

**T.C.**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİYLE KAYAÇLARIN KIRILGANLIK  
İNDEKSLERİNDE MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ**



**DOKTORA TEZİ**  
**Engin ÖZDEMİR**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Didem EREN SARICI**

**NİSAN 2020**

**T.C.**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİYLE KAYAÇLARIN KIRILGANLIK  
İNDEKSLERİNDE MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ**



**DOKTORA TEZİ**  
**Engin ÖZDEMİR**  
**(3614160411)**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Didem EREN SARICI**

**NİSAN 2020**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİYLE KAYAÇLARIN KIRILGANLIK**  
**İNDEKSLERİNDE MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ**

**DANIŞMAN**  
**DOÇ. DR. DİDEM EREN SARICI**

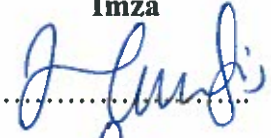


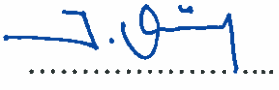

**HAZIRLAYAN**  
**ENGİN ÖZDEMİR**

Jürimiz tarafından 03/04/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda bu tez oybirliği ile başarılı bulunarak **Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul etmiştir.

**Jüri Üyelerinin Unvanı Adı Soyadı**

1. Prof. Dr. Hikmet SİS
2. Doç. Dr. Didem EREN SARICI
3. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
4. Dr. Öğr. Üyesi Yavuz GÜL
5. Dr. Öğr. Üyesi Aydan AKSOĞAN KORKMAZ

**İmza**

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

**O N A Y**

Bu tez, İnönü Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20... tarih ve 20.../..... sayılı Kararıyla da uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Kâzım TÜRK  
Enstitüsü Müdürü

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının konusunu öneren ve çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Didem EREN SARICI'ya;

TİK komitesi üyelerim Emekli Prof. Dr. Mehmet ÖNAL, Prof. Dr. Hikmet SİS, Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e Doktora tez jüri üyelerim; Dr. Öğr. Üyesi Yavuz GÜL ve Dr. Öğr. Üyesi Aydan AKSOĞAN KORKMAZ'a

Çalışmayı 2017/FDK-879 nolu proje ile maddi açıdan destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne;

Deneysel çalışmalarda kullanılmak amacıyla numune sağlayan Netmer A.Ş'ye; deney malzemelerinin laboratuvar ortamına taşınmasında yardımlarını esirgemeyen Şükrü UÇGUN, Muhammed KABAKÇI, Joud SABAHİ ve Murat KÜKEY'e;

Ayrıca, bugüne kadar olduğu gibi, doktora eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Betül ÖZDEMİR, oğlum Altay Ural ÖZDEMİR ve babam Sabri ÖZDEMİR'e

Teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dileğiyle...



## ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Çevresel Faktörlerin Etkisiyle Kayaçların Kırılma İndekslerinde Meydana Gelen Değişimlerin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Engin ÖZDEMİR





*Eşim ve Oğlum'a...*

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	iii
ONUR SÖZÜ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
ÖZET .....	xvii
ABSTRACT .....	xvii
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Çalışmanın Kapsamı .....	4
1.3. Çalışmanın Özgünlüğü .....	5
1.4. Çalışmanın Akım Şeması.....	6
1.5. Literatür Taraması.....	7
1.5.1. Çevresel koşulların kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ile ilgili çalışmalar .....	7
1.5.2. Kırılma tokluğu ile ilgili çalışmalar .....	11
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>20</b>
2.1. Kayaçların Mühendislik Özellikleri.....	21
2.1.1. Kayaçların jeolojik özellikleri .....	21
2.1. 2. Kayaçların fiziksel özellikleri.....	22
2.1.2.1. Özgül ağırlık.....	22
2.1.2.2. Yoğunluk.....	22
2.1.2.3. Birim hacim ağırlığı .....	22
2.1.2.4. Ağırlıkça ve hacimce su emme .....	23
2.1.2.5. Kılcal su emme (kapilerite).....	24
2.1.2.6. Porozite .....	24
2.1.2.7. Sertlik tayini .....	25
2.1.3. Kayaçların mekanik özellikleri.....	30
2.1.3.1. Tek eksenli basınç dayanımı .....	31

2.1.3.2. Nokta yükleme dayanımı .....	33
2.1.3.3. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı .....	36
2.1.3.4. Ultrasonik dalga hızı .....	38
2.1.3.5. Yarı dairesel eğilme (SCB) dayanımı .....	40
2.1.4. Kayaçların kimyasal, mineralojik ve petrografik özellikleri .....	42
2.1.4.1. X-ışını kırınım yöntemi (XRD).....	43
2.1.4.2. X-ışınları floresans spektrometresi (XRF) .....	44
2.1.4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	45
2.1.4.4. İnce kesit analizi.....	46
2.2. Kırılma Mekaniği Temelleri .....	47
2.2.1. Kırılma.....	47
2.2.1.1 Makroskobik açıdan kırılma şekilleri.....	49
2.2.1. 2. Mikroskobik açıdan kırılma şekilleri .....	50
2.2.1.3. Kırılma Tipleri .....	51
2.2.2. Kırılma mekaniği.....	52
2.2.2.1. Griffith teorisi.....	52
2.2.2.2. Irwin teorisi .....	54
2.2.2.3. Kırılma yük modelleri .....	57
2.2.2.4. Kırılma ucu zonu (fracture process zone (FPZ)).....	58
2.2.3. Kırılma tokluğu .....	60
2.2.4. Kırılma enerjisi .....	64
2.3. İstatistiksel Temeller .....	65
2.3.1. Yapay sinir ağları .....	65
2.3.1.1. Biyolojik sinir ağı.....	66
2.3.1.2. Yapay sinir ağı .....	67
2.3.1.3. YSA'nın avantajları .....	72
2.3.1.4. YSA dezavantajları .....	73
2.3.2. Regresyon analizi .....	74
2.3.3. Tahmin doğruluğu .....	75
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>78</b>
3.1. Örnek Derleme.....	78
3.2. Deneysel Çalışmalar .....	80

3.2.1. Örnek hazırlama .....	80
3.2.2. Çevresel ortam hazırlama .....	83
3.2.3. Kayaçların fiziksel özelliklerini belirleyen deneyler.....	84
3.2.3.1. Birim hacim ağırlığı deneyi .....	84
3.2.3.2. Su emme deneyi .....	86
3.2.3.3. Porozite tayini .....	87
3.2.3.4. Özgül ağırlık tayini .....	88
3.2.3.5. Doluluk oranı tayini .....	89
3.2.3.6. Kılcal su emme (kapilerite) tayini.....	90
3.2.3.7. Schmidt çekiçi sertlik indeks tayini .....	91
3.2.4. Kayaçların mekanik özelliklerini belirleyen deneyler.....	92
3.2.4.1. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi .....	92
3.2.4.2. Nokta yükleme dayanımı deneyi.....	94
3.2.4.3. Sonik hız deneyi.....	97
3.2.4.4. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı deneyi .....	99
3.2.4.5. Yarı dairesel eğilme deneyi.....	101
3.2.5. Kayaçların kimyasal ve mineralojik özelliklerini belirleyen deneyler.....	104
3.2.6. İstatistiksel yöntemler.....	107
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>108</b>
4.1. Deneysel Çalışmaların Sonuçları.....	108
4.1.1. Çalışılan kayaçların fiziksel özellikleri .....	108
4.1.1.1 Birim hacim ağırlığı .....	108
4.1.1.2. Su emme deneyi sonuçları .....	109
4.1.1.3. Özgül ağırlık deneyi sonuçları .....	111
4.1.1.4. Doluluk oranı deneyi sonuçları .....	111
4.1.1.5. Kapilarite değerleri deneyi sonuçları .....	111
4.1.1.6. Porozite .....	113
4.1.1.7. Sertlik .....	113
4.1.2. Çalışılan kayaçların mineralojik özellikleri.....	116
4.1.2.1. XRD analiz sonuçları .....	116
4.1.2.2. XRF analiz sonuçları.....	118
4.1.2.3. İnce kesit analizi sonuçları .....	119
4.1.3. Çalışılan kayaçların mekanik özellikleri .....	121

4.1.3.1. Tek eksenli basınç dayanımı ve makaslama parametre değerleri .....	121
4.1.3.2. Nokta yükleme dayanımı değeri .....	129
4.1.3.3. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı değeri .....	138
4.1.3.4. Ultrasonik dalga hızı değeri .....	147
4.1.3.5. Yarı dairesel eğme (SCB) dayanımı değeri .....	154
4.1.3.6. SEM analizi sonuçları .....	171
4.1.4. İstatistiksel sonuçlar .....	176
4.1.4.1. Basit regresyon sonuçları .....	176
4.1.4.2. Çoklu regresyon sonuçları .....	180
4.1.4.3. Yapay sinir ağları sonuçları .....	182
4.1.4.4. Modellerin tahmin performansları .....	190
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>191</b>
5.1. Sonuçlar .....	192
5.2. Öneriler .....	197
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>199</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>214</b>
EK 1. SCB deney numunelerinin yük-deformasyon grafikleri .....	214
EK 2. İstatistiksel çalışmalarda kullanılan veriler .....	233
EK 3. Çoklu regresyon analiz çıktıları .....	236
EK 4. Yapay sinir ağları çıktıları.....	236
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>244</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Kayaçların porozite değerlerine göre sınıflandırılması.....	25
Çizelge 2.2.	Schmidt çekici sertliği ölçümü yöntemleri.....	29
Çizelge 2.3.	ISRM 1978'e göre kayaçların Schmidt çekici sertlik sınıflaması..	30
Çizelge 2.4.	Deere ve Miller 1966'a göre kayaçların tek eksenli basınç dayanımı sınıflaması.....	33
Çizelge 2.5.	ISRM 1978'e göre kayaçların tek eksenli basınç dayanımı sınıflaması.....	33
Çizelge 2.6.	Bieniawski 1975'e göre kayaçların nokta yükü dayanım indekslerine göre sınıflaması.....	36
Çizelge 2.7.	FPZ'nin gelişimi.....	59
Çizelge 2.8.	YSA'nın kullanmış olduğu toplama fonksiyonları.....	69
Çizelge 2.9.	YSA için en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonları .....	70
Çizelge 2.10.	İstatistiksel hata belirleme yöntemleri.....	76
Çizelge 3.1.	Çevresel ortamların kodları ve oluşturulması.....	84
Çizelge 4.1.	Kullanılan kayaçların kodu, ticari isimleri ve kökenleri.....	108
Çizelge 4.2.	YB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri.....	108
Çizelge 4.3.	MB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri.....	109
Çizelge 4.4.	AB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri.....	109
Çizelge 4.5.	YB örneğinin su emme değerleri.....	110
Çizelge 4.6.	MB örneğinin su emme değerleri.....	110
Çizelge 4.7.	AB örneğinin su emme değerleri.....	110
Çizelge 4.8.	Çalışılan kayaçların özgül ağırlık değerleri.....	111
Çizelge 4.9.	Çalışılan kayaçların doluluk oranı değerleri.....	111
Çizelge 4.10.	Çalışılan kayaçların kapiler su emme değerleri.....	112
Çizelge 4.11.	Çalışılan kayaçların görünür porozite değerleri.....	113
Çizelge 4.12.	YB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri.....	114
Çizelge 4.13.	MB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri.....	114
Çizelge 4.14.	AB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri.....	114
Çizelge 4.15.	Çalışılan kayaçların XRF analiz sonuçları.....	118
Çizelge 4.16.	Kayaçların kuru halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri.....	122
Çizelge 4.17.	Kayaçların doymuş halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri...	123
Çizelge 4.18.	Kayaçların donmuş halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri...	124
Çizelge 4.19.	Kayaçların termal şok uygulaması sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerleri.....	125
Çizelge 4.20.	Kayaçların termal yaşlandırma uygulaması sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerleri.....	126
Çizelge 4.21.	Kayaçların makaslama parametre değerleri .....	128
Çizelge 4.22.	YB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri.....	129
Çizelge 4.23.	MB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri.....	130
Çizelge 4.24.	AB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri.....	130
Çizelge 4.25.	YB örneğinin doymuş halde nokta yükleme değerleri.....	131
Çizelge 4.26.	MB örneğinin doymuş halde nokta yükleme değerleri.....	131

Çizelge 4.27.	AB örneğinin doymuş halde nokta yükleme değerleri.....	132
Çizelge 4.28.	YB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri.....	132
Çizelge 4.29.	MB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri.....	133
Çizelge 4.30.	AB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri.....	133
Çizelge 4.31.	YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	134
Çizelge 4.32.	MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	134
Çizelge 4.33.	AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	135
Çizelge 4.34.	YB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	135
Çizelge 4.35.	MB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	136
Çizelge 4.36.	AB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri.....	136
Çizelge 4.37.	YB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri.....	138
Çizelge 4.38.	MB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri.....	139
Çizelge 4.39.	AB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri.....	139
Çizelge 4.40.	YB örneğinin doymuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	140
Çizelge 4.41.	MB örneğinin doymuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	140
Çizelge 4.42.	AB örneğinin doymuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	141
Çizelge 4.43.	YB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	141
Çizelge 4.44.	MB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	142
Çizelge 4.45.	AB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri.....	142
Çizelge 4.46.	YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	143
Çizelge 4.47.	MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	143
Çizelge 4.48.	AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	144
Çizelge 4.49.	YB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	144
Çizelge 4.50.	MB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	145
Çizelge 4.51.	AB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri.....	145
Çizelge 4.52.	Kayaçların kuru halde ultrasonik dalga hızı değerleri.....	148
Çizelge 4.53.	Kayaçların doymuş halde ultrasonik dalga hızı değerleri.....	149
Çizelge 4.54.	Kayaçların donmuş halde ultrasonik dalga hızı değerleri.....	150
Çizelge 4.55.	Kayaçların termal şok uygulaması sonrası ultrasonik dalga hızı değerleri.....	151
Çizelge 4.56.	Kayaçların termal yaşlandırma uygulaması sonrası ultrasonik	



	dalga hızı değerleri.....	152
Çizelge 4.57.	YB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	155
Çizelge 4.58.	YB örneğinin doymunhalde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	155
Çizelge 4.59.	YB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	156
Çizelge 4.60.	YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	156
Çizelge 4.61.	YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	157
Çizelge 4.62.	MB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	159
Çizelge 4.63.	MB örneğinin doymunhalde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	159
Çizelge 4.64.	MB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	160
Çizelge 4.65.	MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	160
Çizelge 4.66.	MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	161
Çizelge 4.67.	AB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	163
Çizelge 4.68.	AB örneğinin doymunhalde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	164
Çizelge 4.69.	AB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	164
Çizelge 4.70.	AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	165
Çizelge 4.71.	AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş.....	165
Çizelge 4.72.	ANOVA ve model özeti	181
Çizelge 4.73.	Farklı çevresel ortamlar için üretilmiş çoklu regresyon modelleri.	181
Çizelge 4.74.	R <sup>2</sup> iyileştirme yüzdeleri.....	182
Çizelge 4.75.	1 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	183
Çizelge 4.76.	2 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	184
Çizelge 4.77.	3 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	185
Çizelge 4.78.	4 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	185
Çizelge 4.79.	5 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	186
Çizelge 4.80.	6 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	187
Çizelge 4.81.	7 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	187
Çizelge 4.82.	8 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	188
Çizelge 4.83.	9 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	189
Çizelge 4.84.	10 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları.....	189
Çizelge 4.85.	Modellerin performans sonuçları.....	190

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çalışmanın akım şeması.....	6
Şekil 2.1.	Boşluk türlerinin şematik görünümü.....	23
Şekil 2.2.	Schmidt çekicinin kısımları ve çalışma prensibi.....	27
Şekil 2.3.	Schmidt çekici sertlik değeri ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	28
Şekil 2.4.	Yer altı ve yerüstü yapılarına ait süreksizlik içeren temsili kesitler....	31
Şekil 2.5.	Nokta yükleme test cihazının şematik görünümü.....	34
Şekil 2.6.	Konik ucun şematik görünümü.....	34
Şekil 2.7.	Nokta yükleme testi için örnek ebatları.....	35
Şekil 2.8.	Nokta yükleme dayanım testlerinde geçerli ve geçersiz kırılma tipleri.....	35
Şekil 2.9.	Disk numunenin kırılma şekli.....	37
Şekil 2.10.	Brazilian aparatının şematik görünümü.....	37
Şekil 2.11.	Ultrasonik hız testinin uygulamasına ait akım şeması.....	39
Şekil 2.12.	Ultrasonik hız ölçüm konfigürasyonu (T=verici, R=alıcı).....	39
Şekil 2.13.	Üç nokta yükleme altında SCB örneğinin şematik görünümü.....	41
Şekil 2.14.	SCB numune hazırlama işlem şeması.....	41
Şekil 2.15.	Örnek XRD cihazı.....	43
Şekil 2.16.	a-) Gevrek kırılma b) Orta dereceli sünek kırılma c) Yüksek sünek kırılma.....	50
Şekil 2.17.	a)Taneler arası (intergranüler) ve b) tane içi (transgranüler) çatlak ilerlemesi.....	52
Şekil 2.18.	Çatlak etrafında gerilim yoğunlaşması.....	56
Şekil 2.19.	Çatlak yüzeylerinin üç hareket şekli.....	57
Şekil 2.20.	FPZ'nin boyutu ve şekli.....	60
Şekil 2.21.	Zamana bağlı olarak bir çatlakın büyümesi .....	61
Şekil 2.22.	Büyüyen çatlak ile mukavemetindeki değişimi.....	61
Şekil 2.23.	Farklı geometrik tiplere sahip kırılma tokluğu test numunelerinin şematik görünümü.....	63
Şekil 2.24.	Basit bir sınır hücresi.....	67
Şekil 2.25.	Nöron modeli.....	67
Şekil 2.26.	Çok katmanlı algılayıcılar.....	71
Şekil 2.27.	En küçük karelerin grafiksel gösterimi.....	75
Şekil 3.1.	Çalışma alanı yer bulduru haritası.....	78
Şekil 3.2.	Malatya (Yazıhan) Bazalt ocağına ait bir görüntü.....	79
Şekil 3.3.	Malatya (Akçadağ) Bej ocağına ait bir görüntü.....	79
Şekil 3.4.	Karot alma makinesi ve karot ucu kesme ve düzeltme makinesi.....	81
Şekil 3.5.	Çeneli ve çekiçli kırıcı.....	81
Şekil 3.6.	Bilyeli değirmen ve elek setine ait görüntü.....	82
Şekil 3.7.	Arşimet terazi, etüv, kumpas ve desikatöre ait görüntü.....	82
Şekil 3.8.	Farklı çaplara sahip karotiyerler.....	83
Şekil 3.9.	Özgül ağırlık deneyine ait bir görüntü.....	89

Şekil 3.10.	Kapilarite deneyine ait görüntü.....	91
Şekil 3.11.	Schimidt çekici sertlik ile ölçüm.....	92
Şekil 3.12.	Hidrolik basınç presi.....	93
Şekil 3.13.	Tek eksenli basınç dayanımında kullanılan numuneler.....	94
Şekil 3.14.	Nokta yükleme test cihazı.....	95
Şekil 3.15.	Nokta yükleme deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi ( $a_1$ - $a_3$ ) ve deney sonrasına ( $b_1$ - $b_3$ ) ait görüntüleri (a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB).....	96
Şekil 3.16.	Sonik hız deneyi cihazı.....	98
Şekil 3.17.	Brazilian test aparatı.....	100
Şekil 3.18.	Brazilian deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi ( $a_1$ - $a_3$ ) ve deney sonrasına ( $b_1$ - $b_3$ ) ait görüntüleri (a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB).....	101
Şekil 3.19.	SCB numunelerinin hazırlanmasına ait görüntü.....	103
Şekil 3.20.	Bilgisayar kontrollü SCB deney çalışmasına ait görüntü.....	103
Şekil 3.21.	SCB deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi ( $a_1$ - $a_3$ ) ve deney sonrası ( $b_1$ - $b_3$ ) görüntüleri (a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB).....	104
Şekil 3.22.	Altın tozu kaplama (a) ve SEM analizine (b) ait görüntü.....	105
Şekil 3.23.	Kül fırını.....	106
Şekil 4.1.	Kayaçların zamana bağlı olarak kılcal su emme değişimi.....	112
Şekil 4.2.	Schmidt çekicinin çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi....	115
Şekil 4.3.	Yazihan Bazalt örneğinin XRD analiz deseni.....	116
Şekil 4.4.	Malatya Bej örneğinin XRD analiz deseni.....	117
Şekil 4.5.	Afyon Beyaz örneğinin XRD analiz deseni.....	117
Şekil 4.6.	Malatya Beje ait ince kesit görüntü.....	119
Şekil 4.7.	Afyon Beyaz örneğine ait ince kesit görüntü.....	119
Şekil 4.8.	Yazihan Bazalt örneğine ait ince kesit görüntü.....	120
Şekil 4.9.	Kayaçların makaslama parametrelerinin dolaylı yoldan belirlenmesi (örnek gösterim).....	121
Şekil 4.10.	Tek eksenli basınç dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi.....	127
Şekil 4.11.	Nokta yükleme dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi.....	137
Şekil 4.12.	Brazilian (dolaylı yoldan) çekme dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi.....	146
Şekil 4.13.	Vp dalga hızının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi.....	153
Şekil 4.14.	Vs dalga hızının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi.....	153
Şekil 4.15.	YB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim.....	157
Şekil 4.16.	YB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi.....	158
Şekil 4.17.	MB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim.....	161

Şekil 4.18.	MB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi.....	162
Şekil 4.19.	AB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim.....	166
Şekil 4.20.	AB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi.....	166
Şekil 4.21.	Kuru halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi.....	167
Şekil 4.22.	Doğgun halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi.....	168
Şekil 4.23.	Donmuş halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi.....	168
Şekil 4.24.	Termal şok uygulaması sonrası kayaçların deformasyon-yük ilişkisi..	169
Şekil 4.25.	Termal yaşlandırma uygulaması sonrası kayaçların deformasyon-yük ilişkisi.....	169
Şekil 4.26.	Kayaçların kuru haldeki SEM görüntüleri.....	171
Şekil 4.27.	Kayaçların doymuş haldeki SEM görüntüleri.....	172
Şekil 4.28.	Kayaçların donmuş haldeki SEM görüntüleri.....	173
Şekil 4.29.	Kayaçların termal şok uygulaması sonrasında SEM görüntüleri.....	174
Şekil 4.30.	Kayaçların termal yaşlandırma uygulaması sonrasında SEM görüntüleri.....	175
Şekil 4.31.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile tek eksenli basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki.....	177
Şekil 4.32.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile nokta yükleme dayanımı değerleri arasındaki ilişki.....	177
Şekil 4.33.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Brazilian çekme dayanımı değerleri arasındaki ilişki.....	178
Şekil 4.34.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Schmidt çekici sertlik değerleri arasındaki ilişki.....	179
Şekil 4.35.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Vp dalga hız değerleri arasındaki ilişki.....	179
Şekil 4.36.	Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Vs dalga hız değerleri arasındaki ilişki.....	180
Şekil 4.37.	1 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	184
Şekil 4.37.	2 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	184
Şekil 4.37.	3 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	185
Şekil 4.37.	4 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	186
Şekil 4.37.	5 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	186
Şekil 4.37.	6 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	187
Şekil 4.37.	7 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	188
Şekil 4.37.	8 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	188
Şekil 4.37.	9 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	189
Şekil 4.37.	10 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı.....	190

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°	:Derece
°C	:Santigrat derece
cm	:Santimetre
cm <sup>2</sup>	:Santimetrekaire
cm <sup>3</sup>	:Santimetreküp
ASTM	:Amerikan test ve malzeme derneği
ISRM	:Uluslararası kaya mekaniği derneği
g	:Gram
Gf	:Kırılma enerji
K <sub>ic</sub>	:Kırılma tokluğu
Kg	:Kilogram
Kgf	:Kilogramkuvvet
kN	:Kilo Newton
L/D	:Boy/çap
m	:Metre
mm	:Milimetre
mm <sup>2</sup>	:Milimetrekaire
mm <sup>3</sup>	:Milimetreküp
MPa	:Mega pasgal
N	:Newton
NX	:54 mm çaplı karotiyer
µs	:Mikrosaniye
UCS	:Tek eksenli basınç dayanımı
BT	:Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı
SH	:Schmidt çekici sertlik
PL	:Nokta yükleme dayanımı
V <sub>p</sub>	:P dalga hızı
V <sub>s</sub>	:S dalga hızı
XRD	:X-ışını kırınım yöntemi
XRF	:X-ışınları floresans spektrometresi

# ÖZET

Doktora Tezi

## ÇEVRESEL FAKTÖRLERİN ETKİSİYLE KAYAÇLARIN KIRILGANLIK İNDEKSLERİNDE MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ

Engin ÖZDEMİR

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

249 + xviii sayfa

2020

Danışman: Doç. Dr. Didem EREN SARICI

Bu çalışmada, üç farklı kökenli (magmatik, metamorfik ve sedimanter) kayada farklı çevresel koşulların (kuru, doygun, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) bazı fiziko-mekanik özelliklere ve kırılma tokluğu değerlerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında kayaların doğal durumdaki fiziksel, kimyasal, mekanik, mineralojik ve petrografik özellikleri tayin edilmiştir. İkinci aşamada kayalar koşulları önceden belirlenen çevresel koşullara belirli sürelerde maruz bırakılarak yaşlandırılmış ve kayalar üzerinde bazı fiziko-mekanik testler (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, Schmidt sertlik, ultrasonik dalga hızı) ile yarı dairesel eğilme dayanımı tekniği uygulanarak kırılma tokluğu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, basit, çoklu regresyon analizleri ve yapay sinir ağı modelleri kullanılarak fiziko-mekanik özelliklerden kırılma tokluğu değerlerini tahmin edecek modeller geliştirilmiştir.

Kayaların fiziko-mekanik özelliklerini en çok zayıflatan ortam koşulunun termal şok uygulaması olduğu belirlenmiştir. Donmuş koşulda ise kayaların fiziko-mekanik özelliklerinde ve kırılma tokluğu değerlerinde artış gözlenmiştir. Geliştirilen basit regresyon modellerinde nokta yükleme dayanımı ve Brazilian çekme dayanımının kırılma tokluğunu en iyi tahminleyen mekanik özellik olduğu  $R^2$  değerlerinin 0.97'nin üzerinde olmasından anlaşılmıştır. Modellerin performansları RMSE, MAE ve MAPE değerleri ile kontrol edildiğinde % 10'un altında olduğundan başarılı kabul edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya mekaniği, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi, çevresel koşul, yarı dairesel eğilme testi, tek eksenli basınç dayanımı

## ABSTRACT

Ph.D. Thesis

### DETERMINATION OF CHANGES IN FRACTURE INDEX OF ROCKS BY EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS

Engin ÖZDEMİR

İnönü University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mining Engineering

249 + xviii pages

2020

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Didem EREN SARICI

In this study, it was aimed to determine the effects of different environmental conditions (dry, saturated, frozen, thermal shock and thermal aging) on some physico-mechanical properties and fracture toughness values of rocks from three different origins (i.e, magmatic, metamorphic and sedimentary).

In the first stage, the physical, chemical, mechanical, mineralogical and petrographic properties of rocks were determined. In the second stage, the rocks are aged by exposing them to pre-determined environmental conditions for a certain period of time and then, some physico-mechanical tests (uniaxial compressive strength, point load strength, Brazilian tensile strength, Schmidt hardness, ultrasonic wave velocity) and semi-circular bending strength were applied on the aged rocks. In the third stage, models were developed to predict fracture toughness values from physico-mechanical properties using simple, multiple regression analysis and artificial neural network modeling.

It was determined that the thermal shocking was the most weakening application among environmental conditions for physico-mechanical properties of rocks. In frozen condition it was observed that physico-mechanical properties and fracture toughness values of rocks increased. In the improved simple regression models, point load strength and Brazilian tensile strength were the best estimated mechanical properties of the fracture toughness as the  $R^2$  values greater than 0.97 were obtained. The performance of the models was considered successful because of below 10 when it is controlled with RMSE, MAE, MAPE values.

**Keywords:** Rock mechanic, fracture toughness, fracture energy, environmental condition, semi-circular bending test, uniaxial compressive strength

## 1.GİRİŞ

Katı malzemeler ile uğraşan makine mühendisliği, inşaat mühendisliği, jeoloji mühendisliği, petrol mühendisliği ve maden mühendisliği gibi birçok bilim dalları doğrudan veya dolaylı olarak kırılma mekaniğinin uygulama alanları içerisinde kendilerine yer bulmaktadırlar. Bu nedenle araştırmacıların ve tasarımcıların çalışma alanlarında kırılma mekaniğini dikkate almaları maaliyet ve güvenilirlik için oldukça önem arz etmektedir. Kırılma mekaniğinin gelişimi yakın tarihteki bazı felaketlerle doğrudan ilişkilidir. II. Dünya Savaşı sırasında yüzlerce özgürlük gemisi ikiye ayrılarak kırılmıştır. Gemilerde meydana gelen bu kırılmanın ana sebebinin; perçin ve zayıf malzeme seçiminden kaynaklı olduğu daha sonraki çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Ayrıca, Aloha Airlines Boeing 737 uçağı 28 Nisan 1988'de merkez gövde kısmındaki çatlaklar nedeniyle oluşan tehlikeler ön görülerek uçuş envanterinden çıkarılmıştır (Wang 1996).

Kırılma, bir malzemenin dışarıdan etki eden yük altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayıdır. Kırılma olayı aşamalı olarak gerçekleşmektedir. İlk aşaması çatlak oluşumu ile başlar. Oluşan çatlaklar belirli bir kritik uzunluğa ulaşıncaya kadar ilerlemekte, daha sonra kararsız şekilde büyüyerek kırılma olayı meydana gelmektedir. Kırılma, malzemenin özellikleri ne olursa olsun çatlak oluşumu ve çatlağın ilerlemesiyle meydana gelmektedir. Fakat kırılmanın karakteri malzemenin malzemeye değişim göstermekte olup etki eden gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. Kayaçlarda çatlağın başlamasına ve yayılımına direnecek esas malzeme parametresi kayacın kırılma tokluğudur. Kısaca ifade edilecek olursa bir malzemenin kırılma tokluğu, çatlak oluşumuna ve kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Bu parametre kayaçların kırılma mekaniğinde en temel malzeme sabiti haline gelmekte ve laboratuvar ortamında deneysel çalışmalarla saptanabilmektedir.

