30.27
4.5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	32.11
5	9	1	0.503	0.109	4.424	32.56	2.157	32.16	33.89

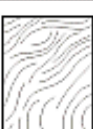
EK D

Pick GSI Value

Rock Type: General

GSI Selection: 85

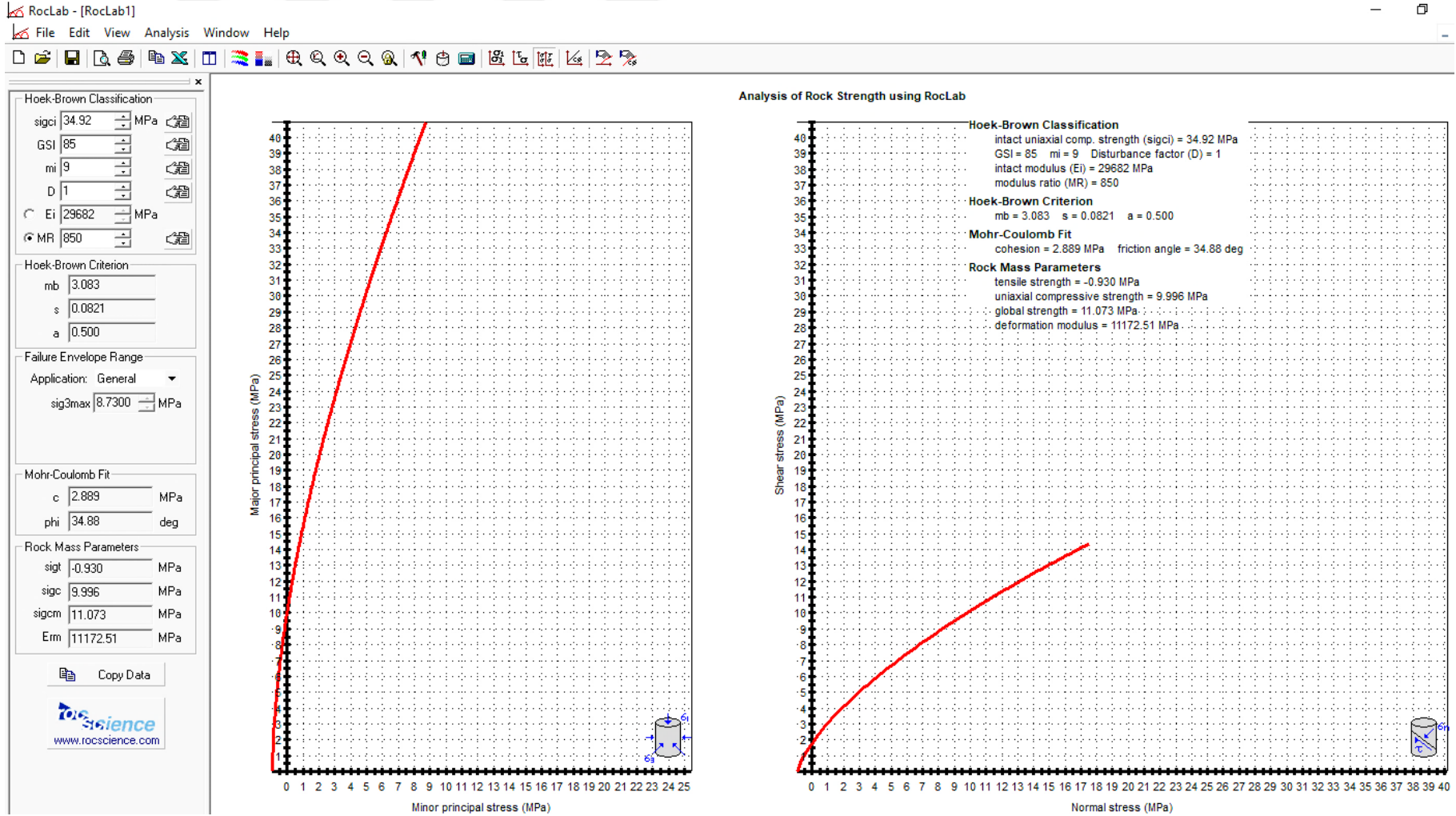
OK

		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90 85 80			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70 60			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES

↓

Şekil D.1 : [28] GSI abağından GSI değeri 85 olarak alındığı durum.



Şekil D.2 : B1 grubu örneğinin (GSI 85 değerindeki) RocLab 1 programı ile c ve ϕ parametrelerinin tayini.