Kırılma mekaniği, mühendislik tasarımlarında kullanılan malzemelerin yük taşıma kapasitelerini ve kırılmayla belirlenen hasarlarını incelemektedir. Amacı bir malzemenin çatlak gelişimi ve kırılmasını nicel olarak ifade etmektir. Farklı çevresel ortamlarda (yüksek sıcaklık, donma-çözünme, asidik ortam vb.) ve değişik yükler altında malzemenin hasar boyutunun ve tahmini yenilme yerinin önceden belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, çatlağın hangi koşullarda daha hızlı ilerlediğini ve ilerlemesinin hasara neden olmadan nasıl durdurulacağını da belirlemektedir (Backers 2003).



Kayaçların özelliklerini ve değişik koşullardaki davranışlarını belirlemek için farklı deney yöntemleri uygulanmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler bazen başka bir deneyden elde edilecek sonucu kestirmeye veya kayaları sınıflandırmaya yönelik olurken bazen de doğrudan tasarıma yönelik olarak kullanılmaktadır. Kaya mekaniği tasarım problemlerinde öncelikli olarak incelenen kaya kütlesi iken; delme, patlatma, tünel açma, kesme ya da kırma gibi parçalama süreçlerinde kaya maddesinin özellikleri önemli olmaktadır. Ayrıca birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kaya maddesi ile kaya kütlesi özellikleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla kırılma mekaniği kavramı, kaya malzemesi ile birincil derecede ilişkili olup, kaya mühendisliği çalışmalarına önemli katkılar sağlamaktadır. Kayaçların kırılma mekaniği verileri patlatma, hidrolik kırılma, yerinde gerilme ölçümleri, mekanik parçalanma, kaya şev analizi, deprem mekaniği, deprem tahmini, levha tektoniği, zamana bağlı olarak gelişen bozulma, radyoaktif atıkların jeolojik olarak bertarafı, petrol, doğalgaz veya havanın depolanması, alt yapı, ulaşım gibi birçok madencilik çalışmalarında önem arz etmektedir (Atkinson, 1987; Whittaker et al., 1992; Backers, 2004).

## **1.1 Çalışmanın Amacı**

Yeryüzünde bulunan kıtalar ve bölgeler ekvatora yakınlık ve uzaklık mesafelerine bağlı olarak farklı sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Ekvatora yakın olan bölgelerde sıcaklık artarken ekvatordan uzaklaştıkça (kutuplara gidildikçe) sıcaklık dereceleri düşmektedir. Ülkemizde ise bazı doğu bölgelerinde kış ayları 5-6 ay sürmekte ve bu bölgelerde kış aylarının büyük bir kısmı sıfırın altındaki sıcaklıklarda geçmektedir.

Mevsimlerdeki değişikliklerle birlikte sıcaklıktaki değişimlerin donmuş kayaçların yenilme sürecine olan etkisini anlamak için önemlidir. Buzun mekanik davranışının hem sıcaklık hem de yükleme oranı ile değiştiği bilinmektedir. Su, sıfırın altındaki sıcaklık derecelerinde kayacın doygunluk derecesine bağlı olarak kayacın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Kayacın bünyesine giren su, hava sıcaklığının düşmesiyle donmakta ve buz haline geçmektedir. Don haline geçen suyun hacmi yaklaşık olarak % 9 artmakta, bu durum kayaç içerisinde iç gerilmelere sebep olmaktadır. Literatürü incelediğimizde kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarının farklı doygunluk derecelerine bağlı değişimi

birçok araştırmacı tarafından ele alınmışken don halindeki değişimine ait çok kısıtlı bilgiye ulaşılmıştır.

Çevre sıcaklığının hızla değiştiği yerlerde kaya yapılarının duraylılığı ve radyoaktif atık bertarafı gibi kaya mühendisliği çalışmalarında, kayaçların termal şok ve termal yaşlandırma etkisi altında tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Jeoteknik, maden, inşaat çalışmalarında yapıların inşası ve bakımı yapılırken kayaç dayanımına dezavantaj oluşturacak çevresel faktörler dikkate alınarak kayaca ait tasarım yapılmalıdır (Hall veThorn, 2014., Heidari vd., 2013., Zhang ve Zhao., 2014., Zhou, vd.2017).

Yarı dairesel eğilme deneyi, numune hazırlamadaki kolaylığı, çok yönlülüğü, güvenilirliği ve maliyet düşüklüğü nedeniyle diğer kırılma tokluğu deneylerine nazaran daha avantajlı bir test tekniğidir. Bazı araştırmacılar tarafından yükleme oranı, kayaç mineralojik içeriği, sıcaklık, çentik uzunluğu ve çentik tipinin kırılma tokluğu değerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada ise kayaçların farklı çevresel etmenler altında fiziko-mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak, kırılma tokluğu ve enerjisi değerlerinin değişimi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Literatürde termal şok, termal yaşlanma ve donmuş kayaların fiziko-mekanik özellik değişimleri ile ilgili çalışmalar mevcut iken kırılma tokluğunun bu koşullardaki değişimi ile ilgili çalışmalara pek rastlanılmamıştır. Ayrıca silindirik kayaç numuneleri ile yapılan kırılma tokluğu deneylerinin kuram ve uygulama alanları halen gelişim aşamasında olduğundan bu konuda literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla, son zamanlarda kaya mekaniği ve kırılma mekaniği çalışmalarında en çok tercih edilen yarı dairesel eğilme deney düzeneğini kullanarak çevresel etmenlerin kırılma tokluğu ve enerjisine etkisi araştırılmıştır. Böylelikle, yarı dairesel eğilme tipi örneklerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde standart veya önerilen bir yöntem olarak güvenilirliğinin artmasına da katkı sağlanacağı düşünölmektedir.

## 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Kırılma mekaniğinin prensipleri, yöntemleri ve teknikleri birçok kaya mühendisliği faaliyetinde iki zıt amaçla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Birincisi kırık büyümesinin önlenmesi ile ilgilidir. Bu durum genelde kaya yamaçları, şev stabilitesi ve yer altı açıklıkları gibi bazı kazılmış kaya yapılarında duraylılığın sağlanmasında önem arz etmektedir. Diğeri ise kırık büyümesi artışının delme-patlatma, kazılabilirlik olaylarında ekonomiklik ve kolaylık sağlaması ile ilgilidir. Bazı mühendislik uygulamaları, kaya sondajı, tünelcilik, delme ve hidrolik kırma gibi yöntemlerin çoğunlukla kaya kırma verimliliğini optimize etmek için belirlenmesi gerekir. Her iki amaç için de kırılmanın başlaması ve yayılmasını anlamak mühendislik çalışmaları için oldukça önem taşımaktadır. Kayaların gerginliği zayıf olduğundan dolayı Mod I kırığının tespiti en temel kırılma modu olarak tercih edilmektedir.

Bu çalışmada üç farklı kökene sahip olan Malatya Yazıhan Bazalt (magmatik), Malatya Bej (sedimanter) ve Afyon Beyaz (metamorfik) örneğinin farklı çevresel ortamlarda fiziko-mekanik ve mineralojik-petrografik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma araziden örnek derleme, laboratuvar ve istatistiksel çalışmalar olmak üzere üç aşamada yürütülmüştür:

1- Örnek derleme aşamasında kayaçların fiziko-mekanik ve mineralojik-petrografik özelliklerini tayin etmek için en uygun lokasyonlardan temsili numuneler alınarak laboratuvara nakledilmiştir.

2- Kayaçların özgül ağırlık, su emme, porozite, birim hacim ağırlığı, doluluk oranı, kılcal su emme gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Farklı çevresel ortamlara maruz bırakıldıktan sonra tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian (dolaylı yoldan) çekme dayanımı,  $V_p$ - $V_s$  dalga hızları ve yarı dairesel eğilme dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca mineralojik-petrografik özellikleri ve içerikleri XRD, XRF, SEM ve ince kesit analizleriyle belirlenmiştir.

3- Farklı çevresel ortam koşullarına maruz kalan kayaçlardan elde edilen sayısal veriler ile istatistiksel analizler (yapay sinir ağları ve regresyon modelleri) yapılarak kırılma tokluğu değerleri tahmin edilmiştir.

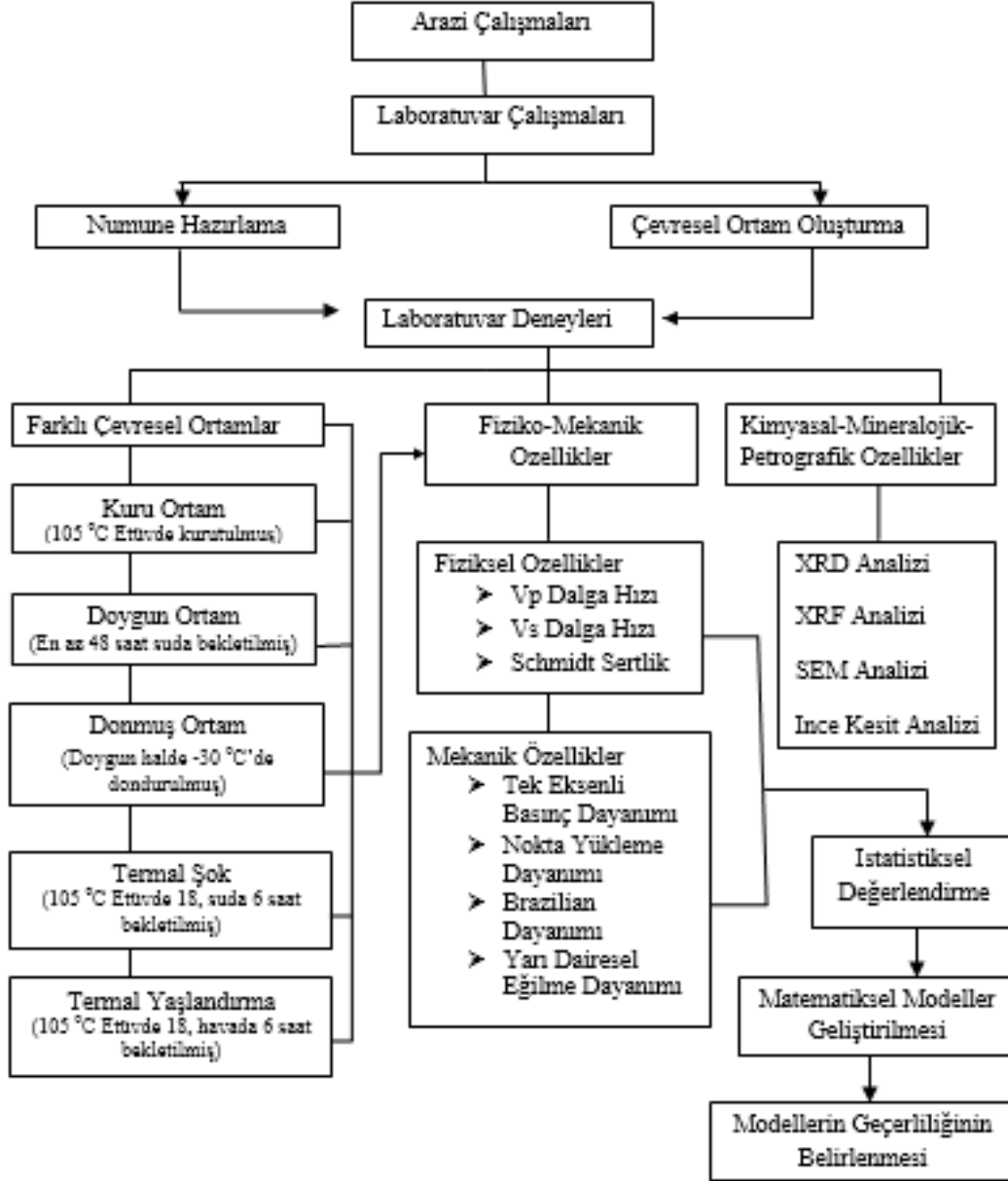
### 1.3. Çalışmanın Özgünlüğü

İşçi sağlığı ve iş güvenliği açısından en tehlikeli ve kaza oranı en yüksek olan iş kolları inşaat ve maden sektörüdür. Bu yüzden olası kazaların daha önceden tahmin edilmesi, olası felaketlerin önlenmesi veya minimize edilmesi için önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda en tehlikeli kırılma türü olan Mod I kırılma tokluğunun çevresel faktörler ile değişimi araştırılmıştır. Ayrıca kayaçların kırılma tokluğunun yerbilimleri ile ilgili çalışmalarda kullanılacak ekipman ve donanım seçimi, işletme maliyetinin minimize edilmesinde etkili olacağı düşünülmektedir. Bu tür ekipman seçiminde kayaçların kırılma parametrelerinin doğrudan etkili bir faktör olduğu bilinmektedir. Çevresel koşullar altında yarı dairesel eğilme (SCB) deney yöntemi ile ilgili literatürde oldukça kısıtlı çalışma olduğu tespit edilmiştir. Değişik koşullardaki (doğru halde donmuş, termal şok ve termal yaşlanma) kayaçların kırılma tokluğu verilerinin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

Yaptırılan SEM analizleri ile kırılmanın türünü (sünek, gevrek, tane içi ya da taneler arası) belirleyip mühendislik yapılarının emniyetinin ve istikrarının sağlanması için kullanılması hedeflenmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların kaya patlatmaları, şev stabilitesi, yeraltı ve yerüstünde yapılan kazılar, tünel, baraj inşaatlarında, ekipman seçimi gibi bir çok yerbilimleri çalışmalarına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### 1.4. Çalışmanın Akım Şeması

Tez çalışmasının aşamaları akım şeması halinde Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Çalışmanın akım şeması

## 1.5. Literatür Taraması

### 1.5.1. Çevresel koşulların kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ile ilgili çalışmalar

Inada vd. (1980) ve Matsunaga vd. (1981), yeraltı LNG (atmosfer basıncında - 162 °C'ye kadar soğutulduğunda yoğunlaşarak sıvı faza geçen 'sıvı doğal gaz') depolama tesisinin kararlılık analizi için -180 °C ile +20 °C arasında değişen sıcaklıktaki donmuş kayaçların mukavemetinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Her iki çalışmada da sıcaklık değerindeki azalmadan kaynaklı mukavemet artışı gözlemlemiştir.

Ma vd. (2002), kumlu toprak örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmada -20 °C ve -10 °C aralığındaki sıcaklık değerleri ile 1-5 MPa aralığındaki yanal basınç etkisi altında üç eksenli basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sıfır °C'de sabit düşey gerilim altında yanal basıncın değişimine bağlı olarak Poisson oranındaki değişimi incelemiştir. Düşük sıcaklık değerlerinde  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  değerleri arasındaki k katsayısı değerini 0.32 olarak belirlemiştir.

Hale ve Skaoor (2003), altı farklı kumtaşı örneğini termal şok, termal yaşlandırma ve donma çözünme döngülerine tabi tutarak porozite ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerindeki değişimi incelemiştir. 0, 10, 20, 30, 40 ve 50 döngü sonucunda termal şok ve termal yaşlandırma işlemleri sonucunda kumtaşlarının mukavemetini anlamlı bir miktarda azalmadığını, ancak donma ve çözünme döngülerinin altı kumtaşından en az üçünün mukavemetini önemli ölçüde azalttığını ifade etmişlerdir.

Ajalloian ve Karimzadeh (2003), magmatik kökenli kayaçlar üzerine inşa edilmesi planlanan Givi Barajının geoteknik özelliklerini belirlemek için kaya malzemesinin su içeriği ile tek eksenli basınç dayanımının nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Kayacın doygun halde iken tek eksenli basınç dayanımı değerinde yaklaşık % 18'lik bir azalmanın söz konusu olduğunu belirtmişlerdir.

Sachpazis (2004), Bernican Great (İngiltere) bölgesinde farklı metamorfik kayaçların mekanik özellikleri üzerinde doygunluğun etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda kayaçların tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükleme dayanımının

doygunluk ile ters orantılı, ultrasonik dalga hızının doğru orantılı olarak değiştiğini ifade etmiştir.

Wang vd. (2005), toprak zemini 0°C altındaki farklı sıcaklık değerlerinde dondurarak elastisite modülü değerlerindeki değişimi incelemişlerdir. Sıcaklık değerinin düşmesi ile alüviyal toprakların mekanik dayanımlarında artış olduğunu belirlemişlerdir.

Yavuz vd. (2006), 12 farklı sedimanter kökenli kayaç üzerinde 20 döngüden oluşan donma çözülme ve termal şok testleri yapmışlardır. Hem döngü öncesinde hem de döngü sonrasında P-dalga hızı, tek eksenli basınç dayanımı ve Schmidt sertliği değerlerini belirlemişlerdir. Donma çözülme ve termal şok ile muamele edilen kayaçların indeks ve mekanik özelliklerinin, başlangıç değerlerine göre değişik oranlarda azaldığını tespit edilmiştir. Ayrıca, çoklu regresyon analizi ile donma-çözülme ve termal şok uygulamasından dolayı kayaçların indeks ve mekanik özelliklerini ilişkilendiren matematiksel bir model geliştirmişlerdir.

Barefield vd. (2006), sedimanter kökenli 9 farklı kayaç örneğinde suya doygunluğun mekanik dayanıma etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar doygunluğun artması ile tek eksenli basınç dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir.

Romana vd. (2007), kayaçların su ile doygun halde iken tek eksenli basınç dayanımının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Araştırmacılar elde edilen deneysel veriler ile amprik formüller geliştirmiştir. Doygun haldeki tek eksenli basınç dayanımlarının daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Agustawijaya (2007), tek eksenli basınç dayanımı zayıf olan kumtaşı ve silttaşı örnekleri üzerinde doygunluğun etkisini araştırmış ve doygunluğun kayaçların dayanımında % 80 oranında azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Kodama vd. (2007), -30 °C ve 20 °C arasındaki sıcaklıkta doymuş numuneler için tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian (dolaylı yoldan) çekme testleri gerçekleştirerek mekanik özelliklerde ve deformasyon davranışlarında meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. Sıcaklık değerinin düşmesiyle tek eksenli basınç ve Brazilian çekme dayanımında artış olduğunu belirlemişlerdir.

Ergüler (2007), kil içeren kaya örnekleri üzerinde suya doygunluğun etkisini araştırmış ve doygunluğun kayaçların tek eksenli basınç dayanımında % 90 ve ortalama elastisite modüllerinde % 93'e kadar azalmaya neden olduğunu belirtmiştir.

Vasconcelos vd. (2008), tarihi bina olan Masonry (Portekiz) granitine doygunluğun etkisini araştırmışlardır. Su içeriğinin artması ile kayacın ultrasonik dalga hızında artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Xiao-dong vd. (2009), bir maden shaftının 515 metre derinliğinden örselenmemiş kil örnekleri almışlar farklı sıcaklık derecelerinde kil örneklerinin elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Sıcaklık değerinin düşmesi ile kilin elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanımlarında artış olduğunu belirtmişlerdir.

Török vd. (2010), iki farklı travertenin kuru ve doygun haldeki değişimini incelemişler ve doygun halde iken her iki traverten için tek eksenli basınç dayanımında azalma meydana gelirken Vp dalga hızlarında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yavuz (2011), andezit numunelerini donma-çözünme ve termal şok döngülerine tabii tutmuş ve her 10 döngü sonunda numunelerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimleri belirlemiştir. Toplam 50 döngünün uygulandığı çalışmanın sonucunda, andezitin Vp dalga hızı, Schmidt çekici sertliği ve tek eksenli basınç dayanımında azalmaların olduğunu belirlemiştir. Ayrıca donma çözünme ve termal şok döngüleri ile malzeme özelliklerinin değişimini tahmin etmek için matematiksel bir model önermiştir.

Jabbar (2011), bazı kayaçların su içeriği artışına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı ve ultrasonik dalga hızında meydana gelen değişimleri araştırmıştır. Su içeriğinin artması ile tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yükleme dayanımı azalırken, Vp dalga hızlarında artma olduğunu belirlemiştir.

Karakul ve Ulusay (2012), farklı doygunluk derecelerinde kayaçların mekanik özellikleri ve Vp dalga hızının değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar doygunluğun



artışı ile tek eksenli basınç dayanımı ve kohezyon değerlerinde azalma buna karşılık  $V_p$  dalga hızlarında artış olduğunu vurgulamışlardır.

Kodama vd. (2013), sıfırın altındaki sıcaklıklarda su içeriği, sıcaklık ve yükleme hızının kayaçların mukavemetine olan etkilerini araştırmışlardır. İncelenen sıcaklık aralığında kuru kayacın mekanik özelliklerinde az bir değişiklik meydana gelirken kayaçta su bulunması durumunda kaya dayanımında belirgin bir artışın geliştiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca donmuş haldeki kayacın Brazilian çekme dayanımının, tek eksenli basınç dayanımına nazaran yüzdesel olarak daha fazla artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Ma ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada donmuş kumun üç eksenli basınç dayanımında meydana gelen değişimleri araştırmışlar ve sıcaklık değeri düştükçe mekanik dayanımın arttığını belirlemişlerdir.

Özdemir ve Eren Sarıcı (2017), sedimanter kökene sahip dört farklı doğal taşın kuru, suya doymuş ve donmuş halde iken tek eksenli basınç dayanımı, Schmidt sertlik değerleri ve  $V_p$  dalga hızlarındaki değişimi incelemişlerdir. Tüm kayaçlarda tek eksenli basınç dayanımı ve Schmidt sertlik değerlerinin kuru halden doymuş hale gelindiğinde azaldığını, kuru halden donmuş hale geldiğinde ise tek eksenli basınç dayanımı, Schmidt sertlik ve  $V_p$  dalga hızı değerlerinin arttığını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2017), kırmızı kumtaşı üzerinde 10, 20, 30, 40 termal şok çevrimi yaparak fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin yanı sıra mekanik özelliklerinden Quasi-statik (yarı statik) bölme ve dinamik bölme gerilme değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Termal şok döngülerine maruz kalan kırmızı kumtaşında bozulmanın belirgin olduğunu, kayacın yoğunluğunda azalma ve porozite değerinde ise artma olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Quasi-statik bölme ve dinamik bölme gerilme değerlerinde azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

### 1.5.2. Kırılma tokluğu ile ilgili çalışmalar

Nasseri vd. (2007), Westerly granitini kullanarak farklı sıcaklık değerlerinin (oda sıcaklığı, 250, 450, 650 ve 850 °C) Mod I kırılma tokluğuna etkisini ele almışlardır. Termal işlemlerin Westerly granitinin sadece mekanik mukavemetinde önemli bir düşüşe neden olmakla kalmadığını, aynı zamanda dinamik elastik özelliklerini de azalttığını belirtmişlerdir.

Nasseri ve Mohanty (2008), nispeten homojen ve ince taneli dört farklı granitik kayacın mikroyapısal özellikleri ile kırılma tokluğu arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yük altında meydana gelen çatlakların, önceden var olan mikro çatlaklar arasındaki etkileşimlerden kaynaklı olduğunu ve örneğin çevresinde geniş bir kırık zonunun oluşmasına sebep olduğunu belirlemişlerdir.

Sierra ve ark. (2010), Woodford şeylinin çatlak başlama-yayılmını izlemek ve mekanik özelliklerini ölçmek için yarı dairesel eğilme testi gerçekleştirmişlerdir. Kil içeriği düşük olan üst Woodford şeylinin kırılma tokluğunun, daha yüksek kil içeriğine sahip olan orta ve alt Woodford şeylllerinin kırılma tokluğundan daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Kil içeriği yüzdesinin, Woodford şeylinin kırılma tokluğu üzerinde önemli oranda etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Amrollahi vd. (2011), sadece tane boyutu ve dağılımı bakımından farklı olan üç metamorfik kireçtaşının mod I, mod II ve karışık mod I-II kırılma tokluğundaki değişimleri incelemişlerdir. Deneysel veriler sonucunda, mod I kırılma tokluğunun ( $K_{IC}$ ) tane boyutu ile olumsuz şekilde etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca mermerin P-dalga hızı, Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı ve Schmidt çekici sertliği ölçüm değerleri ile mod I kırılma tokluğu arasında doğrudan ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

Liu ve Liu (2011), deneysel malzeme olarak kullandıkları Shenyang bölgesine ait dondurulmuş kilin kırılma tokluğuna farklı düşük sıcaklık ve yükleme hızlarının etkisini araştırmışlardır. Yükleme hızındaki artışın kilin kırılma tokluğunu artırırken, sıcaklıktaki pozitif yöndeki artışın ise dayanım kaybına neden olduğunu belirlemişlerdir.

Tutluoğlu ve Keleş (2011), tek düz kenar çentikli andezit ve mermer örneklerinin farklı çentik uzunlukları, çentik kalınlıkları, numune çapları ve numune kalınlıkları için boyutsuz gerilme yoğunluğu faktörünü kullanarak kırılma tokluğu testlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesi ile gerilme yoğunluğu faktörleri hesaplamışlar ve çok farklı geometrik tipe sahip numune parametreleri için elde edilen kırılma tokluğu değerleri ile literatüre katkı sağlamışlardır.

Dai vd. (2011), ayırık Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) kullanarak kayaçların dinamik Mod-I kırılma parametrelerini tespit etmek için yeni bir yöntem önermeyi hedeflemişlerdir. Ortalama dinamik kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu değerlerini termodinamiğin birinci yasasına dayanarak hesaplamışlardır. SCB metodu kullanılarak ölçülen dinamik kırılma değerlerinin literatürde bildirilenlerle uyumlu olduğunu vurgulamışlardır.

Erarslan ve Williams (2012), statik ve döngülü yükleme altında Brisbane tuf disk örneklerinin mod-I kırılma tokluğunda meydana gelen değişimi araştırmışlardır. Hasar mekanizmaları açısından statik ve döngülü yükleme altında elde edilen kırılma tokluklarının farklı olduğunu belirlemişlerdir.

Ayatollahi ve Akbaroost (2012), gevrek ve kırılğan malzemelerin mod I kırılma tokluğuna, numune boyutlarının etkilerini araştırmak için modifiye maksimum teğetsel stres kriteri denilen yeni bir yaklaşım geliştirmişler ve önerilen kriteri değerlendirmek için beton ve kireçtaşı için bildirilen bazı deney sonuçlarını kullanmışlardır. FPZ (kırılma ucu zonu) uzunluğunun numune büyüklüğü ile değiştiğini varsayarak, numune büyüklüğüne karşı FPZ uzunluğunun değişimini ifade etmek için bir formül önermişler ve önerilen yaklaşımın deney verileri için iyi tahminler sağladığını belirlemişlerdir.

Nara vd. (2012), üç adet kumtaşı ve iki adet magmatik kaya kullanarak bağıl nemliliğin kırılma tokluğu üzerindeki etkisini araştırmak için kapsamlı bir kırılma tokluğu testi seti oluşturmuşlardır. Kırılma tokluğu değerinin bağıl nemin artmasıyla azaldığını ve bu azalmanın su ile genişleyen killi kayalarda daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, radyoaktif atığın bertarafı amacıyla doğal kaya mağarası oluşturulması gibi uygulamalarda kayadaki kırılmayı geciktirmek ve stabilitesini sağlamak için çevredeki ortamın bağıl nem oranını kontrol etmenin etkili olacağını vurgulamışlardır.

Zhang vd. (2013), mermerlerde kırılma tokluğuna yükleme hızının etkisini araştırmışlardır. Deneysel verilere dayanarak, kırılma tokluğu değerinin yükleme oranına bağlı olarak doğrusal olarak değişiklik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Aliha ve Ayatollahi (2013), mermer, kumtaşı, kireçtaşı ve çamurtaşı içeren farklı kayaçların karışık mod I/II kırılma direncini ölçmek için yarı dairesel numuneler kullanmışlar ve yapılan kırılma testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile literatürde bildirilen değerleri karşılaştırmışlardır. Yarı dairesel numuneler kullanılarak yapılan kırılma testlerinden karışık mod I/II kırılma tokluğu tespiti için çok iyi tahminler sağlandığını belirlemişlerdir.

Wei vd. (2014), alüminyum nitrit içeren seramiklerinin kırılma tokluğu değerlerinin düşük sıcaklıklarda (kriyojenik) değişimini incelemişlerdir. Kırılma tokluğunun sıcaklığın 293 K'den 77 K'ne düşmesi ile  $3.98 \pm 0.19$ 'dan  $4.59 \pm 0.28$  MPa/m<sup>2</sup>'ye yükseldiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, SEM görüntülerinin kantitatif frakrografi analizi ile transgranüler (tane içi) kırık oranının 293 K'da % 7.3 iken 77 K'de % 14.5'e yükseldiğini ortaya koymuşlardır.

D'Orazio vd. (2014), havalandırma duvarlarında kullanılan kil tuğla panellerinin kırılma tokluğu ve gözenekliliği arasındaki ilişkiyi belirlemek için doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEFM) uygulamışlar ve gözenek yapısını dijital görüntü analizi (DIA) ile değerlendirmişlerdir. Gözenek boyutunda yaklaşık 200 µm<sup>2</sup>'lik bir artışın, kırılma tokluğu değerinde yaklaşık % 24'lük bir azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Pirmohammad ve Ayatollahi (2014), farklı yükleme hızları ve sıfırın altında ki sıcaklıklarda asfalt betonu numuneleri üzerinde mod I, mod II ve karışık mod I / II testleri gerçekleştirmişlerdir. Arzulanan yükleme modlarını sağlamak için, asimetrik dikey kenar çentiği bulunan geliştirilmiş yarı dairesel (SCB) örnekler kullanmışlardır. Araştırmacılar, yükleme hızının artması ve sıcaklığın azalmasıyla kırılma dirençlerinin arttığını belirlemişlerdir.

Aliha ve Ayatollahi (2014), V-çentikli Brazilian disk (CCNBD) numuneleri kullanarak mermer örneklerinin mod I ve mod II yüklemesi altında kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Mod II kırılma tokluğu değerinin mod I kırılma tokluğu değerine oranının

( $K_{IIc} / K_{Ic}$ ) yaklaşık 2 olduğu belirlenmiştir. Beyaz mermerin mod II kırılma tokluğu değerini mod I test sonuçlarından tahmin eden bir denklem geliştirmişlerdir.

Dai vd. (2015), ISRM tarafından önerilen 4 farklı kırılma yöntemi ile ilk defa numunelerin aşamalı kırılma mekanizmalarını sayısal olarak incelemişlerdir. ISRM tarafından önerilen, numunelerin aşamalı kırılma mekanizmasının sayısal değerlendirmelerinin SCB numunesinin kırılmasından elde edilen veriler ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Gaovd. (2015), ultra-yüksek hızlı fotoğrafçılıkla birleştirilmiş dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile SCB yöntemi kullanarak granitik kayaçların kırılma yayılımına yükleme hızının etkisini incelemişlerdir. Dinamik stres yoğunluğu faktörlerini ve çatlak ucu pozisyonlarını, DIC kullanılarak elde edilen yer değiştirme alanlarından belirlemişlerdir. Ayrıca yükleme hızının çatlak büyüme hızı ile ilişkili ve literatürde bildirilenlerle uyumlu olduğunu vurgulamışlardır.

Hua vd. (2016), ıslama-kuruma döngüsü ile V-çentikli Brazilian disk (CCNBD) örnekleri kullanarak kırılma tokluğu ve çatlak yayılımını incelemişlerdir. Islama-kuruma döngülerinin artmasıyla hem Mod II kırılma tokluğu ( $K_{IIc}$ ) hem de Mod I kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) değerlerinin azaldığını fakat  $K_{IIc}$ 'de meydana gelen bozunma derecesinin  $K_{Ic}$ 'ye nazaran daha fazla olduğunu vurgulamışlardır.

Erarslan (2016), statik ve döngüsel yüke karşı mod-I kırılma tokluğunun ( $K_{Ic}$ ) değişimini incelemiştir. Çevrimsel yükleme ile statik yükleme deneylerinden elde edilen  $K_{Ic}$  değerinin farklı olduğu saptanmıştır. SEM analizleri incelemeleri CCNBD numune uçlarının yüzeyleri üzerinde gerçekleştirmiştir. Her iki yükleme yönteminin de disk kaya örneklerinde bozulmaya (yorulmaya) neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Statik yükleme altında yarıma düzlemleri boyunca pürüzsüz ve parlak çatlaklar oluşurken döngülü yük altında partikül arızasına bağlı olarak taneler arası çatlaklar oluştuğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, kayaların taneleri arasındaki bağ gibi kaya dokusu özelliklerinin, kayaçların hasar davranışlarında önemli rol oynadığı vurgulanmıştır.

Mahanta vd. (2016), 600 °C'ye kadar değişen sıcaklıklarda ve statik yükleme koşulları altında Manoharpur kumtaşı, Bellary dolomit ve Dholpur kumtaşı numunelerinin

Mod I kırılma tokluğunda meydana gelen değişimleri ele almışlardır. Ayrıca, bu kayaçların bileşimlerini belirlemek için petrografik ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapmışlardır. Isıl işlem sonucunda bu kayalarda indüklenen mikro çatlakların ölçülmesi için SEM analizi yapılmış, deneysel sonuçlardan elde edilen verilere göre, oda sıcaklığından 100 °C'lik sıcaklığa kadar Manoharpur kumtaşı, Bellary dolorit ve Dholpur kumtaşlarının kırılma tokluğunun sırasıyla % 40, % 25 ve % 65 oranında arttığını ifade etmişlerdir. Fakat 600 °C'de ortam koşullarıyla karşılaştırıldığında, Manoharpur kumtaşı, Bellary dolorit ve Dholpur kumtaşı örneklerinin kırılma tokluğu değerlerinin % 59, % 36 ve % 30 oranında azaldığını belirlemişlerdir.

Sabri vd. (2016), kaya yapılarındaki çatlak yayılımı ve parçalanma süreçlerinin incelenmesinde kırılma tokluğunun anahtar bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Tane boyutu dağılımının kırılma tokluğuna etkisini değerlendirmek amacıyla kayaç ve kayaç benzeri numuneler üzerinde deneysel araştırma yapmışlardır. Disk numunelerine 0.3 mm/dk yükleme hızıyla yük uygulayarak örneklerin kırılma sürecini akustik emisyon sensörleri ile izlemişlerdir. Laboratuvar çalışmaları sonucunda, parçacık boyutundaki heterojenliğin, kırıkların sayısını etkilediğini ve ince taneli örneklere kıyasla daha fazla kırılmaya neden olduğunu vurgulamışlardır.

Saha ve Biligiri (2016), üç farklı sıcaklıkta asfalt karışımlarının kırılma tokluğundaki değişimleri yarı dairesel eğilme testi kullanılarak incelemişlerdir. Kalınlığın 40 ile 50 mm arasında değişmesinin, kırılma tokluğunda önemsiz bir değişiklik meydana getirdiğini fakat kullanılan asfalt karışım malzemesinin özelliği ve sıcaklığının kırılma tokluğu üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Wei vd. (2016), kaya örneği üzerinde ISRM tarafından önerilen yarı dairesel eğilme yöntemini kullanarak kırılma zonu ve kırılma tokluğunun belirlenmesi üzerine deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kırılma zonu, hem akustik emisyon (AE) izleme hem de sayısal modelleme yöntemleriyle gözlemlenmiştir. Deneysel verilerde elde edilen maksimum yük taşıma aşamasında simüle edilmiş etkili çatlak uzunlukları ile ölçülen değerlerin yakın olduğu belirlenmiştir.

Mahanta vd. (2017), yarı dairesel numuneler (SCB) kullanarak çeşitli gerinim hızlarının kırılma tokluğuna ve şeyllerin enerji salım hızı üzerindeki etkilerini

araştırmışlardır. Kırılma tokluğu ve enerji salınma oranları üç farklı mod (mod I, mod II ve karışık mod (I-II)) için ölçülmüştür. Ayrıca, seçilen şeylerin kompozisyonunu belirlemek için X-ışını kırınım analizi, mikro-yapısal ölçeklerde kırılmalar üzerine gerinim hızının etkileri incelemek içinde SEM analizleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, her üç mod için kırılma tokluğu ve enerji salınım oranının gerinim hızının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Ayrıca tüm gerinim oranları için mod I minimum enerji uygulamasını gerektirirken, mod II çatlak büyümesinin başlaması için maksimum enerji gerektiğini belirtmişlerdir.

Wen vd. (2017), ıslama-kuruma döngülerinin karışık mod (I-II) kırılma tokluğuna etkisini araştırmak için kumtaşı üzerinde V-çentikli Brazilian disk (CCNBD) numuneleri ile bir dizi kırılma testi hazırlamışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, ıslama-kuruma döngü sayıları arttıkça karışık mod (I-II) kırılma tokluğu değerlerinde azalma olduğunu, bu durumun jeoteknik mühendislik uygulamalarındaki kararlılık analizi için katkı sağlayacağını vurgulamışlardır.

Yao vd. (2017), ısı kaynaklı hasarın iki farklı beton harcının dinamik kırılma tokluğuna olan etkisini 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C ve 600 °C'de ısıtılma tabii tutarak çentikli yarı dairesel eğilme (SCB) numuneleri ile ele almışlardır. Dinamik testlerin sonucunda, dinamik kırılma tokluğunun yüklenme oranları ile arttığını ve ısıtılma işlem sıcaklıklarıyla azaldığını vurgulamışlardır. Araştırmacılar, dinamik kırılma tokluğunun yüklenme oranı ve termal etki üzerindeki bağımlılığını tanımlamak için hasar değişkeni verilerini kullanarak bir formül geliştirmişlerdir.

Dong vd. (2017), bir kaya temeli üzerine inşa edilen beton yapılar için, beton ile kaya arasındaki arayüzün genellikle en zayıf yapısal bölge olarak kabul edildiğini ve çatlakların hidrostatik yük altında ara yüzey boyunca başlayarak yayıldığını vurgulamışlardır. Dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniği ile kompozit kırıların üç nokta bükülme (TPB) ve dört nokta makaslama (FPS) deney programı altında kaya beton ara yüzlerindeki kırılma sürecini araştırmışlardır. Hem kırılma ucu zonu (FPZ) uzunluğunun hem de FPZ'deki çatlak açılımı ve yer değiştirmesinin, betonun doğrusal olmayan davranışını karakterize etmek için gerekli parametreler olduğunu vurgulamışlardır.

Tang (2017), V-çentikli Brazilian disk numunelerini kullanarak, çatlak boyunun, yükleme türünün ve sürtünmenin ağırlık fonksiyonu yöntemi kullanılarak türetilen gerilme yoğunluk faktörü (SIF) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Göreceli çatlak uzunluğu, yükleme açısı ve sınırlayıcı basınç arttıkça mod I SIF'ın azaldığını ifade etmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalardan elde veriler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle çalışmanın güvenilirliğini artırmıştır.

Kataoka vd. (2017), Kimachi kumtaşı kullanılarak sınırlandırılmış basıncın kayaçların mod I kırılma tokluğu üzerindeki etkisini araştırmak için 0 ile 10 MPa arasındaki farklı sınırlayıcı basınçlar altında SCB testleri gerçekleştirmişlerdir. Gerilme yoğunluğu faktörünü hesaplamak için farklı sınırlayıcı basınç koşulunu dikkate alarak SCB testinin sonlu elemanlar analizini de yapmışlardır. Sayısal simülasyon sonuçlarına dayanarak, kırılma tokluğunun tahmini modifikasyonunu önermişlerdir.

Berčáková vd. (2017), anizotropik kaya örneği olan migrasyonlu gnaysın kırılma tokluğuna yükleme oranı ve yükleme yönünün (paralel ve dikey) etkisini araştırmışlardır. Kırılma tokluğunu değerlendirmek için 18 adet SCB testi gerçekleştirmiş, SCB örneklerini yapraklı uçlara paralel ve dik olarak üretilen yapay düz çentiklerle iki gruba ayırmışlardır. Ayrıca testler,  $v = 0.01$ ,  $v = 1$  ve  $v = 100$  mm/dak olmak üzere üç farklı yükleme oranı altında gerçekleştirilmiş, kayaçların kırılma mekanizmalarını değerlendirmek, kırık düzlemlerin görselleştirilmesi ve analizi için optik bir mikroskop kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; kırılma tokluğunun değerlerinin yükleme hızının artmasıyla arttığını, yüklemenin tabaka düzlemine dik olması durumunun kırılma tokluğu değerini düşürdüğünü ve kırılmanın çoğunlukla biyotit ile tane sınırları arasında, daha az oranda, kuvars-feldispat tanelerinde başladığını belirlemişlerdir.

Jeong vd. (2017), mikro boyutlu numune ve yarı dairesel numune kullanarak granitin mikro-makro ölçekli mod-I kırılma tokluğuna etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında, plajiyoklas ve alkali feldispat kuvars gibi minerallerden oluşan İksan graniti (Kore)'ni tercih etmişlerdir. Her iki testten elde edilen kırılma tokluğu verilerine dayanarak, granitin boyut etkisi tartışılmıştır. Genellikle numune boyutunun artmasıyla kayacın basma ve çekme dayanımı azalma gösterirken, kırılma tokluğunda tam tersi sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca mineral taneleri arasındaki zayıflıkların artmasına bağlı olarak kırılma tokluğu değerinde azalma olduğunu belirlemişlerdir.



Roy vd. (2017), kayaların kırılma tokluğu değerleri ile jeomekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ifade etmek için geçmiş deneysel verilere ek olarak yeni deneysel verilerle yeniden değerlendirme yapmışlardır. Araştırmacılar jeomekanik özelliklerden, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı,  $V_p$  dalga hızı,  $V_s$  dalga hızı ve yoğunluk parametrelerini ele alırken, kırılma tokluğu için Mod I yöntemini tercih etmişlerdir. Deneysel verilerden elde edilen istatistiksel sonuçlara göre aralarında orta seviyede ilişki olduğunu fakat deneysel verinin artmasıyla ilişkinin arttığını vurgulamışlardır.

Wang vd. (2017), şistin yataklanma yöneliminin kaya kırılma tokluğuna nasıl etki ettiğini araştırmak için farklı oryantal açılara ( $h = 0^\circ, 45^\circ$  ve  $90^\circ$ ) sahip üç grup oluşturularak 12 CCNBD ve 11 SCB örneği üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Şistin Mod I ( $K_{IC}$ ) değerinin yataklanma yönelimine karşı oldukça hassas olduğunu, yükleme yönü yataklanma yönüne paralel olduğunda  $K_{IC}$  değeri en küçük iken dik olması durumunda en yüksek sonuç elde edildiğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, kırılma tokluğunu test etmek için SCB numunelerinin kullanılması, CCNBD numunelerinin kullanılmasıyla karşılaştırıldığında kaya numunelerinin işlenmesi ve deneylerin gerçekleştirilmesi kolaylığı gibi birçok avantaja sahip olduğunu özellikle vurgulamışlardır.

Talukdar vd. (2018), oda sıcaklığından ( $25^\circ\text{C}$ )  $600^\circ\text{C}$ 'ye kadar değişen sıcaklığının üç farklı kayaç (iki bazalt ve bir tonalit) için mod-I kırılma tokluğuna etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar yarı dairesel eğilme testi için ISRM tarafından önerilen yönteme göre hazırlamış oldukları örnekleri kullanmışlardır. Tüm sıcaklık seviyelerinde Mod I kırılma tokluğu ile çekme dayanımı, ultrasonik dalga hızı ve Young modülü için üstel olarak korelasyonlar geliştirmişlerdir. Ayrıca ısı muamelesinden kaynaklanan kimyasal değişiklikleri bulmak için petrografik ve x-ışını kırınım analizleri ile mikro yapı değişikliklerini gözlemlemek için SEM görüntüleri elde etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda sıcaklık artışıyla Mod I kırılma tokluğu, çekme dayanımı, ultrasonik dalga hızı ve Young modülünde azalma olduğunu ve SEM görüntüleri yardımıyla mineral tanelerinin mikro çatlak yoğunluğunun ve yapısal parçalanmasının da arttığını ifade etmişlerdir.

Hosseini ve Khodayari (2018), İran'da bulunan Lushan kumtaşı numuneleri üzerinde yanal basınç (0, 3, 5, 7 ve 10 MPa) ve sıcaklığın (60, 100 ve 150 °C) mod II kırılma değerine etkisini araştırmışlardır. Yanal basınç artışının kayacın Mod II kırılma değerinde artma, sıcaklık artışının ise azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Wei vd. (2018), ISRM tarafından önerilen geleneksel kısa çubuk (Short-rod) yöntemine benzer şekilde kayaçların kırılma tokluğunu ölçmek için yeni bir çentikli kısa çubuk eğilme (CNSRB) yöntemi geliştirmişlerdir. CNSRB yönteminin güvenilirliğini değerlendirmek için CNSRB örneklerinin kritik gerilme yoğunluk faktörü sonuçları ile ISRM tarafından önerilen şevron eğilme (CB) örneklerinden elde edilen değerleri hem deneysel hem de teorik olarak karşılaştırmışlardır. İki kaya türünden elde edilen laboratuvar deneyleri sonucunda CNSRB yöntemi ve CB yöntemiyle ölçülen K<sub>1c</sub> değerlerinin benzer sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Haeri vd. (2018), bir malzemenin kırılma tokluğunun malzemede çatlamanın başlamasına ve yayılmasına karşı direnme yeteneği olarak ifade edildiğini ve mod I kırılma tokluğunun kayalar da dâhil olmak üzere kırıkların değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanıldığını öne sürerek yeni bir kırılma tokluğu ölçme yöntemi önermişlerdir. Merkezi kırık at nalı disk (CCHD) adını verdiği yöntem ile üretilen ölçüm sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek için, V-çentikli Brazilian disk numune yöntemini kullanarak kaya ve benzeri materyaller üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yeni yöntemin kaya ve benzeri malzemelerin kırılma tokluğu tespitinde faydalı olabileceğini vurgulamışlardır.

Aliha vd. (2018), poliüretan köpük malzemelerin kullanım ömürleri boyunca gerilme ve düzlem dışı kayma deformasyonuna maruz kalabildiklerini ve literatürde köpük malzemeleri için karışık mod (I+III) kırılma tokluğu verilerinin mevcut olmadığını öne sürerek farklı yoğunluklara sahip PUR köpük malzemeler üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Malzeme yoğunluğunun 100 kg/m<sup>3</sup>'den 300 kg/m<sup>3</sup>'e yükseldiğinde, kırılma tokluğu değerlerinde % 400 oranında artış olduğunu belirlemişlerdir.

Feng vd. (2018), yarı dairesel eğilme (SCB) örnekleri kullanılarak kumtaşının karışık mod (I+II) ve mod-II kırılma tokluğuna sıcaklığın etkisi incelemişlerdir. Kumtaşının karışık mod (I+II) ve mod-II kırılma tokluğu değerinin, ortam sıcaklığı 20 °C' den 100

°C'ye çıktığında yavaş yavaş arttığını ve 100 °C'den 500 °C'ye kadar da yavaşça düşüş gösterdiğini belirlemişlerdir. 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda karışık mod (I+II) ve mod-II kırılma davranışının önemli ölçüde etkilendiği ve kırılma tokluğu değerinde 500 ile 600°C arasında keskin bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Bu düşüşün ana etkenin ise sıcaklıktaki artışa bağlı olarak kumtaşının porozite değerindeki artış olduğunu öne sürmüşlerdir.



## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Kayaçların Mühendislik Özellikleri**

#### **2.1.1. Kayaçların jeolojik özellikleri**

Kayaç, bir veya birden fazla mineralin bir araya gelerek oluşturdukları mineral topluluğudur. Yer kabuğunda bulunan tüm kayaçlar köken ve oluşum itibarı ile üç ana grupta toplanır. Magmanın yerin derinliklerinde, yüzeyde ve yüzeye yakın yerlerde soğumasıyla oluşan kayaçlara magmatik kayaçlar denilmektedir. Magma yerin derinliklerinde çeşitli gazlarla doymuş, yüksek sıcaklık ve basınç altında erimiş bir silikat karışımıdır. Eğer magma yerin derinliklerinde yavaş bir biçimde soğursa kristalleri gözle görünür biçimde büyür ve mineraller birbirine iyici kenetlenir. Dolayısıyla bu tür magmatik kayacın sertliği ve mekanik dayanımı daha yüksek olur. Magma yüzeyde veya yüzeye yakın kısımlarda ani veya daha hızlı soğursa kristal yapısı gözle görünmeyecek kadar küçük, mineraller arası bağları derinlik kayaçlarına nazaran zayıf olur. Magmatik, metamorfik ve daha önceki yıllarda oluşmuş sedimanter kayaçların çeşitli çevresel etmenler sonucunda bozunarak başka bir yere taşınması ve çökmesiyle oluşan kayaçlara ise sedimanter kayaçlar denilmektedir. Sedimanter kökenli kayaçlar oluşum ortamları ve kökenlerine göre kırıntılı, organik ve kimyasal sedimanter kayaç olarak gruplandırılmaktadır. Daha önceden var olan magmatik ve sedimanter kökenli kayaçların yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşmaları sonucunda oluşan kayaçlara metamorfik kayaçlar denilmektedir. Metamorfizmaya uğrayan kayacın fiziko-mekanik özellikleri değiştiğinden dolayı yeni bir yapı ortaya çıkmaktadır (Karaman ve Kibici, 2013).

## **2.1. 2. Kayaçların fiziksel özellikleri**

Kayaçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi mühendislik yapılarının duraylılığının tayini için önemlidir. Kaya malzemesini mühendislik anlamda tanımlayan indeks özellikler olup, bu özellikler arasında istatistiksel olarak oldukça yüksek ilişki söz konusudur. Kayaçların fiziksel özelliklerinin tayininde kullanılan ekipmanlar ucuz, taşınabilir, hızlı uygulanan pratik yöntemlerdir. Ayrıca bir çok araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kayaçların indeks ve mekanik özellikleri arasında da yüksek korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı kayaçların fiziksel özelliklerini kullanarak mekanik özelliklerini istatistiksel olarak tayin etmek mümkündür (Ulusay vd., 2011).

### **2.1.2.1. Özgül ağırlık**

Özgül ağırlık, bir cismin birim hacim ağırlığının +4 °C'deki suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak ifade edilmektedir. Özgür ağırlık tayini kayacın bağıl yoğunluğunun ölçümü ile ilişkili bir kavramdır (TS EN 1939, 2010).

### **2.1.2.2. Yoğunluk**

Kayacın doğal, kuru ve suya tam doymuş halde havada ölçülmüş olan kütesinin hacmine oranı olup birimi  $g/cm^3$  olarak ifade edilmektedir. Yoğunluk kayacın mekanik özelliklerini etkileyen bir parametredir. Maden, inşaat, jeoloji, jeofizik gibi birçok yer bilimleri ile ilgili mühendislik yapı ve tasarım çalışmalarında önemli bir etmendir (TS EN 1939, 2010).

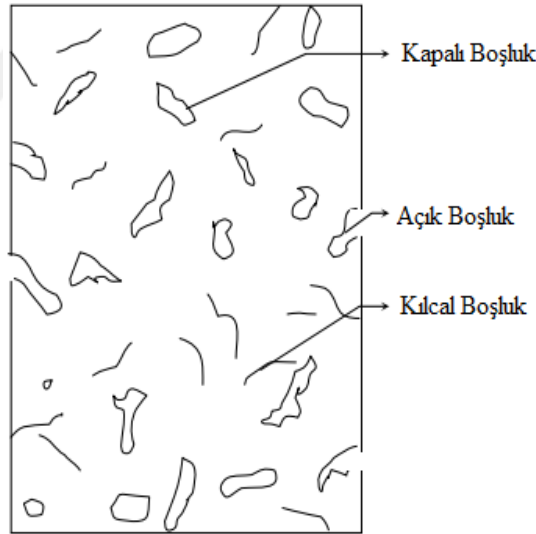
### **2.1.2.3. Birim hacim ağırlığı**

Kayaç içerisindeki boşluklarında ayrı hesaba katılmasıyla elde edilen ağırlığın kayacın birim hacmine oranıdır. Yoğunluk ile farkı ise yerçekim katsayısında dikkate alınması olup birimi  $kN/m^3$  dür. Boşluk ve gözenek içermeyen malzemenin yoğunluğu ile birim hacim ağırlığı birbirine eşittir. Kayaç içerisinde gözle görülen veya gözle

görülemeyecek kadar küçük boyutlarda olan gözenek ve boşluklar bulunmaktadır. Gözenek ve boşluk yapısı fazla olan kayacın birim hacim ağırlığı değeri düşük çıkmaktadır. Kayacın birim hacim ağırlığındaki azalma mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Düşük su emme değerine sahip, az gözenekli ve yüksek birim hacim ağırlığına sahip olan kayaçların mekanik dayanımları da genel olarak yüksektir (TS EN 1939, 2010).

#### 2.1.2.4. Ağırlıkça ve hacimce su emme

Kayacın suya tam doygun haldeki ağırlığı ile bünyesinde hiç su/nem bulunmadığı kuru haldeki ağırlığı arasındaki farkın kuru ağırlığa oranının yüzdesel ifadesi kayacın ağırlıkça su emme yüzdesini, hacmine oranı ise hacimce su emme değerini vermektedir. Kayaç içerisinde bulunan açık, kapalı ve kılcal boşluklar kayacın su emme yüzdesini etkilemektedir. Kapalı uçlu boşlukların su geçirme ve su emme özelliği düşük iken, açık uçlu ve kılcal boşlukların su geçirme ve su emme özellikleri yüksektir (Köse, 2009). Şekil 2.1’de farklı tiplere sahip boşlukların şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.1. Boşluk türlerinin şematik görünümü

### 2.1.2.5. Kılcal su emme (kapilarite)

Kayaçların çevresel etmenler altında bozunmasında kapiler su emmenin etkisi büyüktür. Kılcal boşluklar ile kayacın bünyesine giren sıvı kayacın dayanımı olumlu ve olumsuz yönden etkileyebilmektedir. Doygun halde kayacın dayanımı azalırken don halinde ise dayanımı artmaktadır. Dolayısıyla kapiler su emme kayacın fiziko-mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Kayaç içerisinde bulunan boşlukların ebatları ve birbiriyle olan bağlantılarını belirlemek mühendislik çalışmalarında önem arz etmektedir.

Belirli bir yüzey alanına sahip olan malzeme su ile temas ettiğinde, su malzeme bünyesine girerek yukarıya doğru hareket etmektedir. Bu olay genelde yapısında kılcal boşluk bulunan malzemelerde gözlemlenmektedir. Kılcal su emme malzemenin zamana bağlı olarak emilen su miktarının, su ile temas eden yüzey alanına oranıdır (TS EN 1925, 2010).

### 2.1.2.6. Porozite

Kayacı oluşturan tanelerin meydana getirdikleri boşluk hacminin kayacın hacmine oranı olan porozite, gözeneklilik olarak da adlandırılmaktadır. Kayacın boşluksuz hacminin toplam hacme oranı ise kompasite (doluluk oranı) olarak tanımlanmaktadır. Kayacın kompasite değerinin düşük olması porozite değerinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Porozite değerindeki artış kayacın dayanımını azaltarak deformasyon olabilirliğini etkilemektedir. Kayaçların kökenlerine bağlı olarak porozite değerleride farklılık gösterebilmektedir. Örneğin; derinlik magmatik kayaçlar magmanın etkisi ile yüksek sıcaklık ve basınç altında oluştukları için gözenekliliği düşüktür. Ancak yüzey magmatik kayaçları aniden soğudukları için yapılarında gözenek ve boşluk bulundurmaktadır. Metamorfik kökenli kayaçlarda derinlik kayaçları gibi yüksek sıcaklık ve basınç altında alterasyona uğradıkları için çok az gözenekliliğe sahiptir. Sedimanter kökenli kayaçlar ise bünyelerinde en fazla porozite bulunduran kayaçlardır (Köse, 2009). Kayaçlarda porozite değerine etki eden diğer faktörler ise şunlardır;

**Tane Şekli:** Tanelerin köşegenliği arttıkça kayacın porozitesi de artar.

**Tanelerin Sıralanma Şekli:** Tanelerin sıralanma şekline bağlı olarak kayacın porozitesi değişmektedir. Örneğin kübik bir biçimde istiflenmiş tanenin porozitesi rombohedral biçimde istiflenmiş kayaca nazaran daha yüksektir.

**Tane Boyu Dağılımı:** Kayacı oluşturan minerallerin tane boyutları birbirlerine ne kadar yakınsa gözeneklilik o denli yüksektir. İrili ufaklı tanelerde ise boşluklar ufak taneler aracılığıyla dolduğu için daha az gözenekli olmaktadır.

**Çimentolanma Derecesi:** Özellikle sedimanter kökenli kayaçların çimentolanma derecesi ne kadar fazla ise porozitesi o denli azalmaktadır. Ayrıca kayaç ne kadar sıcaklık ve basınca maruz kalırsa sıkılaşıma derecesi artacağından porozitesi azalmaktadır.

Çizelge 2.1’de Tarhan 1989 tarafından önerilen kayaçların porozite değerlerine göre sınıflaması verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kayaçların porozite değerlerine göre sınıflandırılması (Tarhan, 1989)

Kaya Tanımlanması	Porozite (%)
Çok Kompakt	< 1
Az Boşluklu	1- 2,5
Orta Boşluklu	2,5 -5
Oldukça Boşluklu	5 – 10
Çok Boşluklu	10 – 15
Çok Fazla Boşluklu	> 20

#### 2.1.2.7. Sertlik tayini

Bir mineralin çizilmeye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanan sertlik minerallere özgü ayırt edici bir özelliktir. Kayaç içerisinde bulunan mineraller kayacın sertliğini belirlemektedir. Sertlik kayaçların temel bir fiziksel özelliğidir. Ayrıca, kayaçların kırılma gerilmesi, elastisite modülü, çatlak tokluğu, malzemenin plastik veya gevreklik durumu ve yüzey enerjisini de etkileyen bir parametredir (Atkinson, 1993).



Sertlik; inşaat, maden, jeoloji gibi kaya mühendisliği ile ilgili yerbilimleri çalışmalarında, kullanılması planlanan makine ve donanım seçiminde etkin bir faktördür. Tünelcilik çalışmalarında galeri açma makinelerinin performansının ve uç tüketiminin önceden kestirilmesi, işletme ekonomisi açısından önem arz etmektedir. Kayaçların sertliklerine bağlı olarak galeri açma makinesinin hızı ve kazılabilirlik sınıflaması yapılmaktadır. Ayrıca sertlik verileri kullanılarak kayaçların arazi ortamında jeoteknik özellikleri açısından sınıflandırılması da mümkündür (Bilgin vd., 1989).

Kayaçların sertlikleri üç farklı deney yöntemiyle belirlenmektedir. Bunlar; çizilmeye karşı direnç (Mohs sertlik), dinamik özellikler (Schmidt çekici ve Shore sertlik) ve batma derecesidir (Vickers, Knoop, Brinnell sertlik).

### **Mohs sertlik tayini**

Mohs sertlik sınıflaması sert bir mineralin kendisinden daha az sert olan minerali çizmesi esasına dayanan bir sertlik skalasıdır. 10 tane mineralin baz alınarak oluşturulduğu sınıflama sisteminde en yumuşak mineral talk (sertlik sınıfı 1) iken en sert mineral elmas (sertlik sınıfı 10)'dır.