Çizelge D.1 : A1 ve A2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	22.97
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	26.33
1	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	29.41
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	32.28
2	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	34.97
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	37.53
3	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	39.98
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	42.33
4	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	44.60
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	46.79
5	9	1	0.502	0.188	5.271	53.15	4.398	34.88	48.92

Çizelge D.2 : B1 ve B2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	15.09
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	18.38
1	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	21.29
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	23.94
2	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	26.41
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	28.73
3	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	30.93
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	33.03
4	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	35.06
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	37.01
5	9	1	0.502	0.188	5.271	34.92	2.889	34.88	38.90

Çizelge D.3 : C1 ve C2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	13.37
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	16.63
1	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	19.48
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	22.07
2	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	24.46
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	26.71
3	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	28.85
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	30.88
4	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	32.84
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	34.72
5	9	1	0.502	0.188	5.271	30.93	2.559	34.88	36.55

Çizelge D.4 : D1 ve D2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	9.37
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	12.53
1	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	15.21
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	17.60
2	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	19.79
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	21.83
3	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	23.76
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	25.60
4	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	27.36
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	29.06
5	9	1	0.502	0.188	5.271	21.68	1.794	34.88	30.70

Çizelge D.5 : E1 ve E2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	12.42
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	15.67
1	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	18.48
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	21.03
2	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	23.39
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	25.59
3	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	27.68
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	29.68
4	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	31.59
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	33.44
5	9	1	0.502	0.188	5.271	28.75	2.379	34.88	35.22

Çizelge D.6 : F1 ve F2 grubu örneklerin GSI 85 değerlerine göre elde edilen m_i , D , a , s , m_b , σ_{ci} , c , ϕ , σ_1 , σ_3 parametrelerinin değerleri.

Çevre Basıncı (σ_3)	m_i	D	a	s	m_b	σ_{ci} (MPa)	c	ϕ	Eksenel Gerilme (σ_1)
0	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	14.07
0.5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	17.34
1	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	20.22
1.5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	22.84
2	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	25.26
2.5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	27.54
3	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	29.70
3.5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	31.77
4	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	33.75
4.5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	35.67
5	9	1	0.502	0.188	5.271	32.56	2.694	34.88	37.52

EK E

Çizelge E.1 : Yenilme öncesi (pre-failure) (peak) örneklerin üç eksenli deney veri sonuçları.

Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Eksenel Gerilme (σ_1) (MPa)											
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
0.5	47.12	45.12	44.45	41.11	41.04	38.65	37.22	35.46	33.23	31.49	30.87	29.75
1.0	50.78	47.87	46.72	43.79	44.55	40.46	41.46	37.89	36.63	34.44	33.43	31.25
1.5	52.01	49.99	48.26	46.37	46.77	43.24	42.74	40.09	39.83	36.27	37.87	34.74
2.0	53.87	52.03	50.59	48.55	49.01	45.89	44.28	42.75	42.72	38.56	40.58	37.10
2.5	55.41	53.87	52.34	51.07	51.87	47.36	48.10	45.63	45.20	41.10	43.78	40.24
3.0	57.36	55.73	54.94	53.36	53.00	49.73	50.72	47.28	49.65	44.35	46.24	42.69
3.5	59.98	58.32	56.36	55.93	54.99	52.10	52.79	49.63	51.30	46.70	48.63	44.36
4.0	62.13	60.56	59.18	58.63	57.11	54.78	54.16	52.14	52.73	47.98	51.23	46.97
4.5	64.98	63.45	62.29	60.71	60.96	57.43	57.63	54.63	55.11	51.02	53.78	49.08
5	67.00	67.96	65.12	63.56	63.53	60.12	60.96	57.63	58.88	53.44	55.01	51.91

Çizelge E.2 : Yenilme sonrası (post-failure) (residual) örneklerin üç eksenli deney veri sonuçları.

Çevre Basıncı (σ_3) (MPa)	Eksenel Gerilme (σ_1) (MPa)											
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
5	65.78	66.25	62.87	62.63	61.10	58.49	58.00	54.02	56.23	48.60	52.98	47.44
4.5	61.34	61.64	58.56	57.41	56.01	54.76	54.86	48.32	52.36	44.88	50.10	42.41
4.0	57.67	57.88	54.56	53.08	52.82	43.23	51.77	44.49	48.99	40.74	46.87	38.99
3.5	53.75	53.53	51.37	49.72	49.36	46.88	47.13	42.87	46.22	36.69	43.58	35.03
3.0	49.67	48.77	47.90	46.85	45.98	43.04	43.08	37.00	42.44	33.08	40.54	32.10
2.5	44.47	44.19	42.83	43.03	40.36	39.51	39.67	33.59	38.96	30.74	37.41	28.79
2.0	39.67	40.36	38.00	38.77	36.44	36.12	34.79	30.89	33.49	27.11	32.98	24.62
1.5	34.67	35.89	32.89	32.05	30.93	29.63	29.33	25.41	27.75	20.69	26.25	18.66
1.0	28.69	28.48	27.46	25.67	26.11	23.88	24.96	18.02	24.14	15.78	21.86	14.30
0.5	24.56	22.06	23.58	20.23	21.49	17.49	19.08	13.69	16.66	12.27	13.86	10.23
0	19.25	15.33	17.05	13.78	15.78	12.41	13.55	9.87	10.49	7.88	6.58	7.03



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hasan Mert ÖZKARSLI
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.02.1995 / ANKARA
E-posta : mertozkarsli35@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü (ortalama bölüm birincisi)
- **Lisans** : 2019, Anadolu Üniversitesi, İktisat Fakültesi, İktisat Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünü 2018 yılında ortalama bölüm birincisi olarak bitirdi.
- Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünden şeref öğrencisi olarak mezun olmuştur.
- İTÜ Rover Takımı '21 Bilim ekip üyesidir (Jeoloji alanı). International Mars Hackathon '20 uluslararası 24 ülkeden katılan üniversiteler arasında İTÜ adına ikinci olmuştur.