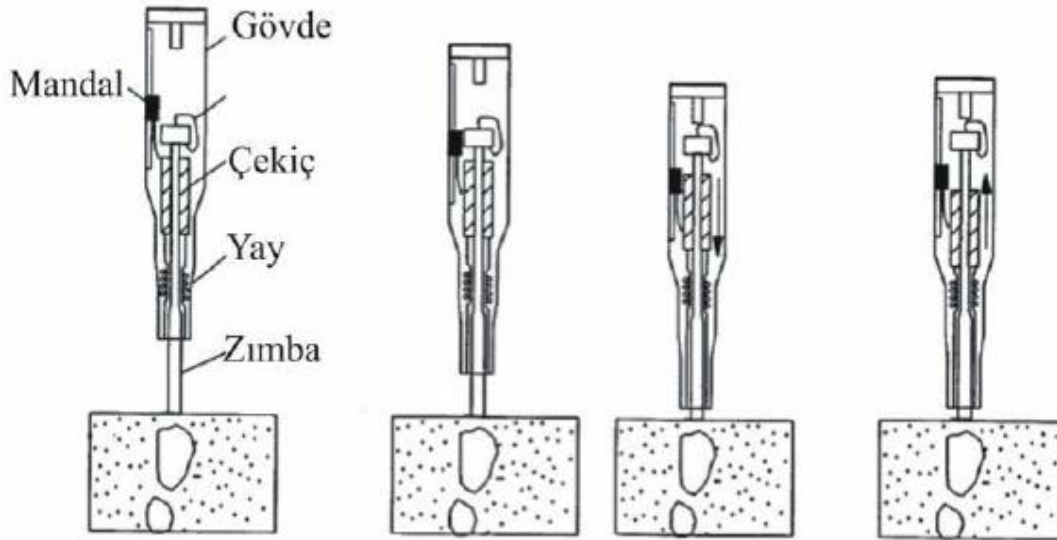
### **Shore sclerescope sertlik tayini**

Kayaçların sertliğini tayin etmede kullanılan Shore Sclerescope sertlik cihazı portatif ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle hem arazi hem de laboratuvar ortamında tercih edilen bir yöntemdir. Shore sertliği, kayaçların sertliğinin ölçülmesinde uygun ve tahribatsız bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Kaya mekaniği çalışmalarında tek eksenli basınç dayanımı zayıf olan kayaçların mekanik özelliklerinin dolaylı yoldan tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı kayaçların Shore sertliğini diğer mekanik özellikleriyle ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda en iyi ilişki tek eksenli basınç dayanımında elde edilmiştir (Altındağ ve Güney, 2006).

## Schmidt çekici sertlik tayini

Ucuz, kolay, pratik, taşınabilir ve hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt çekici ile sertlik tayini kaya ve betonların kalitesini test etmek için kullanılmaktadır. İlk olarak 1948 yılında beton numunelerinin tek eksenli basınç dayanımının ( $\sigma_c$ ) dolaylı yoldan tahmini için geliştirilmiş olan Schmidt çekici, 1960'lı yıllardan itibaren kaya mekaniği çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Schmidt çekici modelleri farklı darbe enerjileri seviyelerinde tasarlanmış olup L ve N tipi olarak iki tipi bulunmaktadır. L tipi, N tipinin sadece üçte biri olan 0.735 Nm'lik bir darbe enerjisine sahiptir. Ancak laboratuvar ortamında karot numuneleri üzerinde yapılan sertlik deneyi için N tipi çekiç yerine L tipi çekiç kullanılması uygundur (Schmidt, 1951; Kahraman, 2001a).

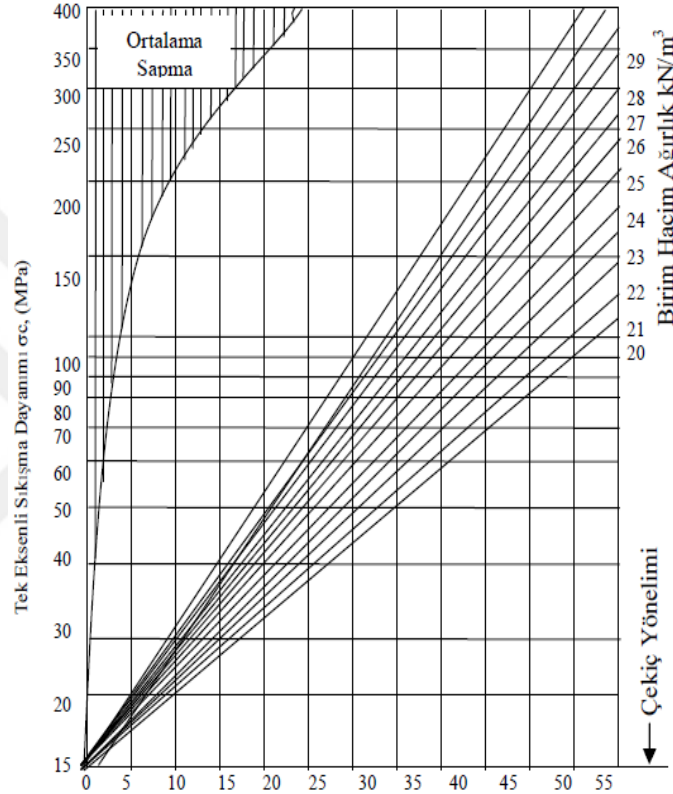
Schmidt çekici gövde, çekiç, mandal, zımba ve yay olmak üzere toplam 5 ayrı kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.2). Cihazda bulunan yay vasıtasıyla kurulan çelik uç kayaç yüzeyi üzerinde geri sekmeyi sağlamaktadır. Zıplama mesafesi çekiç üzerindeki cetvelden okunur ve Schmidt sertlik indeksi olarak kaydedilir (ISRM, 2007a).



Şekil 2.2. Schmidt çekicinin kısımları ve çalışma prensibi (Küçük, 2006).

Schmidt sertlik değeri, hem laboratuvar koşullarında hem de arazi ortamında kayaçların tek eksenli basınç dayanımını ve elastisite modülünü tahmin etmek için en sık kullanılan indeks deneyidir. Şekil 2.3'teki grafik kullanılarak kayaçların Schmidt çekici sertlik değeri ve birim hacim ağırlıkları kullanılarak dolaylı yoldan tek eksenli basınç

dayanımını tahmin etmek mümkündür. Kullanılan çekiç tipi, kayaç yüzeyindeki pürüzlülükler, nem içeriği, numune ebatları, kayacın ayrışma durumu, çekicinin kalibrasyonu gibi faktörler Schmidt çekici ile okunan geri sıçrama değerini etkilemektedir. Ayrıca Schmidt çekici yöntemi sert kayaçlarda oldukça elverişli iken, yumuşak kayaçlarda sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Bu tür yumuşak kayaçlarda Shore Sclerescope ile sertlik ölçümü yapmak çalışmanın güvenilirliğini artırmaktadır (Büyüksağış ve Göktan, 2007; Sachpazis, 1990).



Şekil 2.3. Schmidt çekici sertlik değeri ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Deere ve Miller, 1966)

Literatürde kayaçların Schmidt çekici sertlik değeri tespiti için kullanılan birbirinden farklı ölçme ve değerlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Geçmişten günümüze kadar halen uygulanmakta olan Schmidt çekici sertlik tayini yöntemleri Çizelge 2.2’de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.3’te ise kayaçların ISRM 1978’e göre Schmidt çekici sertlik değerlerine göre sınıflaması verilmiştir (ISRM, 1978a).

Çizelge 2.2. Schmidt çekici sertliği ölçümü yöntemleri

Araştırmacılar	Test Yöntemi
Hucka, 1965	Malzeme üzerinde tek bir noktadan 10 ölçümün en büyük değeri alınır. Bu işlem 3 farklı noktada uygulandıktan sonra elde edilen 3 değer in ortalaması alınır.
Deere ve Miller, 1966	NX boyutundaki karot numunesi üzerinde her ölçüm sonunda 45° çevirerek 3 ölçüm yapılır. Elde edilen 24 ölçüm sonucunun ortalaması alınır.
Soiltest, 1976	15 farklı noktadan ölçüm alınır ve elde edilen en büyük 10 değer in ortalaması alınır. Elde edilen ortalama değerden maksimum sapma 2.5'den az olması gereklidir.
Fowell ve McFeat Smith, 1976	Malzeme üzerinde tek bir noktada 10 ölçüm alınır, en son alınan 5 değer in ortalaması alınır.
Young ve Fowell, 1978	Kaya kütle sinin yüzeyi kare biçimde ızgaralar halinde bölünür, her bir kareden bir ölçüm alınır. Daha sonra tüm ölçümler in ortalaması alınır.
ISRM, 1981	Malzeme üzerinde farklı noktalardan 20 ölçüm alınır. En büyük 10 değer in ortalaması alınır.
Kazi ve Al-Mansour, 1980	Malzeme üzerinde en az 35 ölçüm alınır. En düşük 10 değeri atılıp kalan 25 değer in ortalaması alınır.
Poole ve Farmer, 1980	Malzeme üzerinde tek bir noktadan 5 ölçümün en büyük değeri alınır. Bu işlem 3 farklı nokta uygulandıktan sonra elde edilen 3 değer in ortalaması alınır.
Matthews ve Shakesby, 1984	Malzeme üzerinde 15 ölçüm alınır ve ortalama dan en çok sapan 5 değer çıkarılır. Geriye kalan 10 değer in ortalaması alınır.
Gök tan, ve Ayday, 1993	Malzeme üzerinde farklı noktalarda 20 ölçüm alınır. Chauvenets kriterine uymayan değerler çıkarılır. Geriye kalan değerlerin ortalaması alınır.
USBR, 1998	Malzeme üzerinde farklı noktalardan alınan 10 ölçümün en büyük 5 değer inin ortalaması alınır.
Katz vd., 2000	Malzeme üzerinde farklı noktalardan 32–40 arasında ölçüm alınır. Ölçüm sayısının yarısı kadar en büyük değerlerin ortalaması alınır.
Sumner, ve Nel, 2002	Malzeme üzerinde farklı noktalardan alınan 15 ölçümün en büyük 10 değer inin ortalaması alınır.
ASTM, 2001	Malzeme üzerinde farklı noktalardan 10 ölçüm alınır ve ortalama değerden 7 birim sapan değerler çıkarılır. Geriye kalan değerlerin ortalaması alınır.

Çizelge 2.3. ISRM 1978'e göre kayaçların Schmidt çekici sertlik sınıflaması (ISRM, 1978a)

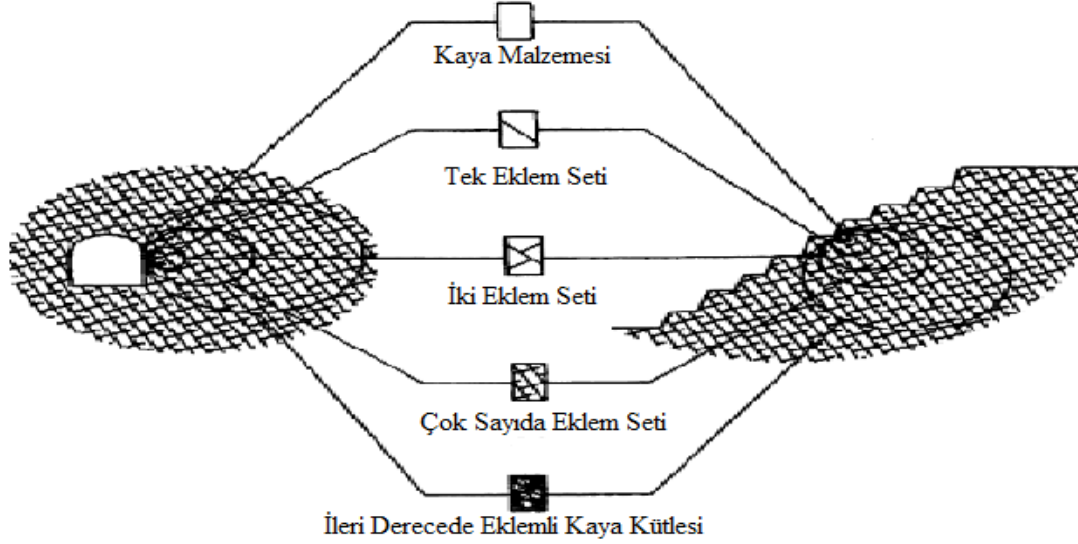
Schmidt çekici sertlik değeri	Kaya sertlik sınıflaması
0-10	Yumuşak
11-20	Az yumuşak
21-40	Az sert
41-50	Sert
51-60	Oldukça Sert
>60	Çok Sert

### 2.1.3. Kayaçların mekanik özellikleri

Kaya maddesini mühendislik sınıflaması açısından tanımlamaya yönelik özellikler indeks özellikler olarak adlandırılır. Bu özellikler inşaat, jeoloji ve maden kazılarının dizayn ve planlama aşamasında önemli rol oynamakta olup kaya patlamalarının etkilerinin belirlenmesinde, şev stabilitesi analizlerinde, yeraltında yapılan kazı, tünel ve baraj inşaatlarında kullanılan önemli parametrelerdendir. Ancak indeks deneyler sonucunda elde edilen değerler çoğu zaman mühendislik yapılarının tasarımında doğrudan kullanılmaz. Kayaçların çekme ve makaslama kuvvetleri altındaki davranışları, tek ve üç eksenli basınç koşullarındaki dayanım değerleri ve bunlarla ilgili diğer mekanik deneysel çalışmalardan elde edilen parametreler ise mühendislik tasarımında dikkate alınan tasarım deneyleridir (Khandelwal ve Ranjith, 2010; Singh vd., 2007).

Mekanik özellikler, tasarım aşamasında veya herhangi bir yapının duraylılık analizinde kullanılan girdi parametreleridir. Kayaç üzerine etkiyen yük altında kayacın ne kadar esneyebildiğinin ve ne zaman kırılacağına göstergesidir. Beton, metal, seramik vb. malzemeler tekdüze bir kompozisyona sahip oldukları için laboratuvar ortamında elde edilen değerlerin direkt olarak arazi ortamında da kullanılması mümkündür. Ancak bu durum kayaçlar için söz konusu değildir. Arazi ortamında fay, tabakalanma, şistozite, makaslama zonu, çatlak, eklem, su, asidik-bazik ortam gibi birçok faktör kayacın dayanımını etkilemektedir. Dolayısıyla laboratuvar ortamında yapılan çalışmaların arazi ortamına direkt olarak aktarılması mümkün olmamaktadır. Arazi koşullarının bütünü temsil edecek şekilde mekanik deneyler yapılmadıkça sonuçlar o kayacı temsil edemez.

Fakat bu tür süreksizlik içeren kayaların özelliğini belirleyecek boyutta numune almak ve laboratuvar ortamında deney düzeneği oluşturmak pek mümkün değildir. Bundan dolayı araştırmacılar kaya kütlesi sınıflama sisteminde kullanılan kaya malzemesi ve süreksizliklerini de içine alan çeşitli sınıflama sistemleri geliştirmişlerdir (Karpuz 2008 ve Bhvani, 2011). Tünel ve şevlerde bulunan farklı boyutlardaki kaya kütlesi içinde bulunan süreksizlikler şematik olarak Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yer altı ve yerüstü yapılarına ait süreksizlik içeren temsili kesitler (Hoek Brown, 1997)

### 2.1.3.1. Tek eksenli basınç dayanımı

Tek eksenli basınç dayanımının ölçümü ve tahmini maden, inşaat, jeoloji, jeofizik mühendisliği yapı ve tasarım çalışmalarında önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Kaya mühendisliğinde ise kaya malzemesinin yenilme özelliklerinin belirlenmesinde ve kaya kütle sınıflamalarında en yaygın olarak kullanılan mekanik testtir. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı hem Amerikan Test Malzemesi Derneği hem de Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği tarafından önerilen deney yöntemlerine göre yapılmaktadır (Dehghan, 2009).

Tek eksenli basınç dayanımı, belirli bir geometriye sahip kayaca herhangi bir yanal basınç olmaksızın tek bir yönde etki eden kuvvet karşısında kırılmaya karşı göstermiş olduğu maksimum dayanım olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle kayacın kırılma

olayı gerçekleşmeden duraylılığını koruduğu maksimum dayanımdır. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımına etki eden deneysel parametreler;

**Numunelerin boy/çap (L/D) oranı:** L/D oranı azaldıkça yan basınç etkisi arttığından kayacın dayanımı artarken, L/D oranı arttıkça bükülme meydana geleceğinden kayacın dayanımı azalmaktadır.

**Yükleme Hızı:** Kayaç üzerine etki eden yükün hızı azaldıkça dayanımda azalma olurken yükleme hızının artması ile dayanımda artış meydana gelir. Bu durum düşük yükleme hızında, yükün örnek üzerine daha uzun süre etkimesinden dolayı kayacın bir miktar sünme yapmasından kaynaklanmaktadır (Felekoğlu ve Türkel, 2004).

**Numune Büyüklüğü:** Kayaçlar genellikle heterojen yapıya sahip oldukları için numune ebatları büyüdükçe süreksizliklerin artmasına bağlı olarak dayanımında azalma meydana gelmektedir.

**Nem Oranı:** Kayaçlar genellikle gözenekli yapıya sahip olup belirli oranlarda su emerler. Su kaya malzemesini oluşturan tanelerin arasına girerek zayıflık düzlemleri oluşturmaktadır. Porozitesi yüksek olan kayacın su emme yüzdesi de yüksek olacağından tek eksenli basınç dayanımı düşük çıkmaktadır.

**Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin paralelliği:** Yüklemenin numunenin düşey eksenine paralel olması ve yükün de üniform bir biçimde dağılması gerekmektedir. Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin paralelliği ve bu yüzeylerin yanal yüzeye göre dikliği deney sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır.

Kaya kütlesi sınıflamalarında kullanılan en önemli parametre tek eksenli basınç dayanımı değeridir. Kayaçların dayanım özelliklerini kullanarak arazi ortamına uyarlanmasında en yaygın olarak Deere ve Miller (1966) sınıflaması kullanılmaktadır. Çizelge 2.4'te Deere ve Miller 1966, Çizelge 2.5'te ise ISRM 1978 tarafından önerilen kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması verilmiştir (ISRM, 1978b).

Çizelge 2.4. Deere ve Miller 1966'a göre kayaçların tek eksenli basınç dayanımı sınıflaması

Sınıf	Tanım	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
A	Çok Yüksek	>2200
B	Yüksek	1100-2200
C	Orta	550-1100
D	Düşük	275-550
E	Çok Düşük	<275

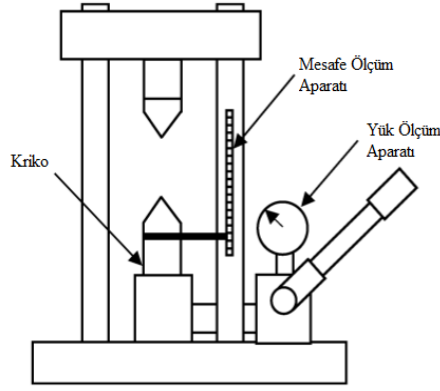
Çizelge 2.5. ISRM 1978'e göre kayaçların tek eksenli basınç dayanımı sınıflaması (ISRM, 1978b)

Sınıf	Tanım	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Değerleri (MPa)
A	Çok Yüksek Dayanımlı	>225
B	Yüksek Dayanımlı	225-101
C	Orta Dayanımlı	100-50
D	Orta- Düşük Dayanımlı	50-26
E	Düşük Dayanımlı	25-6
F	Çok Düşük Dayanımlı	5-1

### 2.1.3.2. Nokta yükleme dayanımı

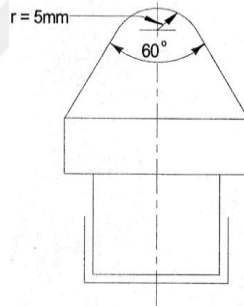
Nokta yükleme dayanımı deneyi, iki konik uç (platen) arasına yerleştirilen kayaç örneğinin düşey yönde etki eden noktasal kuvvet altında kırılması esasına dayanmaktadır. Nokta yükleme dayanımı, kaya malzemelerinin mukavemetinin tayininde, kaya kütlesi sınıflandırılmasında, tünel açma makinelerinin hızı ve elmas ucunun uygunluğunun tayin edilmesinde, kayaçların anizotropi özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kayaçların tek eksenli basınç ve çekme dayanımlarını dolaylı yoldan tahmin edilmesinde de yaygın biçimde kullanılmaktadır (Karaman ve Kesimal, 2012). Şekil 2.5'te nokta yükleme test cihazının şematik görünümü verilmiştir.





Şekil 2.5 Nokta yükleme test cihazının şematik görünümü (Ulusay vd., 2011)

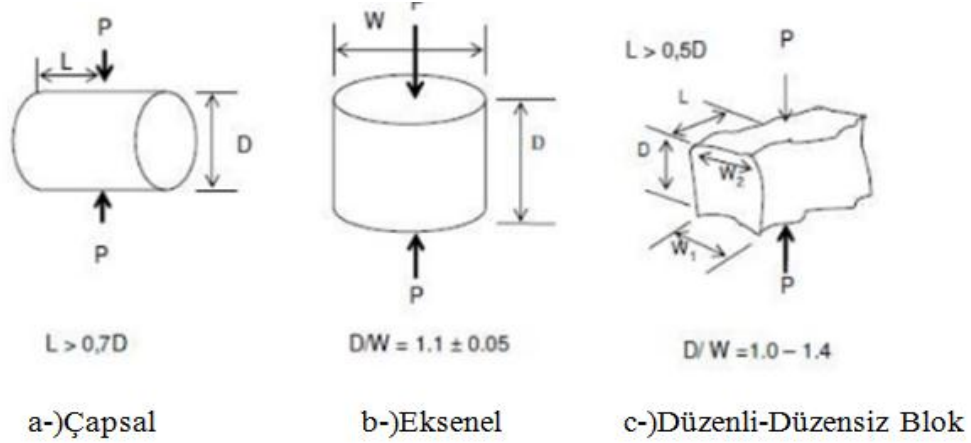
Nokta yükleme dayanımı testlerinde 60°'lik bir açığa sahip konik uçlar ve uç kısmının yarıçapı 5 mm olan test aparatı kullanılmalıdır. Şekil 2.6'da nokta yükleme test cihazının konik ucuna ait şematik görüntü verilmiştir. Konik uçlar arasındaki mesafenin uygun olmaması ve konik ucun çok sivri olması deney sonucunu olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca konik uçlar yeterince sert malzemeden üretilmemişse zaman içerisinde uçların sivriliği azalmakta ve yükleme alanı genişlemektedir (Ulusay vd., 2011).



Şekil 2.6 Konik ucun şematik görünümü (Ulusay vd., 2011).

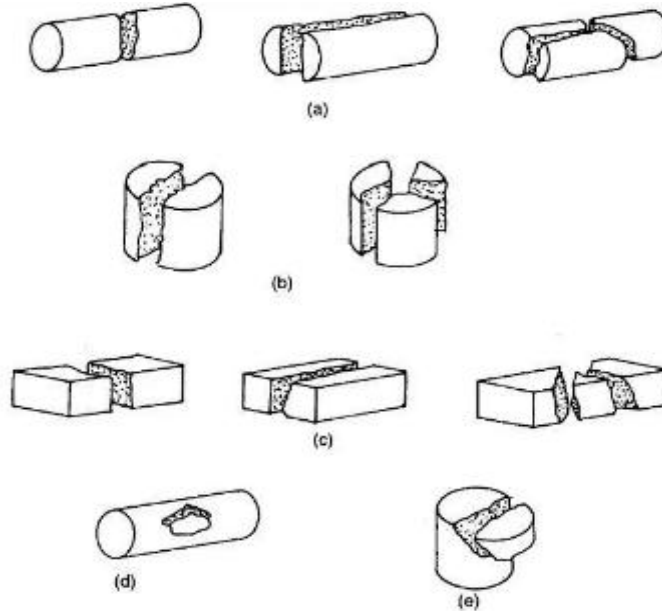
Nokta yükleme testinin ucuz, portatif ve hızlı olmasının yanı sıra en önemli avantajı deneysel çalışmalarda kullanılan numune boyutlarının esnek olmasıdır. Test için karot örnekleri (çapsal ve aksenal yükleme için), düzgün kesilmiş blok numune ve düzensiz şekle sahip örnekler kullanılabilir. Numune hazırlama işlemi hızlı ve kolay olduğu için kayacın arazi ortamındaki (doğal nem içeriğine sahip) mekanik özelliğinin tayin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Test edilecek numune, şekline bağlı olarak dikey veya paralel yönde konik plakalar arasına yerleştirilir. Nokta yükleme testi örneklerin test sırasında nasıl yerleştirildiğine ve örnek boyutları arasındaki oranlara göre çapsal, aksenal veya düzenli-düzensiz blok olmak üzere üç farklı yöntemle

gerçekleştirilmektedir. Örneklerin test sırasında nasıl yerleştirildiğine ve örnek boyutları arasındaki oranlara ilişkin parametreler Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Şekil 2.8'de belirtilen örnek, ebatlarına uygun biçimde hazırlandıktan sonra çapsal test için konik plakalar arasında dik olarak yerleştirilirken aksel test için paralel yerleştirilir (Ulusay vd., 2011).



Şekil 2.7. Nokta yükleme testi için örnek ebatları (Ulusay vd., 2011)

Kırılma yüzeyi Şekil 2.8'de gösterildiği gibi sadece bir yükleme noktasından geçerse test reddedilmelidir. Buna göre; a- Geçerli çapsal testleri, b- Geçerli aksel testleri c- Geçerli blok testleri, d- Geçersiz çapsal testi, e- Geçersiz aksel testi ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Nokta yükleme dayanım testlerinde geçerli ve geçersiz kırılma tipleri (Ulusay vd., 2011)

Çizelge 2.6’da Bieniawski 1975’e göre kayaçların nokta yükü dayanım indekslerine göre sınıflaması verilmiştir (Bieniawski 1975).

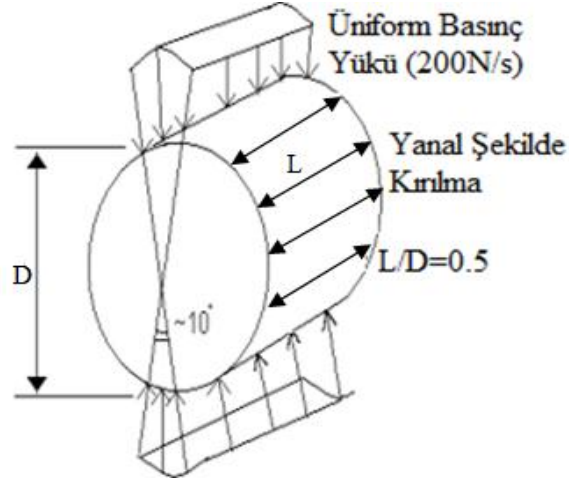
Çizelge 2.6. Bieniawski 1975’e göre kayaçların nokta yükü dayanım indekslerine göre sınıflaması (Bieniawski 1975).

Kaya Sınıfı	Nokta Yükleme Dayanımı İndeksi (MPa)
Çok düşük dirençli	<1
Düşük dirençli	1-2
Orta dirençli	2-4
Yüksek dirençli	4-8
Çok yüksek dirençli	>8

### 2.1.3.3. Brazilian (dolaylı çekme) dayanımı

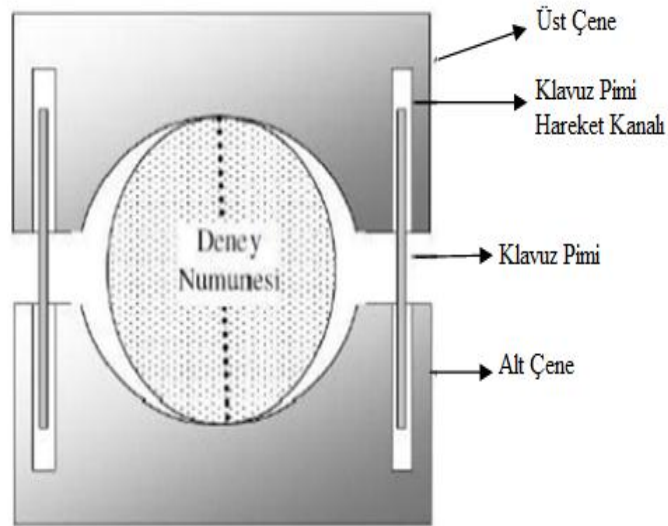
Kayaçların çekme dayanımı, kayacın deformasyon özelliğini, kazılabilirlik indeksini ve patlatma verimini etkileyen en önemli parametreler arasındadır. Kayaçların çekme dayanımı doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. Kayaçların doğrudan çekme dayanımı testi zahmetli, pahalı ve zaman alıcı bir test yöntemidir (Claessona ve Bohlohi, 2002). Carneiro ve Barcellos (1953), tarafından geliştirilen Brazilian (dolaylı yoldan çekme) testi ise, ucuz, pratik ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Bu test metodu, farklı türdeki anizotropik kayaçların, betonun, asfaltın, camın ve diğer birçok kırılabilir malzemelerin homojenliğinin belirlenmesinde tercih edilmiştir. Ayrıca Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği, kaya malzemelerinin çekme mukavemetini belirlemek için kullanılan bu dolaylı yöntemin uygunluğunu önermiştir (ISRM, 1981).

Disk şeklindeki kaya numunelerinin tek bir ekseninden, birbirine zıt yönde etki eden kuvvetlere karşı göstermiş oldukları direnç Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Numune üzerine etki eden yük düşey ekseninde olmasına rağmen örneğin yenilmesi yatay ekseninde meydana gelen çekme (Şekil 2.9) gerilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.9. Disk numunenin kırılma şekli (Ulusay vd., 2011)

Kayaçların dolaylı yoldan çekme dayanımı tayininde, disk şeklinde hazırlanmış örneğe çapsal olarak temas edecek şekilde sertleştirilmiş metalden imal edilen yükleme çeneleri ve kılavuz saplamalarından oluşan düzenek kullanılır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak aparatın çene yarıçapı örnek yarıçapının 1.5 katı ve çene genişliği ise örnek kalınlığının 1.1 katı olmalıdır. Şekil 2.10'da Brazilian çekme dayanımı için kullanılan aparatın şematik görünümü verilmiştir.

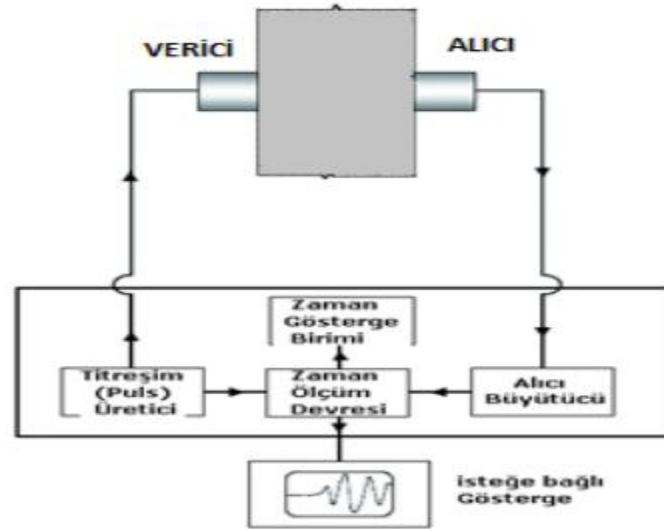


Şekil 2.10. Brazilian aparatının şematik görünümü (Ulusay vd., 2011)

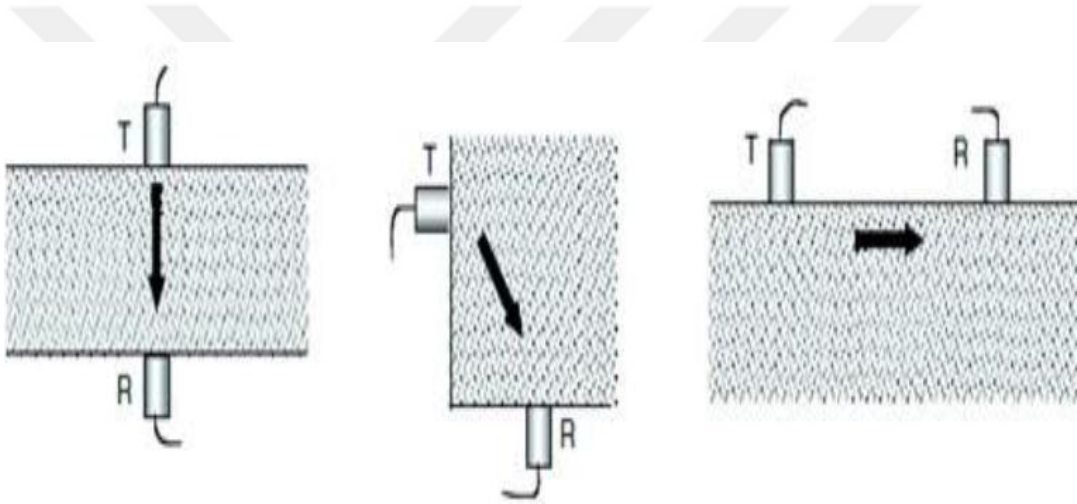
#### 2.1.3.4. Ultrasonik dalga hızı

Kayaçların mekanik özellikleri kayalık yamaçların stabilitesi, yeraltı kazıları, tüneller, barajlar, derin çukurlar ve mağaraların duraylılığı dâhil olmak üzere inşaat ve madencilik kazılarının planlanmasında ve tasarlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu mekanik özelliklerinin laboratuvarında olduğu gibi arazi koşullarında belirlenmesi de zor, zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu nedenle kayalardaki mekanik özelliklerin dolaylı fakat güvenilir yöntemlerle belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir (Khandelwal ve Ranjith, 2010). Maden, inşaat, jeoloji ve geoteknik mühendisliği çalışmalarında ultrasonik dalga hızı yöntemi, hasarsız, kolay uygulanabilir ve güvenilir olması nedeniyle beton ve kayaç numunelerinin mekanik (dayanım) özelliklerini değerlendirmek için sıklıkla tercih edilen tekniklerden birisidir. Ultrasonik dalga yayılımı üç farklı dalga formuna sahiptir. Bunlar P-dalga (eksenel-boyuna), S-dalga (kesme) ve R-dalga (Rayleigh) yayılımı olarak ifade edilmektedir. En hızlı hareket eden dalga formu P-dalgası iken, R- dalgası malzemenin sadece yüzeyi boyunca hareket etmektedir (Sharma ve Singh, 2008). Kaya mekaniği çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan P ve S dalga hızları olup tane boyutu ve şekli, yoğunluk, gözeneklilik, anizotropi, nem içeriği, sıcaklık, dolgu malzemesi gibi parametreler dalga hızını etkilemektedir (Kahraman, 2001b).

Deneyde numuneye bir gönderici prop (T) tarafından dalga gönderilirken diğer alıcı prop (R) tarafından kaydedilir (Şekil 2.11). Ultrasonik dalganın hızı ise numune boyutunun dalganın varış süresine oranı olup birimi m/sn'dir. Doğrudan, yarı doğrudan ve dolaylı olmak üzere üç farklı ölçüm yöntemi bulunmaktadır (Şekil 2.12). Boyuna dalgalar alıcı yüzeyine dik bir şekilde yayılarak ulaştıklarından bu üç ölçüm arasında en güvenilir olan doğrudan yöntemdir. Aynı malzeme ve aynı mesafe için yapılan doğrudan ve dolaylı ölçüm sonucunda, dolaylı ölçümden elde edilen hızın daha düşük olduğu görülmüştür (Leslie, 1976).



Şekil 2.11. Ultrasonik hız testinin uygulamasına ait akım şeması (Tarun vd., 2004)



Şekil 2.12. Ultrasonik hız ölçüm konfigürasyonu (T=verici, R=alıcı) (Tarun vd., 2004)

Son zamanlarda hem laboratuvar hem de arazi koşullarında kayaçların özelliklerini ultrasonik yöntemler ile saptamak yaygınlaşmıştır. Ultrasonik hızlar ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımının tahmin edilmesinin yanı sıra ayrışma derecelerinin belirlenmesi, kaya kütlesi özelliklerinin ve yapı taşlarındaki ayrışma derinliğinin tahmin edilmesi, kazı çalışmalarında uygulanan patlatmaların kayaçlar üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gibi kaya mekaniği arazi çalışmalarında kullanılmaktadır (Karaman ve Kesimal, 2013).

### 2.1.3.5. Yarı dairesel eğilme (SCB) dayanımı

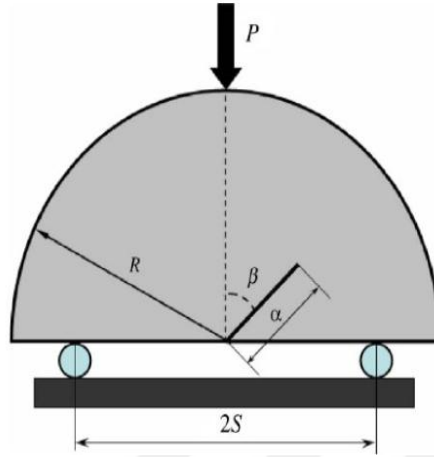
Kırılma tokluğu, kırılma malzemelerin daha uzun süre kullanılabilirliğini belirlemek için oldukça önemli bir parametredir. Kayaçalarda, çatlak oluşumunun başlamasına ve yayılımına direnecek esas kaya parametresi kayacın kırılma tokluğudur. Bu parametre kaya kırılma mekaniğinde en temel malzeme sabiti olup laboratuvar testleri ile saptanabilmektedir. Arazi ortamındaki mühendislik çalışmalarında kırılma mekaniği açısından kayacın bünyesinde doğal olarak var olan süreksizliklerin veya çatlakların etkilerinin göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir (Şener, 2002; Chen, 2008).

Chong ve Kuruppu (1984), üç nokta yükleme altında tek kenar çentikli yarı dairesel karot örneği ile kaya ve kaya benzeri malzemelerin kırılma tokluğunun ölçülebileceğini önermiştir. Üç nokta yükleme altında SCB örneğinin şematik görünümü Şekil 2.13'te verilmiştir. Bu yöntem ilk olarak malzemelerin normal yükleme altında Mod I kırılma tokluğunu belirlemek için kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda, diğer kırılma modları içinde yaygın olarak tercih edilmeye başlamıştır.

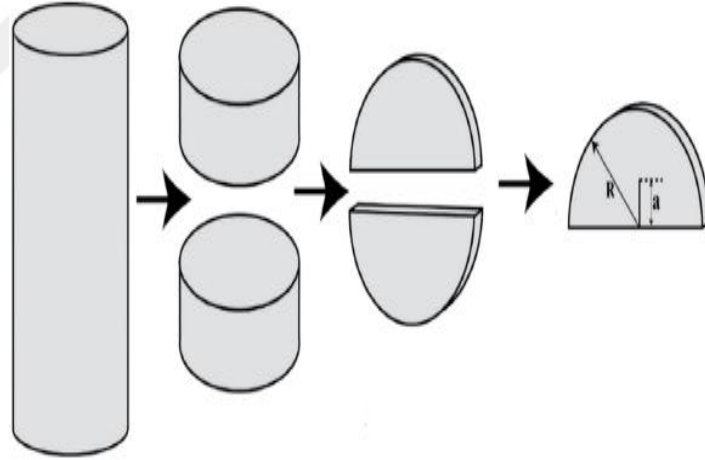
Son yıllarda SCB testi basit, pratik ve numune hazırlamasının kolay oluşu gibi olumlu özelliklerinden dolayı kayaç, beton, seramik, asfalt karışımları ve kutup buzlarının kırılma parametrelerinin belirlenmesinde uygulanmıştır. Ayrıca karışık mod kırılma tokluklarının tespitindeki kolaylığı ve güvenilirliği nedeniyle yöntemle ilgi artmıştır. Buna ek olarak dinamik kırılma testlerinde, yükü üniform bir biçimde dağıtmasından dolayı özellikle tercih edilmektedir. Bu avantajlarından dolayı SCB örneğinin statik ve dinamik mod I kırılma tokluğu ölçümleri ISRM tarafından kabul görmüştür (Zhou vd., 2012; Kuruppu ve Chong, 2012).

V çentikli Brazilian numuneler disk şeklinde kesildikten sonra orta kısmına çentik açılması için kalifiye eleman ile pahalı teçhizata gereksinim duyulmaktadır. Bunun aksine yarı dairesel numuneler üzerinde çentik açma işlemi daha kolay olup numuneler deney standardına uygun biçimde hazırlanabilir (Şekil 2.14). Ayrıca aynı dairesel numunedan iki adet elde edilmesi de malzemenin homojenliğini ve sonucun güvenilirliğini artırmaktadır (Huang vd., 2005). Belirlenmesi oldukça önem arz eden ve aniden gerçekleştiği için tehlikeli olabilen kırılma türü olan Mod I kırılma değeri, yarı dairesel numunelere

uygulanan yüke zıt yönde belirli bir çentik açılması esasına dayanan bir deney tasarımıdır (Marasteanu, 2004).



Şekil 2.13. Üç nokta yükleme altında SCB örneğinin şematik görünümü (Ayatollahi vd., 2006)



Şekil 2.14. SCB numune hazırlama işlem şeması (Saha ve Biligiri, 2016)

SCB yönteminin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz;

- Çentiğin açılması oldukça basit ve pratiktir.
- Deney kurulumu kolaydır.
- Yükleme işleminde çekme yerine basma kuvveti uygulanması avantajdır.
- Kaya, seramik, beton vb. gevrek malzemeler için uygundur.
- Boyut etkisini araştırmak için numune hazırlanması kolaydır.
- Kolay ve hızlı bir şekilde veri toplama imkânı sağlamaktadır.



#### 2.1.4. Kayaçların kimyasal, mineralojik ve petrografik özellikleri

Mineraller yerkabuğunun yapı taşlarını oluşturmaktadır. Minerallerin bir araya gelmesiyle oluşan kayaçlar genellikle heterojen ve anizotrop yapıya sahiptir. Minerallerin bileşimleri ve dokusu kayaçların hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini etkileyen ana parametrelerdir. Çimentolanma derecesi yüksek olan mineral topluluğundan oluşan kayacın porozite değeri düşük olup mekanik dayanımı yüksek çıkmaktadır. Ayrıca mineralleri birbirine bağlayan dolgu malzemesi de kayacın dayanımını önemli derecede etkilemektedir.

Yerbilimleri ile ilgili mühendislik çalışmalarında, kayaç üzerine yapılması planlanan projelerde arazi yapısının doğru ve güvenilir yöntemler ile analiz edilmesi gerekmektedir. Böylelikle, yer altı ve yer üstü maden işletmelerinin hazırlık ve üretim faaliyetleri, baraj, tünel, patlatma tasarımı gibi çalışmaların, duraylılığı ve maliyeti açısından fayda sağlamaktadır. Araziye ait kayacın formasyon özellikleri belirlenirken hem laboratuvar hem de arazi deneyleri ile fiziko-mekanik özelliklerinden yararlanılmaktadır. Kayaçların fiziko-mekanik özellikleri ile mineral özellikleri arasında güçlü ilişkiler olduğu bilinmektedir (Öndül vd., 2014). Fahy ve Guccione, 1979; Shakoor ve Bonelli,1991; Tuğrul ve Zarif (1999), sedimanter kökenli kayaçlar üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ile kuvars içeriği arasında güçlü ilişkiler olduğunu ifade etmişlerdir. Kuvars içeriğindeki artışın kayacın tek eksenli basınç dayanımını artırdığını belirlemişlerdir. Bu yüzden hem kayacın mineral içeriği hem de kayaç içerisindeki minerallerin yüzdelik oranlarını belirlemek kaya mühendisliği çalışmalarında önem arz etmektedir.

Kayaçları oluşturan minerallerin kristal şekli, tane dizilimi, tane boyut dağılımı, gözenek boyutları, çimentolanma durumu, renk dağılımları, kılcal çatlakları, kimyasal içerikleri, bağlayıcı madde miktarı ve cinsi gibi parametrelerin belirlenmesinde x-ışını kırınımı (XRD), x-ışınları floresans spektromtresi (XRF), SEM ve ince kesit analizleri kullanılmaktadır.

### 2.1.4.1. X-ışını kırınım yöntemi (XRD)

X-ışınları kırınımı 1912 yılında Von Laue tarafından keşfedildikten sonra günümüze kadar endüstri ve bilime oldukça önemli katkılar sağlamıştır. X-ışınları toz kırınım yöntemi sayesinde katı bir numunedeki kristaller ve bileşikler hakkında kalitatif ve kantitatif bilgi sağlanmaktadır. Her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimi bulunmaktadır. Malzemelerin yapısını tayin etmede kullanılan XRD yöntemi, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanarak geliştirilmiştir. XRD yöntemi gama ışınlarından zayıf fakat X-ışını diye adlandırılan ultraviyole ışınlarından daha güçlü enerjiye sahip ışın kullanılarak gerçekleştirilir (Van Grieken ve Markowicz, 1992).

XRD analizinde oldukça az miktarda malzeme kullanılması ve numuneye zarar vermemesi bu yöntemin en önemli avantajlarından birisidir. X-Ray Diffractometer diye adlandırılan aletler ile yapılan bu karakterizasyonda örnek türüne bağlı olarak değişik uygulamalar görülmektedir. Çalışma prensibi olarak örneğe X-ışını göndererek dalganın kırılma ve dağılma verilerininin toplanması esasına dayanmaktadır. Malzemenin kristal yapısına göre malzeme üzerine gelen ışını farklı açı ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde analiz edilebilmektedir. XRD yöntemini bu kadar değerli kılan şey kristal yapılarında parmak izi hassaslığında veri toplayabilmesi ve güvenilir olmasından kaynaklıdır (Bertin, 1975). Yöntem, seramik, metal, alaşım, maden, çimento, beton gibi birçok malzeme özellikleri tayininde kullanılmaktadır. Şekil 2.15’de X-ışını üreten sol üst başlık ile sağ üst başta bulunan dedektör birbirine V şeklinde belirli bir açıyla bağlanmıştır. Orta haznesi ise numune tayin edilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 2.15. Örnek XRD cihaz

#### 2.1.4.2. X-ışınları floresans spektrometresi (XRF)

X-ışınları floresans spektroskopisi (XRF) kaya, beton, seramik vb. malzemelerin elementel içeriğini belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden birisi olup kantitatif (nicel) analiz yapmaktadır. XRF ile kayaların MnO, MgO, CaO, FeO gibi birçok ana element oksitleri yüzde (%) ağırlık cinsinden belirlenebilmektedir. Kimyasal bağ derecesinde yeterince hassas olmadığı için atom numarası 9'un altında olan elementleri inceleyemezken 9 ile 92 arasında olan elementlerin kantitatif analizini yapmakta oldukça güvenilir bir yöntemdir (Brouwer, 2003).

XRF analiz yöntemi, analiz edilecek malzeme üzerine gönderilen X-ışınından meydana gelen ikincil X-ışınlarının karakteristik dalga boyu ve şiddetinin ölçülmesiyle nitelendirici ve nicelendirici element analizinin yapıldığı tahribatsız bir analitik muayene yöntemidir. Kalitatif ve kantitatif analiz yapan XRF cihazı bünyesinde yer alan özel bir kristalde ışınların kırınımına uğraması sonucu dalga boylarına ayrılması ve şiddetlerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Yılmaz, 2005).

Cihaz dört önemli ünitelerden oluşmaktadır. Bunlar, XRF spektrometresi, floresans X-ışınlarının analiz edildiği analizör ünitesi, kapalı devre su soğutma ünitesi ve örnek odasıdır. Birincil X-ışınlarını elde etmek amacıyla X-ışınları tüpü kullanılmaktadır. X-ışınları tüpünden birincil X-ışınları elde edilmesi sırasında X-ışınları tüpü oldukça yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Dolayısıyla tüpün ve numunenin zarar görmemesi için devamlı olarak soğutulması gerekmektedir. Bundan dolayı kapalı devre su soğutma ünitesi kullanılmaktadır. Birincil X-ışını bombardımanına maruz kalacak olan numunenin bulunduğu kısmın, kurşundan imal edilmiş olan ve yüksek vakum altında muhafaza edebileceği bir örnek odası bulunmaktadır. Numunenin uyarılması sonucunda örnek atomlarının yaydığı dalga boyları, floresans X-ışınlarının analiz edildiği analizör ünitesi kısmında ölçümü gerçekleştirilmektedir (Somogyi vd., 1997; Marina ve Blanco Lopez, 2001).

XRF yöntemi ile element analizi, jeoloji, mineraloji, metalürji, malzeme bilimi, kimya, boya endüstrisi, değerli taş, petrol (yakıt) analizi, tarım, arkeoloji, gıda teknolojisi, sanat tarihi gibi değişik disiplinlerde kullanılmaktadır.

### 2.1.4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lu yıllarda geliştirilen Taramalı Elektron Mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope)'in çalışma prensibinde, yüksek enerjili elektron ışınları oldukça küçük bir alan üzerinde numune yüzeyine odaklanır ve numune yüzeyini taramaya başlar. Bu teknik ile numune yüzeyinden farklı tür sinyaller elde edilmektedir. Bunlar geri saçılmış elektronlar, Auger elektronları, X-ışını flüoresans fotonları, ikincil elektronlar ve değişik enerjili diğer fotonlardır. Bütün bu sinyaller yüzey çalışmalarında kullanılmış olmakla beraber, bunların içinde en yaygın olanı, elektron mikroprob analizde kullanılan X- ışını emisyonu ve taramalı elektron mikroskopisinin temelini oluşturan geri saçılmış ve ikincil elektronlarıdır.

SEM görüntüleri, maden, jeoloji, inşaat, malzeme bilimi, kimya ve biyoloji gibi birçok çalışma alanında malzemenin katı yüzeylerine ait fiziksel niteliği hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak için oldukça önemli bir yer kaplamaktadır.

Taramalı elektron mikroskobu ile malzeme yüzeyi yüksek enerjili bir elektron demetiyle taranmakta ve malzeme yüzeyinden farklı tür sinyaller toplanmaktadır. Toplanan sinyaller ise sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern teknoloji sistemlerinde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır.

SEM optik kolon, görüntüleme sistemi ve numune hücresi olmak üzere üç temel kısımdan oluşur. Optik kolon kısmında; elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, ince elektron demeti elde etmek için kondenser mercekleri, bu merceğe bağlı farklı çaplara sahip aparatlar ve elektron demetinin malzeme yüzeyini taraması için tarama bobinleri bulunmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile malzeme girişimi sonucunda oluşan farklı elektron ve ışınları toplayan dedektörler, sinyal çoğaltıcılar ve malzeme yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

#### 2.1.4.4. İnce kesit analizi

Kayaçların dokusal özellikleri, kayacın kristalleşme derecesi, tane büyüklüğü ve kayacı oluşturan bileşenlerin geometrik ilişkilerini ifade etmektedir. Kayaçların dokusal özelliklerinin belirlenmesinde ilk olarak tanelerin tanımlanması için geometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için kayaca ait tane açısı, tane şekli, tanelerin birbirine bağlanma derecesi, tanelerin özelliklerinin birbirleri ile olan ilişkisi ve matriksin büyüklüğünün bilinmesi gerekmektedir (Öztürk, 2006).

1986 yılında Howarth ve Rowlands, kayaçların dokusal özelliklerini nicel olarak ifade etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar dokuyu meydana getiren tanelerin geometrik özelliklerini belirlemiş ve bu sayede kayaç dokusal özelliklerini nicel olarak ifade etmişlerdir. Bu nicel tanım ise doku katsayısı (TC; texture coefficient) olarak literatüre kazandırılmıştır. Böylelikle, kayaçların dokusal özellikleri ve fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak ifade etme imkânı sağlanmıştır (Howarth ve Rowlands 1986).

Kayaçların dokusal özelliklerini nicel olarak ifade etmek için kayaç dokusunu oluşturan tanelerin geometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu geometrik özellikler ise kayaçlardan alınan ince kesitlerin mikroskop altında incelenmesi ve görüntülerinin elde edilmesiyle mümkündür. Elde edilen görüntü üzerinde kayaç dokusunda yer alan her bir tanenin geometrik özelliklerini temsil eden belirleyici parametreler bulunmaktadır. Bunlar tanenin uzunluğu, genişliği, açısı (tane oryantasyonu), çevresi ve analiz için seçilen referans alan içerisindeki matriks malzemesinin alanıdır (Howarth ve Rowlands, 1986). İnce kesit analizi sonucunda elde edilen iki boyutlu görüntüler ile bu parametrelere ait özellikler belirlenerek kayaç dokusunu nicel olarak ifade etmek mümkündür.

## 2.2. Kırılma Mekanikliği Temelleri

### 2.2.1. Kırılma

Kırılma, bir malzemenin dışarıdan etki eden yük altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayıdır. Kırılma olayı aşamalı olarak gerçekleşmekte olup ilk aşaması çatlak oluşumudur. Çatlak belirli bir kritik uzunluğa ulaşıncaya kadar ilerlemekte ve kararsız bir şekilde büyüyerek kırılma olayı gerçekleştirmektedir. Kırılmanın karakteri malzemenin malzemeye değişmekte ve genellikle etki eden gerilmeye, sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kırılma tokluğu ise kırılma meydana gelmesi için çatlak oluşumu ve gelişimine karşı, malzemenin direncini belirlemek için kullanılan bir mühendislik parametresidir. Kısaca ifade edecek olursak bir malzemenin kırılma tokluğu, çatlak oluşumuna ve kırılmasına karşı göstermiş olduğu dirençtir (Whittaker vd., 1992).

Griffith'in teorisinde yapılan değişiklikler kırılma mekanikliği alanında gelişmelere yol açmıştır. Kaya kütlelerinin bünyesinde boşluk, kırık, çatlak gibi süreksizlikler bulunduğu için kırılma mekanikliğinin kayaya uyarlanması aşamasında zorluklar yaşanmaktadır. Kaya mekanikliği uygulamalarında kırılma mekanikliği yadsınamaz bir yere sahip olmasına rağmen, kaya malzemesi için konu geliştirilmemiştir. Kırılma mekanikliği çalışmalarında insan yapımı malzemeler (metal gibi) ile doğada mevcut olan malzemelerin (kayaç gibi) mühendislik uygulamasında farklılıklar göstereceği dikkate alınmalıdır.

Whittaker (et al., 1992) tarafından ele alınan bu farklılıklar şunlardır:

1- Stres Durumu (Stress state): Pek çok kayaç düşey yönde uygulanan kuvvete maruz kalsa da çekme yönünde etkileyen kuvvet ile yenilmektedir.

2- Kayaç Kırılması (Rock fracture): Kayaçlar genel olarak gevrek veya yarı gevrek yapıda kırılırlar. Genellikle plastik akış sergilemezler.

3-Kırılma ucu zonu (Fracture process zone (FPZ): Kayadaki çatlak ucunun önünde elastik olmayan davranışlar, kesme gerilmelerine karşı mikro çatlama şeklini alır. FPZ'nin boyutu küçükse, doğrusal elastik kırılma mekanikliği geçerlidir.

4- Çatlak Yüzeyi (Crack surface): Doğrusal elastik kırılma mekaniğine göre düzlemsel bir çatlağın yüzeyinde hiçbir kuvvetin iletilmediği varsayılmaktadır. Fakat bu durum kayaç için mümkün olmamaktadır.

5-Çatlak Yayılımı (Crack propagation): Kayalarda çatlak yayılımı tane sınırları veya zayıflık düzlemleri boyunca “dolaşmaya” eğilim göstermektedir. Yeni oluşturulan yüzeyin alanı daha sonra varsayılan kırık alanına nazaran daha büyüktür.

6-Kaya kırılma mekaniği uygulamaları (Rock fracture mechanics applications): Malzeme mühendisliğinde olduğu gibi kaya mekaniği çalışmalarında da kırık büyümesinin önüne geçilmesi ile yenilmenin önlenmesi oldukça önemlidir. Fakat çatlakların oluşturulması ve yayılmasını optimize etmek oldukça zordur.

7- Ölçeğin etkisi (Influence of scale): Karmaşık jeolojik yapıları nedeniyle, kaya kütlelerinin karakterizasyonu oldukça zordur. Laboratuvar çalışmalarında genellikle kaya malzemesi ele alındığından dolayı arazi ortamına uygulanırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

8-Heterojenlik ve Anizotropi (Heterogeneity and Anisotropy): Çatlak ucunda oluşan kuvvetlerdeki değişiklikler, çatlak büyümesinin sürekliliğini etkilemektedir.

9-Süreksizliklerin varlığı (Presence of discontinuities): Önceden var olan süreksizlikler stres durumlarını ve çatlak yayılımını etkiler (James, 2003).

Kaya kırılma mekaniğinin en temel özelliği kayacın yenilmesine etki eden kuvvet ile kırılmayla sonuçlanan kusurların geometrisi arasındaki bağlantının kurulabilmesidir. Bu ilişki aracılığıyla kayaların çatlak yayılmasına karşı direncini tanımlayan bir içsel malzeme özelliği (kırılma tokluğu) ölçülebilir. Örnek olarak boyut küçültme işlemlerinde kırılma tokluğunun kullanılması verilebilir (Bearman vd., 1989).

### 2.2.1.1 Makroskobik açıdan kırılma şekilleri

#### ***Sünek Kırılma***

Malzemeye ait çatlakların oluşması ve ilerlemesinde önemli miktarda kalıcı şekil değişiminin meydana geldiği kırılma türüdür. Sünek biçimde kırılan malzemelerin kırılma olayı anlık biçimde gözlemlenmez. Sünek kırılma olayında var olan veya sonradan meydana gelen çatlak veya çatlak gurupları yavaş ilerleme gösterir ve yüksek plastik deformasyon olayı gözlemlenir. Sünek kırılma gevrek kırılmaya kıyasla oldukça büyük enerji tuttuğu için sünek malzemelerin gerilme-gerinim eğrileri altındaki alan daha büyüktür. Ayrıca SEM görüntülerinde, kırılma yüzeyi mat ve lifli bir görünüme sahiptir (Perez, 2004).

#### ***Başlıca Sünek Kırılma Özellikleri;***

- Oldukça büyük miktarda plastik deformasyon gözlemlenmektedir.
- Kırılma tokluk değeri gevrek kırılmaya nazaran büyüktür.
- Kırılma yüzeyi bardak-kapak şeklindedir.
- Enerjinin en büyük kısmı çatlak oluşumu için harcanmaktadır.
- Mikro yapıdaki boşlukların bir araya gelmesiyle kırılma olayı gerçekleşir.

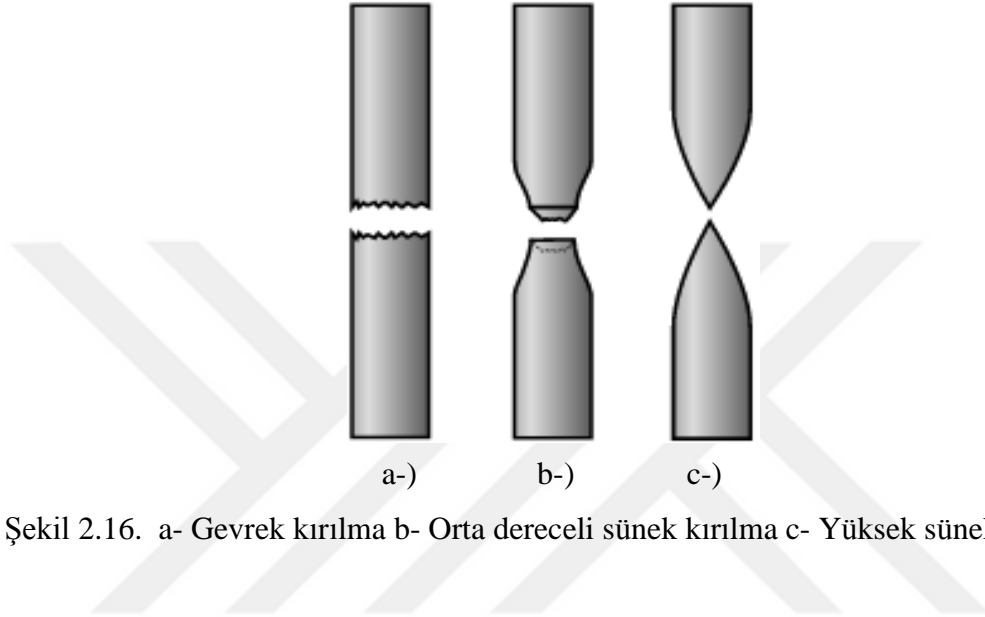
#### ***Gevrek Kırılma***

Kırılmanın ani biçimde meydana geldiği ve hiç denilecek kadar az plastik deformasyon gözlemlendiği kırılma şeklidir. Çatlakların ilerlemesi oldukça hızlı bir şekilde gerçekleşmekte ve büyük hasarlar meydana gelmektedir. Bu yüzden mühendislik çalışmalarında ileriki dönemlerde sıkıntı yaşanmaması için önlenmesi veya gerekli tedbirlerin alınması gereken bir kırılma türüdür. Genellikle heterojen yapıya sahip olan kayalar başta olmak üzere asfalt, beton, seramik ve bazı metal çeşitlerinde gevrek kırılma meydana gelmektedir. Gevrek malzemelere ait SEM görüntülerinde kırılma yüzeyi taneli ve parlak bir görünüme sahiptir. Gevrek kırılma türüne sahip malzemelerde çatlak hızlı biçimde ilerlediği için farkına varılması oldukça güçtür (Aran, 1981). Şekil 2.16'da sünek ve gevrek kırılmaların şematik görünümü verilmiştir.



### ***Başlıca Gevrek Kırılma Özellikleri;***

- Çok az sayıda veya hiç denilecek miktarda plastik deformasyon gözlemlenmektedir.
- Kırılma tokluk değeri sünek kırılmaya nazaran küçüktür.
- Kırılma yüzeyi düzgün bir şekildedir.
- Enerjinin büyük kısmı kırılma için harcanmaktadır.
- Kırılma, taneler arası veya tane içinde gerçekleşir.



Şekil 2.16. a- Gevrek kırılma b- Orta dereceli sünek kırılma c- Yüksek sünek kırılma

### **2.2.1.2. Mikroskopik açıdan kırılma şekilleri**

#### ***Ayrılma (klivaj) kırılması***

Genellikle en zayıf yüzey enerjisine sahip düzlemler klivaj düzlemler olarak tanımlanır. Eğer kırılma olayı ayrılma düzlemleri olarak bilinen bu düzlemlerde gerçekleşiyorsa ayrılma kırılması ya da klivaj kırılma olarak adlandırılmaktadır. Bu tür kırılmalarda; düzlemlere dik yöndeki normal gerilmeler atomlar arası bağı koparmak için ihtiyaç duyulan kritik değeri aşarsa klivaj düzlemine dik olan atomlar arası bağlar kopar ve ayrılma olayı gerçekleşir. Gevrek kırılmalar genellikle klivaj kırılma olarak gerçekleşir ve SEM görüntüleri incelendiğinde kırılma yüzeylerinin düz ve parlak olduğu görülür. Ayrıca tanelerin yapısı bozulmaz ve yüzey ışığı iyi yansıtır (Eryürek, 1993).

## ***Kayma kırılması***

Kayma kırılması, kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ve kayma direnci düşük olan atom bağlarının kopması ile meydana gelen kırılma olayıdır. Atomlar arası bağlarının kayma ve kopmasından oluşan bu tür kırılmalarda, bölgesel homojen olmayan plastik deformasyon görülmektedir. Kayma çatlakları genellikle maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu düzlemlerde ilerleme eğilimi göstermektedir. Buna ek olarak çatlakın ilerleme yönü malzemenin kafes yapısına, iç gerilmelere ve yükleme parametrelerine de bağlıdır. Malzemenin tane sınırları arasındaki bağın çeşitli etmenlerden kaynaklı olarak zayıflaması durumunda, tanelerin birbirlerinden ayrılması ile meydana gelir. Bu tip kırılma, taneler arası kırılma olarak adlandırılmaktadır (Aran, 1981).

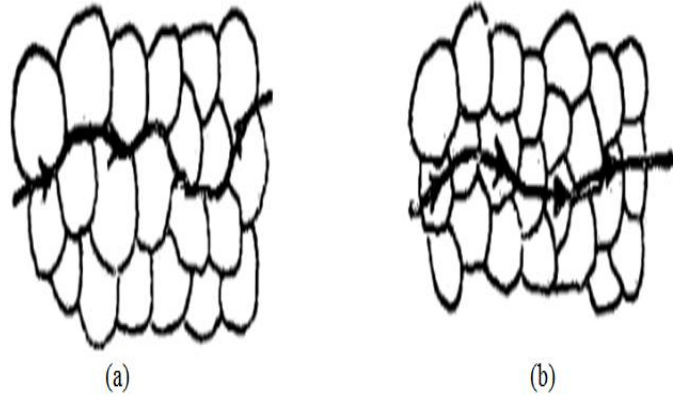
### **2.2.1.3. Kırılma Tipleri**

#### ***Taneler arası (intergranüler) kırılma***

Çatlak, tane sınırları yüzeylerini takip ederek tanelerin birbirinden ayrılması ile meydana geliyorsa bu tip kırılmalara taneler arası veya intergranüler kırılma denir.

#### ***Tane içi (transgranüler) kırılma***

Çatlak, taneler arası bağın oldukça güçlü olduğu ve malzemenin kohezyon kuvvetini yenemediği durumlarda daha düşük mukavemete sahip olan tane içlerinden ilerler. Bu şekilde taneleri keserek meydana gelen kırılmaya tane içi kırılma (transgranüler) adı verilmektedir. Kısaca ifade edilecek olursa, çatlak taneleri keserek ilerliyorsa tane içi, tane sınırlarını takip ederek ilerliyorsa taneler arası kırılma olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.17'de tane içi ve taneler arası kırılmaya ait şematik görüntü verilmiştir.



Şekil 2.17. a) Taneler arası (intergranüler) ve b) tane içi (transgranüler) çatlak ilerlemesi.

### 2.2.2. Kırılma mekaniği

Kırılma olayı katı cisimlerde başlıca iki evreden oluşmaktadır. Birinci evrede çatlak oluşumu, ikinci evrede ise çatlağın ilerlemesi gerçekleşir. Çatlaklar ve kusurlar yapı elemanlarında üretim esnasında veya daha sonra ki zamanlarda kötü çevre koşullarının etkisiyle de meydana gelebilir. Malzeme üzerine yük uygulanması veya kötü çevre şartlarına (donma-çözünme, ıslanma kuruma, asidik-bazik etiler vb.) maruz kalınması malzemenin yapısal bütünlüğünü ve dayanıklılığını zaman içerisinde azaltmaktadır. Kırılma mekaniği, malzemenin dayanıklılığı ve güvenilirliği hakkında bilgi vermenin yanı sıra malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde de kullanılmaktadır. Kırılma mekaniği, lineer elastik ve elastik-plastik kırılma mekaniği olma üzere iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır (Topçu, 1998).

#### 2.2.2.1. Griffith teorisi

Kırılma mekaniği kavramı, Griffith tarafından ilk kez 1920 yılında kırılmadan kaynaklı meydana gelen hasarın analizi için ortaya konulmuştur. Çatlak içeren ve gevrek bir malzeme olan cam üzerinde çatlakların nasıl ilerlediğinin incelemesiyle başlamıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, mevcut olarak cam yüzeyinde gözle görülmeyen mikro yapıdaki boşluk ve çatlakların camın mukavemetinde azalmaya neden olduğunu belirlenmiştir. Gerilme altındaki bir malzemede çatlak ilerledikçe yeni çatlak yüzeyleri oluşması için elastik gerilme enerjisinde azalma olacağı ifade edilmiştir. Başka bir deyişle,

gerilmelerden kaynaklı çatlak civarında oluşan elastik enerjinin, yeni oluşum gösterecek çatlak yüzeylerinin yüzey enerjisine eşit olması durumunda çatlak ilerlemeye başlayacaktır. Griffith, deneysel çalışmalardan elde ettiği verilerden faydalanarak gevrek bir malzemenin kırılma olayı gerçekleştirilmeden dayanabileceği gerilmeyi belirlemek için bir bağıntı elde etmiştir. Bu bağıntı Eşitlik 2.1’de verilmiştir.

$$\sigma_f = \left( \frac{2\gamma E}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada;

$\sigma_f$ = Kırılma gerilmesi

$\gamma$ = Yüzey enerjisi

$E$ = Elastisite modülü

$a$ = Çatlak boyunun yarısı

Griffith’in eşitliğine göre, malzemenin kırılmasına sebep olan gerilme miktarı ( $\sigma_f$ ), malzemede meydana gelen veya önceden açılmış çatlak boyu ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Griffith, deneysel çalışmalarında çatlağın ilerlemesi esnasında, deformasyon enerjisinin yüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Griffith’in ortaya koyduğu denklemde yüzey enerjisi ifadesinin yerine kırılma işini gösteren bir parametre olan ‘G’ ifadesi öne çıkmaktadır. Burada ‘G’ ifadesi aynı zamanda çatlağın birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarı olup birimi N/m’dir. Kırılma olayının ise kritik bir değer olan ‘Gc’de meydana geldiğini belirtmiştir. Bu durumda denklem;

$$\sigma_f = \left( \frac{G_c E}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Burada;

$G_c = 2\gamma$  olup kırılma için gerekli toplam işi ifade etmektedir.

### 2.2.2.2. Irwin teorisi

Irwin ve arkadaşları gevrek kırılmayı Griffith'e göre farklı bir bakış açısıyla analiz ederek ele almışlardır. Araştırmacılar deneysel çalışmalarında malzemedeki çatlak ucu civarındaki gerilme durumunu esas faktör olarak değerlendirmişlerdir. Çatlak ucu civarında meydana gelen gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme yoğunluk faktörü olan “  $K$  ” parametresini hesaplamışlardır. Gerilme yoğunluk faktörü olan “  $K$  ” uygulanan gerilmenin, çatlak boyutuna, çatlak şekline ve numunenin geometrisine bağlı bir parametredir.  $K$  parametresi gerilme ve karakteristik bir uzunluğun karekökü ile doğrusal ilişkiye sahiptir. Burada ifade edilen karakteristik uzunluk çatlak boyu olup gerilme yoğunluk faktörü Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

$$K = \sigma \sqrt{\Pi a f\left(\frac{a}{w}\right)} \quad (2.3)$$

Burada;

w: Numune genişliği,

f (a /w) : Numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametre

a: Çatlak boyunun yarısı

Çatlak ucunda meydana gelen gerilme yoğunluk faktörü, sonsuz genişlikteki bir numune için Mod I, Mod II ve Mod III yükleme durumlarında aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$K_I = \sigma_1 \sqrt{\Pi a} \quad (2.4)$$

$$K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\Pi a} \quad (2.5)$$

$$K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\Pi a} \quad (2.6)$$

Gerilme yoğunluk faktörü (K) kritik bir  $K_{IC}$  değerine ulaştığında kırılma olayı gerçekleşmektedir. Bu durumda,

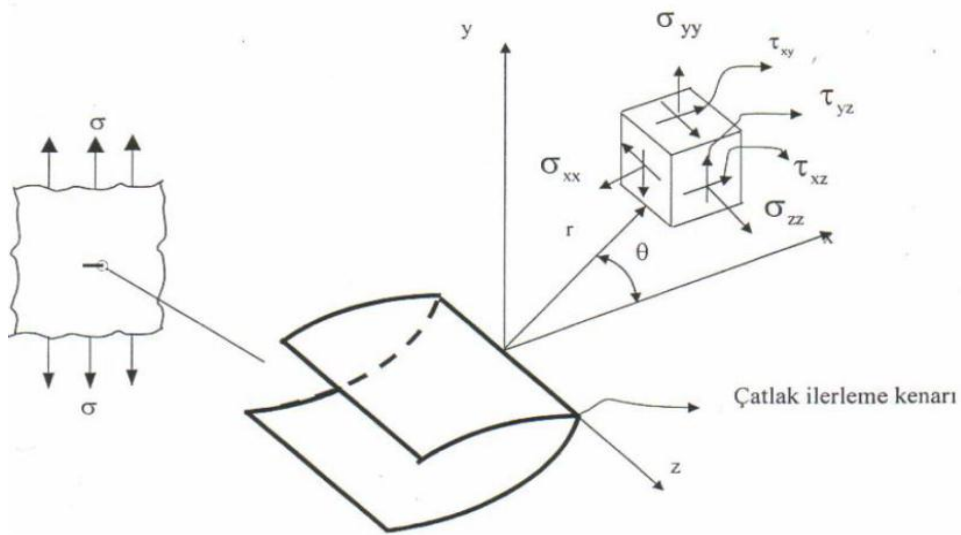
$$K_{IC} = \sqrt{EG_{IC}} \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır. Kritik gerilme yoğunluk faktörü ( $K_{IC}$ ) kırılma tokluğu olarak ifade edilmekte olup birimi  $MPa \cdot \sqrt{m}$ 'dir.

Gerilme yoğunluk faktörü, yalnızca gerilme durumu ve çatlak geometrisiyle ilgili bir parametre olup malzemenin özelliklerine bağlı değildir. Oysaki kırılma tokluğu, malzeme özelliğini de ele alan önemli bir parametredir. Malzemenin kırılma tokluğu değerini belirlemek için öncelikle gerilme yoğunluk faktörü değeri belirlenir. Malzemenin  $K=K_{IC}$  değeri söz konusu olduğu durumda çatlak ilerler ve kırılma olayı gerçekleşir (Tada vd., 2000).

Teorik olarak hesaplanan kırılma tokluğu değeri ile malzeme üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçların birbirleri ile tutarlılığı düşüktür. Bunun en önemli nedeni malzeme içerisinde mevcut olan mikro ve makro yapıya sahip çatlaklardır. Gözenek veya çatlak içeren malzemeler dışarıdan etki eden yükler altında daha düşük değerlerde kırılır. Malzeme en yüksek gerilim çatlak ucunda gelişse de, bu bölge gerilimin meydana geldiği tek bölge değildir. Kırılma olayı çatlak uç bölgesindeki gerilmenin kritik değere ulaşmasıyla gerçekleşir.

Aşağıdaki çatlak ucundan belirli bir 'r' mesafesinde meydana gelen gerilim değerleri için eşitlikler verilmiştir. Elastiklik teorisini, yani Muskhelishvili (1963) ve Westergaard'ın (1939) stres analizi yöntemlerini kullanarak, her yükleme modu için çatlak ucu gerilme ve yer değiştirme alanları (ve dolayısıyla K) belirlenebilir (Muskhelishvili, 1963).



Şekil 2.18. Çatlak etrafında gerilim yoğunlaşması (Anderson, 1991)

$$\sigma_{xx} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left( \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\vartheta}{2}\right)\right) \right) \quad (2.8)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left( \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \left(1 + \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\vartheta}{2}\right)\right) \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left( 2\nu \cdot \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \right) \quad (2.10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left( \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3\vartheta}{2}\right) \right) \quad (2.11)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.12)$$

Burada;

$\sigma_{xx}$  : x eksenindeki gerilme değeri

$\sigma_{yy}$  : y eksenindeki gerilme değeri

$\sigma_{zz}$  : z eksenindeki gerilme değeri

$\tau_{xy}$  : xy yönünde kayma gerilmesi

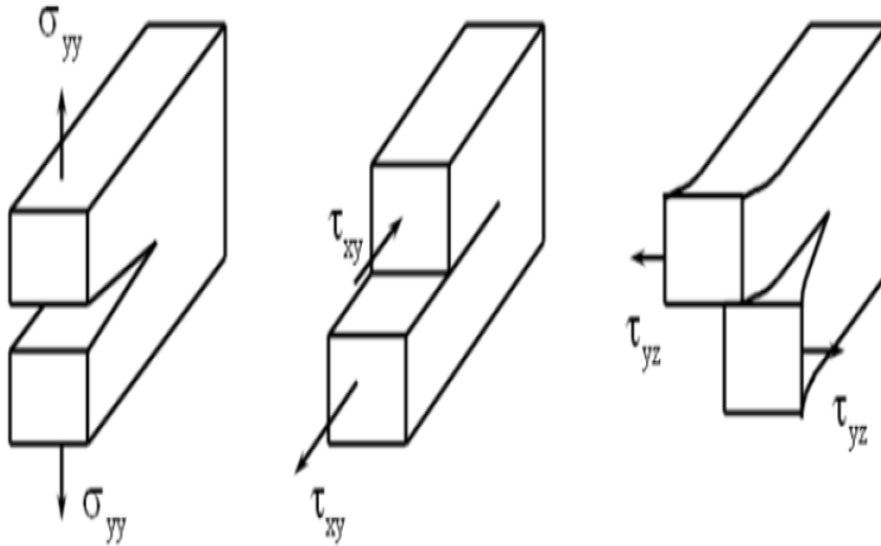
$\nu$  : poisson oranı

$\vartheta$  : r'nin x eksenine yaptığı açısı

### 2.2.2.3. Kırılma yük modelleri

Lineer elastik kırılma mekaniği, çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme değerlerini, çatlak ilerlemesi durumunda meydana gelen enerjinin serbest kalma oranını ve kırılma tokluğuna bağlı parametreleri ele almaktadır. Eğer çalışılan malzemeye etki eden yük altında davranışları elastik sınırlar içerisinde kalıyor ise, meydana gelen kırılma türleri lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) uygulaması adı altında ele alınmaktadır.

Lineer elastik kırılma mekaniği; mod I (açılma veya gerilme modu), mod II (kayma veya kesme modu) ve mod III (düzlem dışı kayma modu) şeklinde üç farklı modda ele almaktadır. Bir malzemenin çatlak ilerleme davranışı aşağıda gösterilen üç tipten herhangi birine benzeyebileceği gibi herhangi ikisini veya her üçünü de aynı anda kapsayabilmektedir. Mod I, mühendislik uygulamalarında en çok karşılaşılan mod olup aynı zamanda, laboratuvar ortamında deneysel olarak analiz etmek, üretmek ve uygulamak için en kolay olanıdır. Ayrıca, en sık rastlanan ve diğerlerine nazaran daha kritik olan bir çatlak ilerleme modudur. İki kırılma yüzeyinin birbirine zıt yönde ve dik olarak ayrılması esasına dayanmaktadır (Griffith, 1920; Schmidt ve Rossmantihm, 1983; Topçu ve Taşgetiren, 1998).



Şekil 2.19.Çatlak yüzeylerinin üç hareket şekli (Chang vd., 2002)



Açılma veya gerilme modu olarak adlandırılan Mod I kırılma tokluğunda çatlak ucu, çatlak düzlemine dik yönde yer değiştirmelere maruz bırakılmaktadır. Bu yüzden çatlak yayılımı çatlak düzlemi yönünde gelişmektedir. Kayma veya kesme modu olarak adlandırılan Mod II kırılma tokluğunda çatlak yüzeyleri, çatlak düzleminde nispeten birbirlerine doğru hareket etmekte, yırtılma veya düzlem dışı kayma modu olarak adlandırılan Mod III kırılma tokluğunda ise çatlak düzleminden yüzeye doğru paralel hareket etmektedir. Bu modların herhangi ikisinin kombinasyonu ile kırılma meydana gelmesi durumunda ise buna karma ya da karışık mod adı verilmektedir (Backers, 2004).

#### 2.2.2.4. Kırılma ucu zonu (fracture process zone (FPZ))

Kayaçlardaki kırılma ucu zonu (FPZ), doğrusal olmayan davranışları deneyimleyen çatlak ucunun önündeki bölgedir. FPZ, çatlak ucunun çevresindeki mikro çatlakların başlatılması ve yayılması ile oluşur (Çizelge 2.7). FPZ'nin boyut ve şeklini belirlemek için kullanılan modeller, metaldeki plastik bölgeyi tanımlamak için kullanılan modellere dayanmaktadır. Schmidt (1980), FPZ'nin şeklini tanımlamak için maksimum bir normal stres kriteri kullanmış ve Eşitlik 2.13'ü geliştirmiştir. FPZ'nin tamamen geliştiği, mikro çatlak yoğunluğu kritik bir seviyeye ulaştığı ve makro çatlak oluşumuna hazır olduğu duruma ait şematik görünüm Şekil 3.20'de verilmiştir.

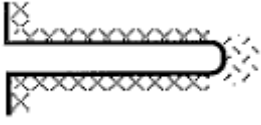
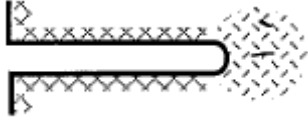
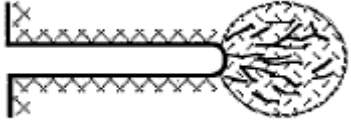
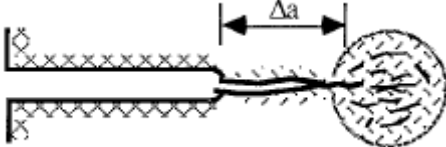
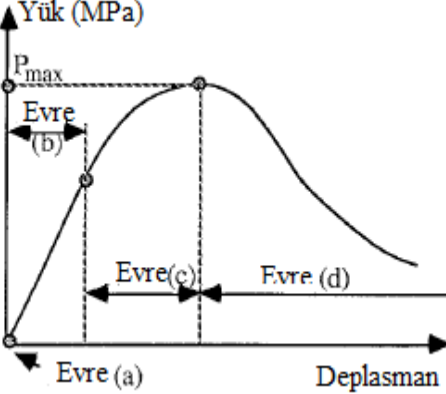
$$r(\vartheta) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_t}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \cdot \left(1 + \left|\sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right|\right)^2 \quad (2.13)$$

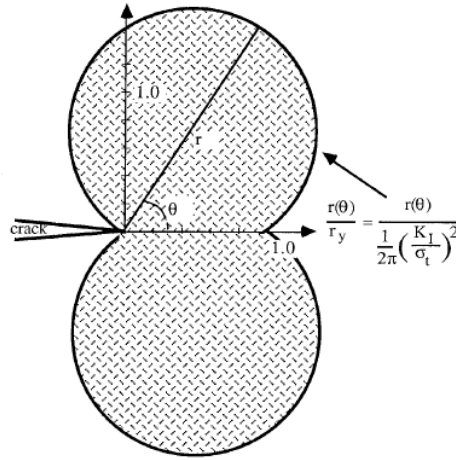
Burada;

$\sigma_t$ : Kayacın çekme dayanımı

r,  $\vartheta$ : Şekil 3.20'de koordinat sistemi tarafından tanımlanmıştır.

Çizelge 2.7. FPZ'nin Gelişimi (Whittaker vd., 1992)

Evre	Şematik Görünümü	Açıklama
A		Çentik hazırlama sırasında doğal olarak oluşan bir dizi farklı mikro çatlaklar bulunmaktadır.
B		Birçoğu stabil olarak izole edilmiş, ancak bir kısmı etkileşime girmiş olan birkaç yeni mikro çatlak oluşmuştur.
C		Örnek, doğrusal olmayan bir yük değiştirme eğrisinin elde edildiği yüksek seviyede yüklenmiştir. FPZ tamamen gelişmiş, mikro çatlak yoğunluğu kritik bir seviyeye ulaşmış ve makro çatlak oluşumuna hazır durumuna gelmiştir.
D		Çentiğin önündeki bitişik mikro çatlakların birleşmesiyle makroskobik bir çatlak oluşmuş ve çok güçlü akustik emisyon gözlenmektedir. Bu arada, makro çatlak uzantısını aşamalı olarak koruyan yeni bir FPZ gelişmiştir.
E		Çatlak ucundan önce FPZ'nin gelişiminde farklı aşamaları gösteren ve kaya üzerinde yapılan kırılma testi için tipik bir yük deplasman kaydı oluşmuştur.



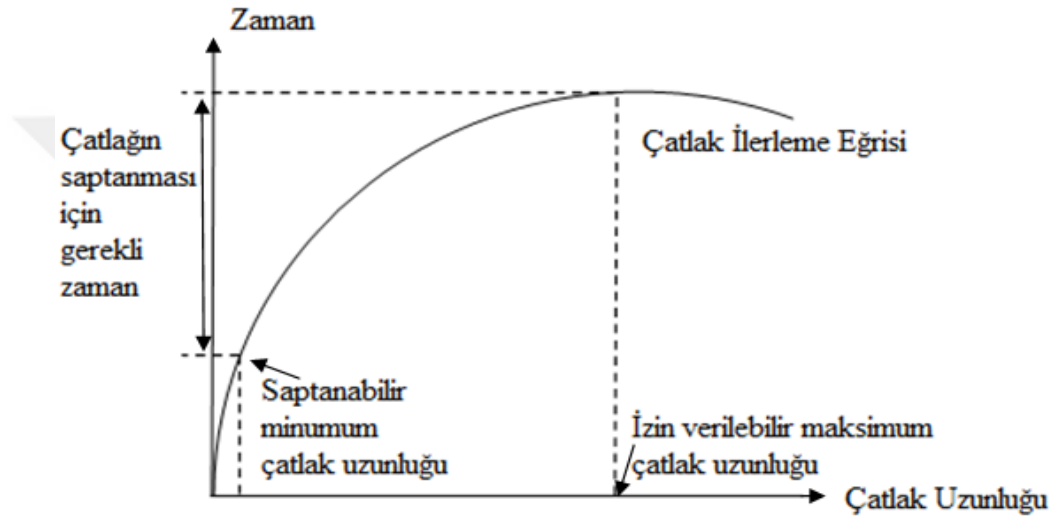
Şekil 3.20. FPZ'nin boyutu ve şekli (Schmidt, 1980)

### 2.2.3. Kırılma tokluğu

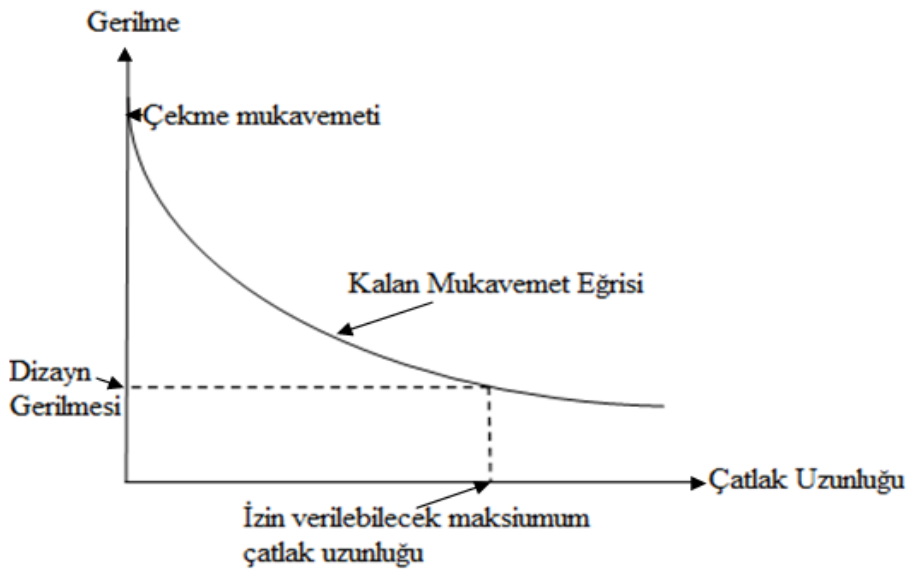
Kırılma tokluğu, kayalarda önceden mevcut olan çatlakların kırılmasına ve çoğalmasına karşı direnme yeteneği olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, yeni yüzeyler yaratmak için gerekli kırılma enerjisi tüketim oranı olarak ifade edilebilir. Çatlak içeren bir malzemede dışarıdan etki eden yük altında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşturmaktadır. Fakat levha şeklindeki çok ince numunelerde x ve y yönlerinde gerilmeler söz konusu iken, z yönünde gerilme yoktur. Böylesi bir geometrik özelliğe sahip malzemeler düzlemsel oldukları için **düzlem gerilme** ( $\sigma_z=0$ ) olarak ifade edilmektedir. Kalın numunelerde ise malzeme üç boyutlu deformasyona uğrarken malzeme yüzeyinde yine düzlem gerilme gözlenmektedir. z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkmasına rağmen deformasyon iki boyutlu gelişmekte x-y düzleminde şekil değiştirmektedir. Bu durum, numune içine doğru ilerledikçe malzemenin z eksenli boyunca kendisini çevreleyen malzeme tarafından tutularak z yönünde deformasyon yapmasının engellenmesinden kaynaklanmaktadır. Böylesi malzeme durumu ise **düzlem germe** ( $\epsilon_z=0$ ) olarak ifade edilmektedir. Kaya mekaniği çalışmalarında üç boyutlu malzemeler kullanıldığından dolayı düzlem germe değeri ele alınmaktadır (Sun ve Ouchterlony, 1986; Agah, 1991).

Kırılma tokluğu çalışmalarının en önemli faydası, malzeme yapısında bulunan mevcut ya da ilerleyen zamanlarda oluşan çatlakların ne zaman mukavemetini kaybedeceğinin tahmin edilmesidir. Malzemedeki çatlak, kusur veya süreksizlikler zamana

bağlı olarak artmaktadır. Şekil 2.21’de zamana bağlı olarak bir çatlakın büyümesi Şekil 2.22’de ise büyüyen çatlak ile mukavemetindeki değişim grafikleri verilmektedir. Malzeme içerisinde çatlak bulunmadığı durumda malzemenin mukavemeti çekme gerilmesine eşit olmaktadır. Fakat çatlak oluşması ve ilerlemesiyle malzemenin çekme dayanımı azalmakta ve belirli bir çatlak sınırına ulaştığında ise dayanım özelliğini kaybetmektedir. Böylelikle malzemedeki çatlak tehlikeli olup olmadığı, o an için tehlikeli olmasa da ilerleyen zamanlarda tehlike yaratıp yaratmayacağı tahmin edilebilmektedir.



Şekil 2.21. Zamana bağlı olarak bir çatlakın büyümesi (Agah, 1991).



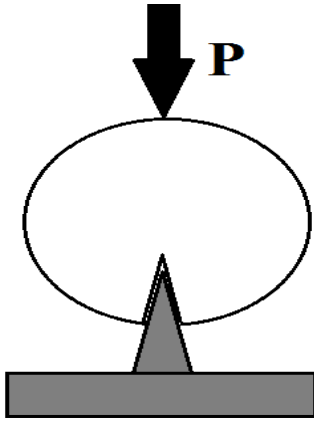
Şekil 2.22. Büyüyen çatlak ile malzeme mukavemetindeki değişim (Agah, 1991).

Kırılma tokluğu, kırılma mekaniğinin önemli bir parametresi olup, kırılma ucu etrafında gevrek yenilmeyi başlatmak için gereken enerjiyi temsil etmektedir. Kayaçların arazi ortamında kırılma tokluklarını tespit etmek oldukça zor olup pahalı ekipmanlara gereksinim duyulmaktadır. Bu yüzden genellikle araştırmacılar, laboratuvar ölçekli numuneler kullanarak deneysel çalışmalardan elde ettiği verileri arazi ortamına uyarlamayı tercih etmektedirler. Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (ISRM) kayaçların kırılma tokluğunun ölçülmesi için çeşitli yöntem ve metotlar önermiştir.

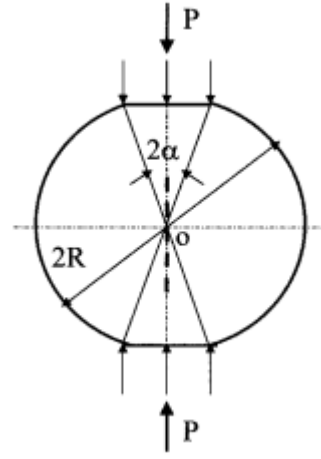
Kırılma tokluğu değerini deneysel olarak belirlemek için ilk olarak numunelerde kontrollü çatlaklar geliştirerek başlangıç çatlağı oluşturulması gerekmektedir. Bu çatlakların malzeme üzerinde önceden doğal olarak meydana gelmiş olduğu varsayılmaktadır. Malzeme üzerinde açılan başlangıç çatlağının keskin, düz ve numune yüzeyine dik olmasına özen gösterilmelidir. Böylelikle çatlak ucunda meydana gelen çatlak ilerleyişinin kontrol altına alınması sağlanır. Kaya benzeri malzemelerde kırılma tokluğu değerinin belirlenmesi için geliştirilmiş birçok metot bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları şunlardır;

- Kenar Çentikli Disk (Edge Notch Disc)
- Düzleştirilmiş Brazilian Disk (Flattened Brazilian Disk)
- V-Çentikli Brazilian Disk (Cracked Chevron-Notched Brazilian Disc)
- Tek Kama Çentikli Brazilian Disk (The Single Edge Crack Brazilian Disc)
- Tek Kenar Çentikli Kiriş (Single Edge Notch Beam)
- Yarı Dairesel Eğilme (Semi Circular Bend)

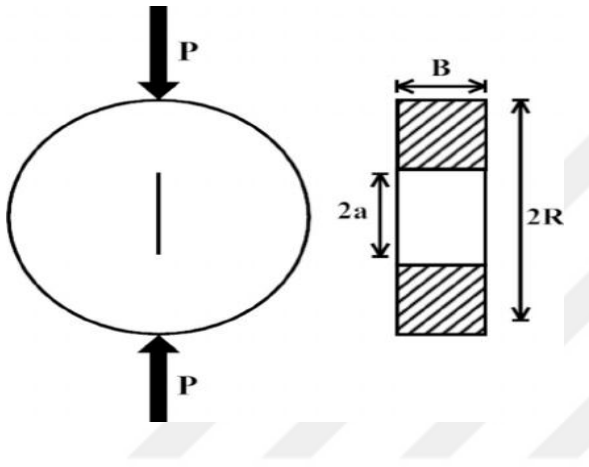
Temel olarak yukarıda belirtilen deney yöntemleri prensip olarak birbirine yakın olup, genellikle kullanılan numunelerin geometrisi, ebadı, şekli, çentik yeri, çentik büyüklüğü gibi parametreler farklılık göstermektedir.



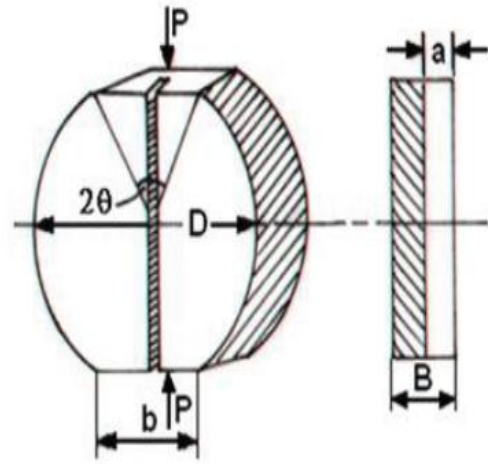
Kenar Çentikli Disk



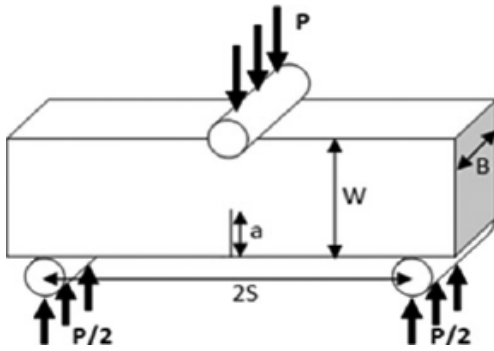
Düzleştirilmiş Brazilian Disk



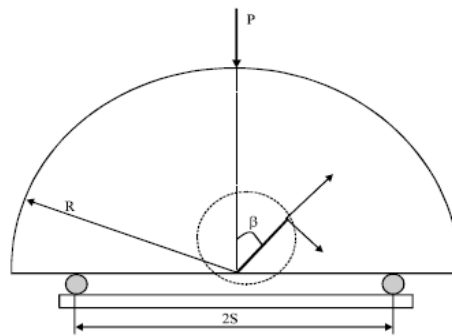
V-Çentikli Brazilian Diski



Tek Kama Çentikli Brazilian Diski



Tek Kenar Çentikli Kiriş



Yarı Dairesel Eğilme

Şekil 2.23. Farklı geometrik tiplere sahip kırılma tokluğu test numunelerinin şematik görünümü (Agah, 1991).

Lineer elastik kırılma mekaniğine (LEFM) göre yük doruğa ulaştığında, kırılma çatlak ucundan başlar. Bundan yola çıkarak Kurubbu vd. (2014), SCB örneğinin kırılma tokluğu değerini belirlerken bir denklem geliştirmişlerdir. Kırılma tokluğunu normalize edilmiş gerilme yoğunluk faktörü (Normalleştirilmiş SIF) olarak adlandırılan sayısal sabite dayanan bir denklemden tespit etmişlerdir. Normalize edilmiş gerilme yoğunluk faktörü değeri Eşitlik 2.14 yardımıyla hesaplanmaktadır. Normalize edilmiş gerilme yoğunluğu faktörünü kullanarak, kayacın kırılma tokluğu ise Eşitlik 2.15 ile hesaplanmaktadır.

$$Y = -1.297 + 9.516 \frac{S}{2R} - (0.47 + 16.457 \frac{S}{2R}) \frac{a_0}{R} + (1.071 + 34.401 \frac{S}{2R}) (\frac{a_0}{R})^2 \quad (2.14)$$

$$K_{Ic} = Y \frac{P_{max} \sqrt{\Pi a_0}}{2RB} \quad (2.15)$$

Burada;

Y: Tasarlanan başlangıç çentik uzunluğuna ( $a_0$ ) karşılık gelen boyutsal olmayan stres yoğunluk faktörü (SIF)

$K_{Ic}$ : Mod I kırılma tokluğu ( $MPa\sqrt{m}$ )

$a_0$ : Başlangıç çentik uzunluğu (mm)

$P_{max}$ : Kırılma meydana geldiğinde maksimum yük (N)

R: Numunenin çapı (mm)

B: Numunenin kalınlığı (mm)

S: Mesnetler arası mesafe (mm)

#### 2.2.4. Kırılma enerjisi

Kayaçların kırılma direncini karakterize etmek için kullanılan iki ana parametreden birisi de kırılma enerjisidir. Kırılma enerjisi, kayaç gibi heterojen yapıya sahip düşük elastik veya visko elastik özelliğe sahip malzemeler için yaygın olarak kullanılır. Kırılma enerjisi daha geniş bir analiz bölgesi üzerinde kırılma potansiyelini yorumlamaktadır.

Genel olarak, bu özellik kritik gerilme enerji yayılımı ve stres yoğunluk faktörü gibi diğer kırılma özelliklerine kıyasla doğrusal elastisiteye ve homojenliğe daha az bağlıdır. Dolayısıyla bu yöntem asfalt, beton, seramik ve kayaç gibi heterojen yapılı malzemeler için önemli bir parametredir (Marasteanu vd., 2004).

Kırılma enerjisi, malzemenin yenilmeye uğraması için yapılan işin malzemenin kırık yüzey alanına (ligament) oranıdır.

$$G_F = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (2.16)$$

$$W_f = \int_0^{F_{max}} F \cdot du \quad (2.17)$$

$$A_{lig} = (R - a_0) \cdot B \quad (2.18)$$

Burada;

G<sub>f</sub>: Kırılma Enerjisi (J/m<sup>2</sup>)

W<sub>f</sub>: Kırılma enerjisinin yaptığı iş (yük/deformasyon eğrisi altında kalan alan) (J)

A<sub>lig</sub>: Yükün etkidiği en kesit alanı (m<sup>2</sup>)

R: Numune yarıçapı (m)

a<sub>0</sub>: Çentik uzunluğu (m)

B: Numune kalınlığı (m)

## 2.3. İstatistiksel Temeller

### 2.3.1. Yapay sinir ağları

Yapay zekâ bilimi makine öğrenme, genetik algoritma, bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi birçok alt bilimden oluşmaktadır. Yapay sinir ağları (YSA) ise yapay zekâ biliminin araştırma alanlarından sadece bir tanesidir. Yapay sinir ağları ilk olarak insan beyninden esinlenerek ortaya çıkmıştır. İnsan beyni, yaklaşık 100 milyar nöron ve 1.000 trilyon sinaptik ara bağlantıdan oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. YSA biliminin ortaya

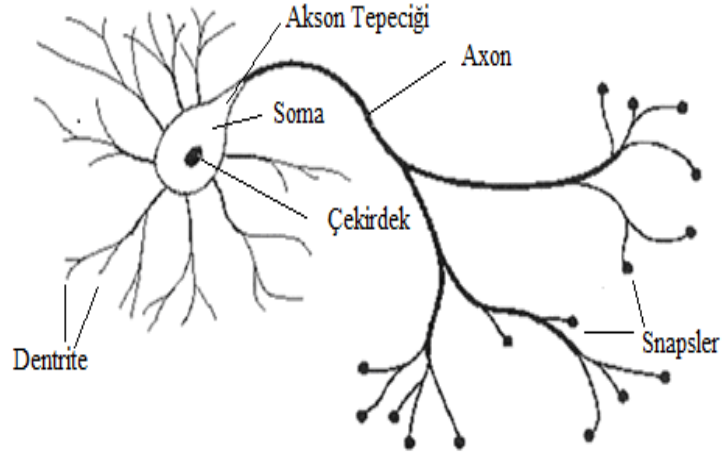


çıkışında insanın doğumundan itibaren çevresindeki çeşitli faktörler etkisiyle öğrenmeye başlaması ve bu öğrenme sürecinin sayısal olarak modellenebileceği mantığından yola çıkılmıştır. Beynin çalışma sistemini oluşturan nöronlar yapay sinir ağlarının çıkış kaynağı olmuştur. Nöronların modellenmesi ile insan beyninin çalışma mekanizmasının taklit edilmesi mantığına dayanmaktadır (Nabiyev, 2005)

YSA, girdi ve çıktı parametreleri arasında ağırlıklandırılmış bir ilişki kuran ve beyne gönderilen girdi parametrelerini çeşitli değerlendirmelere tabi tuttukten sonra dikkate alınıp alınmayacağını belirleyen bir sistemdir. YSA insan vücudunda olduğu gibi nöron adı verilen bir sürü yapay sinir hücresi ile çalışmaktadır. Bu yapay hücreler genellikle katman şeklinde ağırlıklandırılmış bağlantılar aracılığıyla birbirlerine bağlanmaktadır (Fausett, 1994; Liliana ve Napitupulu, 2012).

### **2.3.1.1. Biyolojik sinir ağı**

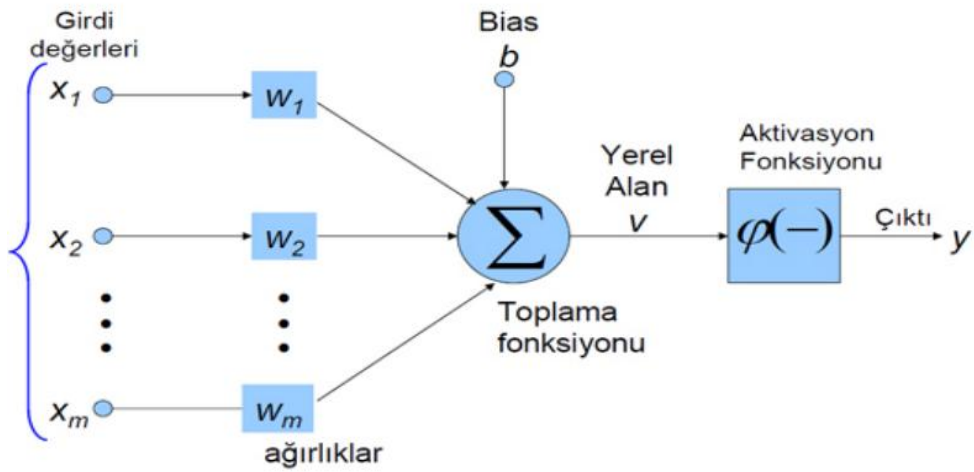
İnsanların hayati faaliyetlerini sürdürebilmesi için en küçük birim olan ve sinir olarak adlandırılan hücreler bir araya gelerek sinir sistemini oluşturmaktadır. Bu sinir hücreleri sadece insan beyninde değil aynı zamanda tüm vücuda yayılmış bir ağ sistemine sahiplerdir. Beynin karar verme mekanizmasını oluşturan sinir hücreleri, çevresindeki olayları sinyal alma özelliği ile algılamakta, algıladığı bu sinyali kendi içerisinde değerlendirmekte ve değerlendirme sonucuna göre iletim yapılıp yapılmayacağına karar vermektedir. Şekil 2.24'te basit bir sinir hücresinin yapısı verilmiştir. Bir sinir hücresi, hücre gövdesi, snaps adı verilen bağlantılar, dentrit (giriş) ve akson (çıkış) elemanlarından oluşmaktadır. Sinir hücreleri arasındaki bağlantılar snaps tarafından kurulur. Snapslarda sinir hücreleri birbirine temas etmeyecek şekilde boşluklar bulunmaktadır. Snaps dışarıdan gelen uyarıları algılar ve somaya iletir. Soma ise gelen algıyı değerlendirdikten sonra sinir hücresi kendi elektrik sinyalini oluşturur. Oluşturduğu bu sinyaller aksonlardan taşınarak başka bir sinir hücresine iletilir (Öztemel, 2003).



Şekil 2.24. Basit bir sinir hücresi (Kızılkaya, 2017)

### 2.3.1.2. Yapay sinir ağı

Hücre gövdesinde dendritlerden gelen tüm sinyaller toplanır. Toplam miktar belirli bir eşikten daha büyükse, mesaj akson boyunca diğer sinaptik terminale iletilir. Bu yapı yapay sinir ağı olarak Şekil 2.25'te gösterildiği gibi bir aktivasyon fonksiyonu ( $f$ ) ile modellenmiştir. Biyolojik hücre sisteminde yaşanan bu sistem YSA'nın temel mantığını oluşturmuştur. Şekil 2.25'de görüldüğü üzere YSA hücre girdileri, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve hücrenin çıktısı olarak beş temel parametreden meydana gelmektedir.



Şekil 2.25. Nöron modeli (Sousa, 2016)

**Girdiler:** Biyolojik sinir ağına benzer biçimde nöronlara gelen verilerdir. Bu veriler YSA'ya farklı sinir ağlarından geleceği gibi direk dış etkenlerden de gelebilir.

**Ağırlıklar:** Girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi ayarlayan matematiksel değerlerdir. YSA'ya gelen bilgiler çekirdeğe iletilirken girdi değerleri ağırlıklar ile çarpılarak sisteme tabi olur. Bu ağırlıklar pozitif ve negatif değerler alabileceği gibi sıfır değerini de alabilir. Değerin sıfır olması etki eden girdi parametresinin sistem üzerine herhangi bir etkisi olmadığı anlamına gelmektedir.

**Toplam Fonksiyonu:** Burada girdi parametreleri adında belirli ağırlıklara sahip değerlerimiz toplam fonksiyonuna tabi tutulduktan sonra aktivasyon fonksiyonuna iletilmektedir. Toplam fonksiyonuna gelen girdi değerlerin bazı durumlarda sayısı önemli iken bazı durumlarda önemsiz olmaktadır. Herhangi bir problem çözümünde net tanımlanmış bir toplama fonksiyonu bulunmaktadır. Araştırmacılar deneme yanılma yöntemi ile en uygun toplama fonksiyonunu kabul etmektedir. Ayrıca her hücre içinde aynı toplama fonksiyonu olmak zorunda değildir. Çizelge 2.8'de YSA için kullanılan farklı toplama fonksiyonları verilmiştir.

**Aktivasyon Fonksiyonu:** Girdi değerlerin ağırlıkları ile çarpımından elde edilen toplam fonksiyon değerini işleyerek hücrenin bu girdi değerlerine karşılık oluşturacağı çıktı değerini belirler. Aktivasyon fonksiyonu, verilerde mevcut olan doğrusal olmayan özellikleri öğrenmede belirleyici olduğundan çoğunlukla doğrusal olmayan bir fonksiyon seçilir. Aktivasyon fonksiyonu seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer unsurda fonksiyonun türevinin basit olmasıdır. Bunun ana nedeni ise deri beslemeli ağ kurulduğunda zaman kaybının minimize edilmesi gerekliliğidir. Aktivasyon fonksiyonunun seçimi probleme bağlı olup seçimi zaman ve güvenilirlik açısından oldukça önem arz etmektedir. YSA'da kullanılan en yaygın aktivasyon fonksiyonları Çizelge 2.9'da verilmiştir. Çok katmanlı çalışmalarda en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonu olarak Sigmoid Fonksiyonu tercih edilmektedir (Özdemir, 2010).

Çizelge 2.8. YSA'nın kullanmış olduğu toplama fonksiyonları (Öztemel, 2003)

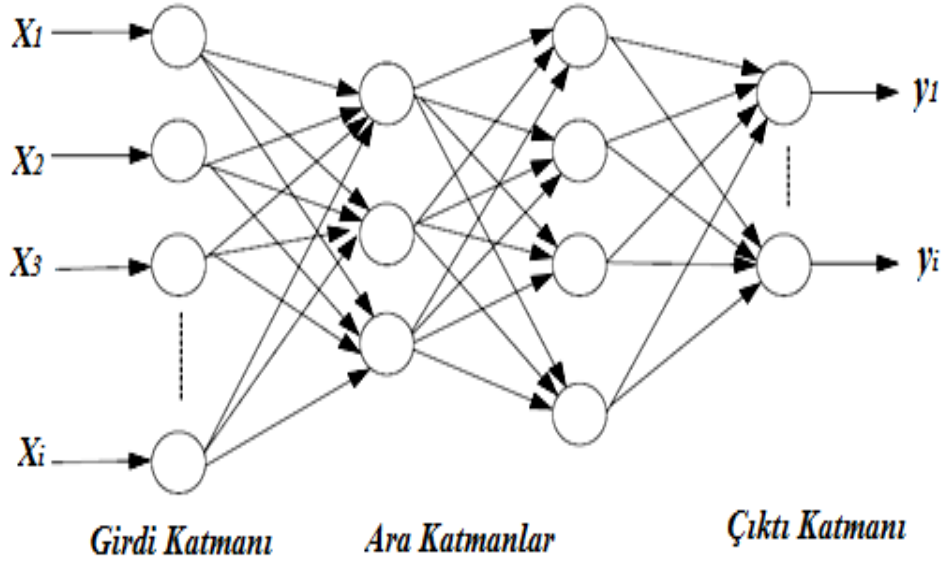
Toplam	$Net = \sum_{i=1}^n Xi * Wi$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Elde edilen değerlerin toplamı Net girdi değeri olarak kaydedilir.
Çarpım	$Net = \prod_{i=1}^n Xi * Wi$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Elde edilen değerlerin çarpımı Net girdi değeri olarak kaydedilir.
Maksimum	$Net = \text{Max} (Xi * Wi)$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Elde edilen değerler arasında en büyüğü Net girdi değeri olarak kaydedilir.
Minimum	$Net = \text{Min} (Xi * Wi)$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Elde edilen değerler arasında en küçüğü Net girdi değeri olarak kaydedilir.
Çoğunluk	$Net = \sum_{i=1}^n Sgn(Xi * Wi)$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Pozitif ve negatif olanların sayısı belirlenir. Büyük olan sayı Net girdi değeri olarak kaydedilir.
Kümülatif Toplama	$Net = Net(eski) + \sum_{i=1}^n Xi * Wi$	Girdi değerleri ile ağırlık değerleri çarpılır. Elde edilen değerlerin toplamı ve daha önce hücreye gelen bilgilerin toplamı Net girdi değeri olarak kaydedilir.

Çizelge 2.9. YSA için en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonları (Öztemel, 2003)

Lineer Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=A \cdot Net$	Doğrusal fonksiyonların çözümü için kullanılmaktadır. Belirli bir sabit değer ile toplam fonksiyonundan elde edilen değer çarpılarak hücrenin çıktısı belirlenir.
Step Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=\begin{cases} 1 & \text{Eğer } Net > \text{Eşik Değer} \\ 0 & \text{Eğer } Net \leq \text{Eşik Değer} \end{cases}$	Başlangıçta bir eşik Net değeri belirlenir. Gelen girdi değerinden elde edilen Net değeri ile eşik Net değerinin sonuçlarına göre 0 ya da 1 değerini alır.
Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=\frac{1}{1+e^{-Net}}$	Sürekli ve türevi alınabilen bir fonksiyondur. Lineer olmamasından ötürü en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonudur. Girdi değerleri için 0 ile 1 arasında değer üretir.
Tanjant Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=\frac{e^{Net}+e^{-Net}}{e^{Net}-e^{-Net}}$	Sigmoid fonksiyonuna benzer olarak sürekli ve türevi alınabilen bir fonksiyondur. Sigmoid fonksiyonundan farkı çıkışlarının -1 ile +1 değerleri arasında olmasıdır.
Eşik Değer Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=\begin{cases} 0 & \text{Eğer } Net \leq 0 \\ Net & \text{Eğer } 0 < Net < 1 \\ 1 & \text{Eğer } Net \geq 1 \end{cases}$	Eğer gelen girdiler sıfır veya sıfırdan küçük olduğunda sıfır alınır. Eğer gelen girdiler bir veya birden büyük olduğunda bir alınır. 0 ile 1 arasında olduğu zaman ise kendisini veren değer alınır.
Sinüs Aktivasyon Fonksiyonu	$F_{net}=\sin(Net)$	YSA'ya tanımlanan girdi değerlerinin en iyi öğrenme olayını sinüs fonksiyonuna uygun dağılım gösterdiği durumlarda tercih edilir.

**Hücrenin Çıktısı:** Aktivasyon fonksiyonuna tabi edilen girdi değerlerinden elde edilen hücrenin çıktı değeridir. Çıkan bu değer direkt dış ortama aktarılacağı gibi ağıın içinde de yeniden sistemde kullanılabilir. YSA'da bir hücrenin girdi parametresi birden fazla olmasına rağmen çıktısı tektir. Elde edilen çıktı değeri birden fazla hücreye bağlanabilir.

Yapay sinir ağıları biyolojik sinir ağıları gibi yapay ağların birbirleri ile bağlanmasından meydana gelen katmanlı yapılardır. Temel olarak yapay sinir ağıları girdi, ara ve çıktı olmak üzere 3 temel katmandan oluşmaktadır (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Çok Katmanlı Algılayıcılar (Kızılkaya, 2017)

Giriş katmanından elde edilen bilgiler çıkış katmanına geçmeden ara katmanda değerlendirilir. Ara katman sayısı belirlenirken yapılacak çalışma türü ve kapsamına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalarda birden çok ara katman bulunurken bazılarında ise hiç ara katman bulunmaz. Bundan dolayı ara katmandaki hücre sayıları farklılık göstermektedir. Ara katmandaki nöron sayısının fazla olması, çalışmanın hızını ve karmaşıklılığını etkileyeceğinden düşük olması tercih edilmektedir. İleri beslemeli ağlarda ara katmanlardan elde edilen çıktı değerler direk dış dünyaya gönderilirken geri beslemeli ağlarda yeniden ağa gönderilip yeni ağılık değerleri elde edilebilmektedir (Şen, 2004).

Yapay sinir ağıları tıpkı insan beyni gibi dış etkenlerden aldıkları davranışı yorumlar ve ona göre tepkisini gösterir. Zaman ile aynı problemleri çözmekte başarılı iken yeni problem karşısında tecrübesiz olabilir. Böylesi durumlarda ağa girdi verileri tanıtılır sistem başarıya ulaşmaya kadar ağırlık değerleri deneme yanılma yöntemi ile en optimum duruma getirilir. Bu geçen zamana ise öğrenme adı verilmektedir. Daha önce deneysel veya tecrübe ile belli olan değerler ile YSA'nın vermiş olduğu değere kabul edilebilir seviyede yaklaşmış ise ağı öğrenmiş olduğu kabul edilmektedir. Bazı durumlarda ağı

öğrenme yerine ezberleme yaptığı durumlarda göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden ağın genel olarak % 80'i eğitilirken kalan % 20'si teste tabi tutulmaktadır (Şen, 2004).

YSA'nın eğitilme aşamaları şu şekildedir;

- Verilerin toplanması
- Ağın genel topolojik yapısının oluşturulması
- Öğrenme ve test parametrelerinin belirlenmesi
- Başlangıç ağırlık değerlerinin atanması
- Öğrenme setinden verilerin seçilerek ağa tanıtılması
- Öğrenme esnasında ileri hesaplamaların oluşturulması
- YSA'nın elde ettiği çıktı ile beklenen çıktı değerleri arasındaki farkın belirlenmesi
- Gerekli durumlarda ağırlıkların güncellenmesi
- Öğrenme kabul edilir seviyede ise tamamlanması

### **2.3.1.3. YSA'nın avantajları**

1. Birçok hücre aynı anda çalışarak karmaşık işlevleri çözebilmektedir. Çözüm sürecinde hücrelerin bazıları işlevini yitirse de sistem çalışmaya devam etmektedir.
2. YSA makine öğrenmesi özelliği sayesinde, geçmişteki olayları öğrenerek benzer durumlar karşısında çözüm yöntemi üretebilir.
3. Sorunların çözümünde genel olarak verileri ele almasından dolayı eğitim esnasında girdi parametresi olmayan veriler içinde anlamlı değerler sunmaktadır.
4. Veri dağılımının lineer olma şartı aranmaz.
5. Bilgi işleme esnasında geleneksel programlamada yaşanan birçok problemi ortadan kaldırmaktadır.
6. Geleneksel programlardaki bilgiler veri dosyasında tutulurken, YSA'da bilgiler ağın bütününe sarmaktadır. Hücrelerin bazıları zarar görse dahi bu bilgiler kendini muhafaza edebilmektedir.
7. YSA' da tek bir bağlantı kendi başına anlam kazanamayacağından bilgi ağı dağılmış bir biçimde bulunmaktadır.
8. YSA ilk olarak girdi parametrelerini kullanarak öğrenir. Dolayısıyla girdi parametrenin istenilen çıktı parametresi ile ilişkili olması ağın gücünü artırmaktadır.
9. YSA daha önce hiç görülmemiş olaylar içinde bilgi verebilir. YSA çalışma prensibi olarak genelleme yapmaktadır.

10. En başarılı oldukları alan algılamaya yönelik çalışmalardan elde edilmiştir.
11. YSA kendisine tanıtılan verileri sınıflama ya da kümeleme yapabilir.
12. Eksik veriyi tamamlama konusunda oldukça başarılıdır.
13. YSA kendi kendine öğrenebilme ve kendini eğitme özelliğine sahiptir.
14. Geleneksel programlarda eksik bilgi durumunda sıkıntı yaşanırken YSA eksik verilerde de çalışma yeteneğine sahiptir. Bu bilgi eksikliği güvenilirliğini zedelemmez.
15. Eksik bilgilerden kaynaklı doğacak hatalara karşı toleranslıdır.
16. Ağda olası bir problem olduğu anda dereceli ve yavaş bir biçimde bozulma gözlemlenir.
17. YSA, uzay, otomotiv, bankacılık, savunma sanayi, elektrik-elektronik, finans, eğlence, sigortacılık, sağlık, kimya, robotik, güvenlik, mühendislik, telekomünikasyon gibi birçok alanda aktif olarak kullanılmaktadır (Öztemel 2003; Kızılkaya, 2017).

#### **2.3.1.4. YSA'nın dezavantajları**

1. YSA'nın en büyük dezavantajı paralel işlem yapma özelliğinden ötürü donanımların bağımlı olmasıdır.
2. Uygun ağ yapısını belirlerken tamamen deneme yanılma üzerine kurulmuş bir sistem olmasından dolayı belirli bir kuralı yoktur.
3. YSA için önemli bir parametre olan katman sayısı, hücre sayısı ve öğrenme katsayısı gibi parametreler belirlenirken belli bir kural bulunmamaktadır. Dolayısıyla her problem için birbirinden farklı yaklaşımlar denenmektedir.
4. Girdi parametrelerinin YSA'lara tanıtılması için nümerik veri olması gereklidir. Araştırmacılar tanıtılacak verileri nümerik değer cinsinden ifade etmek zorundadır.
5. Ağın ne kadar süre eğitileceği hakkında net bir zaman bulunmamaktadır. Araştırmacı YSA'dan elde ettiği veriler kabul edilebilecek hata düzeyine indirgenene kadar deneme yanılma işlemine devam etmek zorundadır.
6. YSA'nın diğer bir önemli dezavantajı elde edilen çözümün neden ve nasıl olduğuna ilişkin bir denklem veya yöntem vermesidir. Buda ağın nasıl davrandığını açıklayamadığından ötürü ağa olan güvenin azalmasına sebep olmaktadır (Öztemel 2003; Kızılkaya, 2017).



### 2.3.2. Regresyon analizi

Bağımlı ve bağımsız değişken(ler) arasındaki ilişkiyi araştırmada en yaygın kullanılan test yöntemidir. Bu analiz ile farklı değişkenler arasında bir ilişki ya da birliktelik olup olmayacağı hakkında matematiksel bir model oluşturulmaktadır. Regresyon modeli genel anlamda, bağımlı ve bağımsız değişken(ler) arasındaki ilişkiyi inceleyerek bir eğri (doğrusal, parabolik, üssel vb) üzerinde matematiksel bir denklem kuran istatistiksel yaklaşımdır şeklinde ifade edilebilir. Regresyon modelleri değişkenler arasında nedensellik değil birlikteliğin olup olmadığını incelemektedir. Değişken(ler) arasında fonksiyonel ilişkiyi inceleyen regresyon analizi, basit ve çoklu olarak ikiye ayrılmaktadır.

Bir bağımlı ve bir bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modelleyen basit regresyon analizidir. Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modelleyebilmek için bağımlı değişkenin en az aralıklı ölçekte toplanmış veri olması gereklidir. Bağımsız değişkenin sınıflı, aralıklı veya oranlı düzeyde olması sıkıntı oluşturmamaktadır fakat bağımsız değişken sınıflı düzeyde ölçülmüş değerlerden oluşmuşsa doğrudan regresyon modeli yerine önce kukla yöntemi ile yeni değişkenlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Basit regresyon modelinde bağımlı ve bağımsız değişken arasında lineer bir doğru denklemi en küçük kareler yöntemi mantığına dayalı olarak oluşturulmaktadır (Durmuş vd., 2011). Basit regresyon denkleminin matematiksel ifadesi Eşitlik 2.19'da verilmiştir.

$$Y:\beta_0 + \beta_1X_1 + \varepsilon \quad (2.19)$$

Eğer birden fazla bağımsız değişken varsa ilişki modeli çoklu regresyon analizidir. Çoklu regresyon denklemlerinde bağımsız değişkenler aynı anda bağımlı değişkeni açıklamaya çalışmaktadır. Matematiksel denklem ve yorumlama olarak ele alındığında tekli regresyon analizine benzerdir. SPSS gibi istatistiksel paket programlarında tüm bağımsız değişkenleri hesaba katarak (Enter Metodu) işleme tekniğinin yanı sıra ileri doğru seçim metodu (Forward Selection), geriye doğru eleme (Backward Elimination) ve adım adım ilerleme (Stepwise Selection) gibi çoklu regresyon modelleri bulunmaktadır. Tahmin edilen değerler ile gerçek değer lineer bir çizgi düzlemi üzerinde gösterildiğinde, çizginin üzerine düşen noktalar mutlak doğru tahmini ifade ederken altına veya üstüne

düşen noktalar ise mutlak hatayı ifade etmektedir (Durmuş vd., 2011). Bu sapmalar  $\varepsilon$  işareti ile gösterilmekte olup Şekil 2.27’de temsili olarak gösterilmiştir. Çoklu regresyon denklemini matematiksel ifadesi Eşitlik 2.20’de verilmiştir.

$$Y_i: \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon \quad (2.20)$$

Burada;

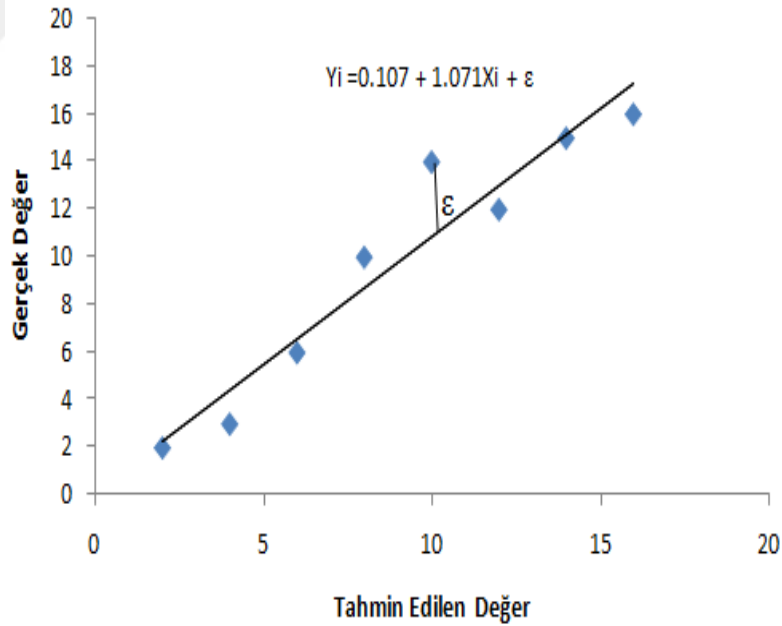
Y: Bağımlı değişken

X: Bağımsız değişken

$\beta$ : Regresyon sabitleri

$\beta_0$ : Sabit değer

$\varepsilon$ : Hata



Şekil 2.27. En küçük karelerin yönteminin grafiksel gösterimi

### 2.3.3. Tahmin doğruluğu

Bir modelin anlamlı ya da anlamsız olduğu, tahmin edilen değerlerin gerçek değere yakınlığı ile ilişkilidir. Bu ilişki modelin güçlü ya da zayıf olduğu anlamına gelmektedir. Gerçek değer ile modelden elde edilen değerlerin hata tahminini ölçen birçok kabul görmüş yöntem bulunmaktadır. En çok tercih edilenler ise Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. İstatistiksel hata belirleme yöntemleri

Ortalama Mutlak Hata (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Y_i - Y_i^I $	İki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsü olarak MAE değeri kullanılır. Gerçek değer ile tahmin edilen değer arasında çizgi çizilir. Gerçek değer bu çizgiye ortalama yatay mesafesidir. MAE değerinin sıfıra yakın olması ilişkinin güvenilirliğini artırmaktadır.
Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)	$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{Y_i - Y_i^I}{Y_i} \right $	Genelde regresyon ve zaman serisi modellerinin tahmininde tercih edilmektedir. Gerçek değerler arasında sıfır olması MAPE'nin hesaplanmasında istenmeyen bir durumdur. MAPE değerinin sıfıra yakın olması ilişkinin güvenilirliğini artırmaktadır.
Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^I)^2}$	Modelin tahmin ettiği değer ile gerçek değer arasındaki farkın belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. RMSE hataların standart sapmasını temel alır. (0-∞) aralığında değerler alır. RMSE değerinin sıfıra yakın olması ilişkinin güvenilirliğini artırmaktadır.
Belirleme (Anlamlılık) Katsayısı (R <sup>2</sup> )	$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^I)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_m)^2}$	Basit ve çoklu regresyonlarda gerçek ve tahmin edilen değerlerden elde edilen modelin güvenilirliğini veya geçerliliğini belirlemede en çok tercih edilen yöntemdir. (0-1) arasında değerler alır. R <sup>2</sup> değerinin 1'e yakın olması ilişkinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Denklemlerde geçen;

$n$ : rnek sayısı

$Y_i$ : Gerçek değer

$Y_i^l$ : Modelin tahmin ettiği değer

$Y_m$ : Gerçek değerin ortalaması



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Örnek Derleme

Çalışmada; magmatik (bazalt), sedimanter (kireçtaşı) ve metamorfik (rekristalize kireçtaşı) kökene sahip üç farklı kayaç kullanılmıştır. Örnekler Malatya Yazihan (bazalt), Malatya Akçadağ (kireçtaşı) ve Afyon (rekristalize kireçtaşı) yörelerinden temin edilmiştir. Şekil 3.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan kayaçların Türkiye haritası üzerindeki lokasyonları gösterilmiştir. Şekil 3.2 ve 3.3’te ise Yazihan bazalt, Akçadağ kireçtaşı (bej mermer ocağı) sahasına ait görüntüler bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.



Şekil 3.2. Malatya (Yazihan) Bazalt ocağına ait bir görüntü



Şekil 3.3. Malatya (Akçadağ) Bej ocağına ait bir görüntü



## 3.2. Deneysel Çalışmalar

### 3.2.1. Örnek hazırlama

Deneysel için Yazihan Bazalt ve Malatya Bej kayaçlarından yaklaşık olarak 20x20x30 cm boyutlarında her bir kaya türünden 20'şer adet, Afyon Beyaz örneğinden ise 30x30x40 cm boyutlarında 10 adet blok numune alınmıştır. Numuneler blok verebilen lokasyonlardan sahayı en iyi temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Alınan blok numunelerin laboratuvara nakledilmesi esnasında TS 2513 ve TS EN 1467 (2012)'de belirtilen hususlar göz önünde bulundurulmuş, deney sonuçlarını olumsuz etkileyecek darbe ve hatalı uygulamalardan kaçınılmıştır.

Blok numunelerden İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında bulunan karot alma makinesi yardımıyla silindirik karot numuneleri alınmıştır. Karot alma makinesi farklı çaplarda karot almaya elverişli olup yarı dairesel eğilme dayanımı deneyinde kullanılacak numuneler, 100 mm çaplı karotiyer diğer fiziksel-mekanik testler için NX (54.7 mm) çaplı karotiyer kullanılmıştır. Karot alma makinesi yardımıyla alınan karot numuneleri yapılacak deney standartlarında belirtildiği şekilde Şekil 3.4'te gösterilen karot ucu kesme ve düzeltme makinesi ile boy/çap (L/D) oranı 2-2.5, 1-1.4 ve 0.5 olacak şekilde kesilmiştir. Ayrıca kesilen karotların alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde düzeltilmiştir.

Kayaçların kuru, doğal, doymuş birim hacim ağırlığı, özgül ağırlığı, porozite, doluluk oranı, ağırlıkça-hacimce su emme, kılcal (kapillarite) su emme gibi fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik testler ile farklı çevresel koşullarda tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı, yarı dairesel eğilme dayanımı, Schmidt çekici sertliği ve sonik hız tayini deneyleri için gerekli numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. Karot alma makinesi ve karot ucu kesme ve düzeltme makinesi

Özgül ağırlık, XRD ve XRF analizleri için her bir kaya türünden alınan yaklaşık 5 kg kadar parça numune; önce çeneli kırıcı sonra çekiçli kırıcıdan geçirilerek boyut küçültmesi sağlanmış daha sonra bilyeli değirmende öğütülerek yaklaşık -200 mikron boyutuna kadar indirgenmiştir. Bilyeli değirmenden çıkan numuneler büyükten küçüğe doğru sıralanmış farklı elek açıklık serisi kullanılarak 2 mm'den 0.15 mm'ye kadar boyutlandırılmıştır. -200 ile +150 mikron boyutuna sahip örnekler konileme, dörtleme ve kareyaj yöntemleri ile azaltılarak her birimden 100'er gram malzeme alınmıştır. Şekil 3.5'da çeneli ve çekiçli kırıcıya Şekil 3.6'da ise bilyeli değirmen ve elek setine ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3.5. Çeneli ve çekiçli kırıcı





Şekil 3.6. Bilyeli değirmen ve elek setine ait görüntü

Örneklerin kuru, doğal, doymun birim hacim ağırlığı, porozite, doluluk oranı, ağırlıkça-hacimce su emme, kılcal (kapilarite) su emmesi gibi fiziksel özelliklerini belirlemek için her bir kaya türünden L/D oranı 2-2.5 olan 5 adet karot numunesi kullanılmıştır. Şekil 3.7’de kayaçların kuru, doğal, doymun birim hacim ağırlığı, porozite, doluluk oranı, ağırlıkça-hacimce su emme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Arşimet terazisi, etüv, desikatör ve kumpasa ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.7. Arşimet terazisi, etüv, kumpas ve desikatöre ait görüntü

Kayaçların farklı çevresel etmenler altında tek eksenli basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla L/D oranı 2-2.5 olan ve her bir kaya türünden 30 numune olmak üzere toplam 90 adet, nokta yükleme dayanımlarını belirlemek için L/D oranı 1.1-1.4 olan her bir kaya türünden 60 numune olmak üzere toplam 180 adet, Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımlarını belirlemek için L/D oranı yaklaşık 0.5 olan her bir kaya türünden 60 numune olmak üzere toplam 180 adet numune hazırlanmıştır. Bu deneylerde kullanılan numunelerin tamamı NX karotiyeri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, kayaçların farklı çevresel etmenler altında yarı dairesel eğilme dayanımı testi için 100 mm çapında karotiyer kullanılarak her bir kaya türünden 50 adet numune olmak üzere toplam 150 adet numune hazırlanmıştır. Şekil 3.8’de karot örneklerinin alınmasında kullanılan iki farklı karotiyere (54.7 ve 100 mm çaplı) ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı çaplara sahip karotiyerler

### 3.2.2. Çevresel ortam hazırlama

Tez çalışması kapsamında oluşturulan beş farklı çevresel ortam Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çevresel ortamların kodları ve oluşturulması

Ortam	Kodu	Çevresel ortam oluşturma
Kuru	KR	Kayaçların nemini kaybetmesi için 105 °C'lik etüvde 24 saat bekletilmiş, desikatörde soğutulduktan sonra deneysel işleme tabi tutulmuştur (TS 699, 2009).
Doygun	DY	Kayaçlar tam değişmez kütleyle gelinceye kadar su içerisinde en az 48 saat bekletilmiş, daha sonra nemli bir bezle üzerindeki su damlacıkları alınarak deneysel işleme tabi tutulmuştur (TS 699, 2009).
Donmuş	DN	Kayaçlar değişmez kütleyle gelinceye kadar su içerisinde -30 °C'de 36 saat bekletilerek dondurulmuştur (Kodama vd, 2013).
Termal Şok	TS	Kayaçlar 105 °C'de 18 saat etüvde bekletildikten sonra oda sıcaklığındaki suda 6 saat bırakılarak şoklanmıştır. Bu işlem 20 kez tekrarlandıktan sonra deneysel işleme tabi tutulmuştur (TS EN 14066, 2004).
Termal Yaşlandırma	TY	Kayaçlar 105 °C'lik etüvde 18 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığında 6 saat soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem 20 kez tekrarlandıktan sonra deneye tabi tutulmuştur (Santos vd, 2011).

### 3.2.3. Kayaçların fiziksel özelliklerini belirleyen deneyler

#### 3.2.3.1. Birim hacim ağırlığı deneyi

Kayaçların birim hacim ağırlıkları TS 699'da tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir (TS 699, 2009). Deney için düzgün geometriye sahip (silindirik) 5 adet numune karot alma makinesi ile alınmış ve uçları karot ucu kesme ve düzeltme makinesi ile kesilip düzeltilmiştir. Örneklerin boylarının (L) ve çaplarının (D) ölçüleceği eksenler V yatak yardımıyla çizilmiş, boyları 4 yerden, çapları 6 yerden kumpas ile 0.1 mm hassasiyette ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Elde edilen ortalama boy ve çap uzunlukları kullanarak örneklerin hacimleri Eşitlik 3.1'deki formül ile hesaplanmıştır.

Numunelerin hacimleri aşağıdaki formül ile belirlenmiştir:

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad (3.1)$$

Deney numuneleri üzerinde herhangi bir kirlilik kalmaması için sert bir fırça yardımıyla temizlenmiş ve  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  etüvde değişmez kütle gelinceye kadar kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler nem almaması için desikatörlere yerleştirilmiş ve oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması için bekletilmiştir. Soğuma işlemi tamamlamış numuneler 0.1 gr hassasiyete sahip terazi ile tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Numuneler, içerisinde oda sıcaklığında ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ) su bulunan bir kap içine numune boyutunun yarısına gelinceye kadar suyun içinde kalacak şekilde düzgün bir biçimde yerleştirilerek 1 saat bekletilmiştir. 1 saat bekletildikten sonra numune boyutlarının  $\frac{3}{4}$  'ü su içinde kalacak şekilde su ekleyerek 1 saat daha bekletilmiştir. Süre sonunda numune boyutunun en az 2 cm üzerinde kalacak biçimde su ilave edilmiş ve numuneler değişmez kütle gelinceye kadar bekletilmiştir. Suyu doğun hale getirilen numuneler dikkatli bir biçimde suyun içerisinden çıkarılmış, nemli bir bezle üzerindeki su damlaları alındıktan sonra 0.1 gr hassasiyetle tartılarak doğun ağırlıkları saptanmıştır.

Numunelerin doğal haldeki birim hacim ağırlıkları aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$d_{doç} = \frac{G_{doç} * g}{V} \quad (3.2)$$

Numunelerin doğun haldeki birim hacim ağırlıkları aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$d_d = \frac{G_d * g}{V} \quad (3.3)$$

Numunelerin kuru haldeki birim hacim ağırlıkları aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$d_k = \frac{G_k * g}{V} \quad (3.4)$$

Burada;

$d_{dog}$ : Doğal birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )

$d_d$ : Doygun birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )

$d_k$ : Kuru birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )

$G_k$ : Numunelerin kuru haldeki ağırlığı (g)

$G_{dog}$ : Numunelerin doğal haldeki ağırlığı (g)

$G_d$ : Numunelerin doygun haldeki ağırlığı (g)

$V$ : Hacim ( $cm^3$ )

$g$ : Yerçekimi ivme sabiti ( $9.81 m/s^2$ )

### 3.2.3.2. Su emme deneyi

Kayaçların ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri TS 699'da tanımlanan yöntemle belirlenmiştir (TS 699, 2009). Deney için karot alma makinesi ile düzgün geometriye sahip (silindirik) 5 adet numune alınmış ve uçları karot ucu kesme ve düzeltme makinesi ile kesilip düzeltilmiştir. Deney numuneleri sert bir fırça yardımıyla temizlenmiş ve değişmez kütle gelinceye kadar  $105 \pm 5^\circ C$  etüvde kurutulmuştur. Etüvden alınan numuneler desikatörde oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmuştur. Oda sıcaklığına ulaşan numunelerin kuru ağırlıkları 0.1 gr hassasiyete sahip terazi yardımıyla saptanmıştır. Numuneler, içerisinde oda sıcaklığında ( $20 \pm 5^\circ C$ ) su bulunan bir kap içine numune boyutunun yarısına kadar suyun içinde kalacak şekilde yerleştirilerek 1 saat bekletilmiştir. 1 saat bekletildikten sonra numune boyutlarının  $\frac{3}{4}$ 'ü su içinde kalacak şekilde su ilave edilmiş ve 1 saat daha beklemeye bırakılmıştır. Süre sonunda numune boyunu en az 2 cm geçecek şekilde su ilave edilmiş ve bu durumda değişmez kütle gelinceye bekletilmiştir. Suyu doygun hale getirilen numuneler sudan çıkarılmış, nemli bir bezle üzerindeki su damlaları alındıktan sonra 0.1 gr hassasiyetle tartılarak doygun ağırlıkları saptanmıştır.

Numunelerin ağırlıkça ve hacimce su emme oranları aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır:

$$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} \times 100 (\%) \quad (3.5)$$

$$S_h = \frac{G_d - G_k}{V} \times 100 (\%) \quad (3.6)$$

Burada;

$S_k$ : Numunenin ağırlıkça su emme oranı (%)

$S_h$ : Numunenin hacimce su emme oranı (%)

$G_d$ : Numunenin doygun haldeki kütlesi (g)

$G_k$ : Değişmez kütleyle kadar kurutulmuş numunenin kütlesi (g)

### 3.2.3.3. Porozite tayini

**Görünür Porozite:** Kayaçların görünür porozitesi (hacimce su emme) TS 699'da belirtilen aşağıdaki formül kullanılarak tayin edilmiştir (TS 699, 2009).

$$N = \frac{G_d - G_k}{V} * 100 (\%) \quad (3.7)$$

Burada;

$N$ : Porozite (%)

$G_d$ : Numunelerin doygun haldeki ağırlıkları (g)

$G_k$ : Numunelerin kuru ağırlıkları (g)

**Gerçek Porozite:** Kayaçların gerçek porozite değeri TS 699'da belirtilen aşağıdaki formül kullanılarak tayin edilmiştir (TS 699, 2009).

$$P = \left(1 - \frac{d_h}{d_o}\right) \times 100 (\%) \quad (3.8)$$

Burada;

P: Hakiki Porozite (%)

$d_h$ : Numunenin kuru birim hacim ağırlığı (g)

$d_o$ : Numunenin özgül ağırlığı (g)

### 3.2.3.4. Özgül ağırlık tayini

Kayaçların özgül ağırlık değerleri TS EN 1936'da belirtilen yönteme göre belirlenmiştir (TS EN 1939, 2010). Deney için kayaçlardan yaklaşık 5 kg kadar parça numune alınmıştır, numuneler ilk olarak çeneli sonra çekiçli kırıcıdan geçirilerek boyut küçültme işlemi yapılmıştır. Daha sonra bilyeli değirmende öğütülerek 0.2 mm'lik elek açıklığına sahip elekte elenmiştir. Temsili numunelerden konileme-dörtleme ve karelej yapılarak 100'er gram malzeme alınmıştır. Numune içerisindeki nemi uzaklaştırmak için 105 °C'lik etüvde değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur.

Oda sıcaklığında saf su ile tamamen doldurulan 50 ml hacmine sahip piknometre, kapağı kapatıldıktan ve üzerindeki su damlaları kuru bir bezle alındıktan sonra 0.01 gr hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır (Gps). Piknometre içindeki su tamamen boşaltılmış ve kapağı ile birlikte etüve konulmuştur. Etüvde kurutulup soğutulduktan sonra kapağı ile birlikte tartılmış ve ağırlığı not edilmiştir (Gp).

Değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulup soğutulmuş olan öğütülmüş numuneden  $2.5 \pm 0.5$  gr kadar alınarak kuru bir huni yardımıyla piknometre içine konulmuş ve kapağı ile birlikte 0.01 gr hassasiyetteki terazide tartılarak ağırlığı belirlenmiştir (Gpn).

İçinde deney numunesi bulunan piknometre, hacminin  $\frac{1}{4}$ 'üne kadar su ile doldurulmuş ve numunelerin taneleri içerisinde hava kabarcıklarının kalmaması için yaklaşık 10-15 dakika süreyle kaynatılmıştır. Daha sonra piknometre tamamen su ile doldurulmuş ve su banyosu içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Kapağı kapatılıp, üzeri kurulandıktan sonra 0.01 gr hassasiyette tartılmış, tartım sonucu kaydedilmiştir (Gpns). Her bir kaya türü için 50 ml hacime sahip üç piknometre kullanılmıştır. Şekil 3.9'da özgül ağırlık deneyi esnasında çekilmiş bir görüntü verilmiştir. Özgül ağırlık değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$d_o = \frac{G_{pn} - G_p}{(G_{pn} - G_p)(G_{pns} - G_{ps})} \quad (3.9)$$

Burada;

$d_o$ : Numunenin özgül ağırlığı ( $g/cm^3$ )

$G_{pn}$ : Piknometre + deney numunesi ağırlığı (g)

$G_p$ : Piknometre ağırlığı (g)

$G_{pns}$ : Piknometre + deney numunesi + su ağırlığı (g)

$G_{ps}$ : Su ile dolu piknometre ağırlığı (g)



Şekil 3.9. Özgül ağırlık deneyine ait bir görüntü

### 3.2.3.5. Doluluk oranı tayini

Kayaçların doluluk oranı TS 699'da tanımlanan formüle göre belirlenmiştir (TS 699,2009).

$$k = \left( \frac{d_h}{d_o} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

Burada;

k: Doluluk oranı

$d_h$ : Kuru birim hacim ağırlığı ( $g/cm^3$ )

$d_o$ : Özgül Ağırlık ( $g/cm^3$ )



### 3.2.3.6. Kılcal su emme (kapilarite) tayini

Kayaçların kılcal su emme (kapilarite) değerleri TS EN 1925’de tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir (TS 1925, 2000). Deney için her bir kaya türünden düzgün geometriye sahip 5 adet karot numunesi alınmış ve numunelerin su ile temas edecek yüzey alanlarını belirlemek için 0.1 mm hassasiyete sahip kumpasla ölçüm yapılmıştır. Elde edilen ortalama çap değerleri kullanılarak örneklerin yüzey alanları Eşitlik 3.11’deki formül ile hesaplanmıştır. Deney için kullanılacak numuneler etüvde ( $105 \pm 5$  °C’de) değişmez kütleyle ulaşıncaya kadar kurutulmuş, dış ortamdan nem kapmaması için desikatör içerisinde oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar soğutularak tartılmıştır (Md).

Deneye başlamadan önce numunelerin tabanının suya maruz kalacağı 3 mm’lik mesafe karot numunesi üzerinde işaretlenmiştir. Daha sonra boş su tankı içerisine numunelerin tabanından su alabilmesi için ızgara yerleştirilmiştir. Kılcal su emme deneyine tabii tutulacak numuneler ızgaraya düzgün biçimde yerleştirilmiştir. Numunelerin tabanı  $3 \pm 1$  mm su içerisinde kalacak şekilde su ilave edilmiştir (Şekil 3.10). Deney sırasında dış ortamın sıcaklığından kaynaklı su azalmalarına dikkat edilerek gerektiğinde tankın içerisine su ilavesi yapılmıştır.

Kılcal su emme değerlerini belirlerken, numuneler su ile temas ettikleri anda kronometre çalıştırılarak 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 480, 1440, 2880 ve 4320. dakikalardaki numune ağırlıkları ( $M_i$ ) belirlenmiştir (Şekil 3.10). Örneklerin deney başlamadan önce belirlenen kuru ağırlıkları ( $M_d$ ), belirli zamanlarda ( $t_i$ ) ölçülen ağırlıkları ( $M_i$ ) ve deney sonundaki ağırlıkları ( $M_f$ ) kullanılarak Eşitlik 3.12 ve 3.13 yardımıyla kılcal su emme (kapilarite) değerleri hesaplanmıştır.

$$A = \pi \times r^2 \quad (3.11)$$

$$C_y = \frac{M_i - M_d}{A \sqrt{t_i}} \quad (\%) \quad (3.12)$$

$$C_d = \frac{M_f - M_d}{A \sqrt{t_i}} \quad (\%) \quad (3.13)$$

Burada;

A: Numunenin su ile temas ettiği yüzeyin alanı ( $m^2$ )

$M_i$ : Belirli sürelerde kılcal su emmeye maruz kalan numunenin ağırlığı (g)

$M_d$ : Deney sonunda kılcal su emmeye maruz kalan numunenin ağırlığı (g)

$t_i$ : Süre (sn)

$C_y$ : Belirli sürelerde kılcal su emme değerleri (%)

$C_d$ : Deney sonunda kılcal su emme değerleri (%)



Şekil 3.10. Kapilerite deneyine ait görüntü

### 3.2.3.7. Schmidt çekiçi sertlik indeksi tayini

Kayaçların Schmidt çekiçi sertlik değerleri ISRM 1978'de belirtilen yöntemle göre belirlenmiştir. Deneye başlamadan aletin kalibrasyon kontrolü için sertlik değeri belli olan standart test aparatı üzerinde 10 adet sertlik ölçümü yapılmış ve ortalaması alınmıştır (ISRM, 1978a). Deney 54 mm çapında (NX) silindirik karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çekiçin uygulandığı numune yüzeylerinin düzgün ve çatlaksız olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 3.11'de görüldüğü üzere numune Schmidt çekiçi için özel olarak hazırlanmış aparatın içerisine yerleştirilmiştir. Numune yüzeyine dik bir biçimde çekiçin ucu yavaşça bastırılmış ve çekiçin iç kısmında bulunan yaydan geri sıçrama sesi geldiği anda, çekiçin gövde kısmındaki göstergesinin sabitleme düğmesine basılmıştır. Kayaca ait geri sıçrama değeri çekiçin gövdesinde bulunan göstergeden okunarak tespit edilmiştir. Her bir numune için en az 20 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Deney numunesi üzerinde

yapılan ölçümler arası uzaklığın en az Schmidt çekicinin ucu kadar olmasına dikkat edilmiştir. Ölçüm esnasında herhangi bir çatlak oluşması veya gözle görülebilir bir yenilmenin gelişmesi durumunda deney geçersiz sayılmıştır.

Her bir karot numunesinden elde edilen 20 adet ölçüm büyükten küçüğe doğru sıralanmış ve en büyük 10 değerın aritmetik ortalaması alınarak numuneye ait Schmidt çekici sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Her bir çevresel etmen için her bir kaya türünden beş adet numune kullanılmıştır. Dolayısıyla üç kaya türü ve beş çevresel koşul için 75 karot numunesinden Schmidt çekici sertliği tayin edilmiştir.



Şekil 3.11. Schimidt çekici ile sertlik ölçümü

### **3.2.4. Kayaçların mekanik özelliklerini belirleyen deneyler**

#### **3.2.4.1. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi**

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değeri ISRM 1978 standardında tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir (ISRM, 1978b). Arazi ortamından laboratuvar ortamına getirilen blok numuneler deney sonucunu etkileyebilecek herhangi bir darbe ve hasara uğramadan karot alma makinesinin alt tablasına düzgün bir biçimde yerleştirilmiş

ve karot alma esnasında numune hareket etmemesi için sıkı bir biçimde sabitlenmiştir. NX (54.7 mm çaplı) karotiyer yardımıyla silindirik karot numuneleri alınmış, karot ucu kesme ve düzeltme makinesinde L/D oranı 2.0-2.5 olacak biçimde kesilmiş ve yükleme yapılacak yüzeyler birbirine paralel olacak şekilde düzeltilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Düzgün geometrik şekle getirilen numunelerin çap ve boy ölçümlerini gerçekleştirmek için V yatak aracılığıyla eksenleri çizilmiştir. Numunelerin çapları 6 noktadan ve boyları 4 noktadan 0.1 mm hassasiyete sahip kumpas ile ölçülerek ortalama çap ve boy değerleri belirlenmiştir. Numune üzerine yükleme yapılacak kesit alanı (A) hesaplanmıştır. Kırılmaya maruz kalacak numuneler deneye tabi tutulmadan önce beş farklı çevresel ortamda koşullandırılmıştır. Tahribatsız ölçümler tamamlandıktan sonra numune, presin ortasındaki yükseltme plakasının tam ortasına gelecek şekilde altına ve üstüne küresel yüzeyli iki çelik silindirik platen yerleştirilmiştir. Presin uygulayacağı yükleme hızı 0.5 kN/s olarak ayarlanmış ve deney numunesi kırılıncaya kadar sabit yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deney numunesi yenilmeye uğramadan önce üzerine etki eden en büyük yük presin göstergesinden okunarak kaydedilmiştir. Şekil 3.12’te tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılan prese ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.12. Hidrolik basınç presi

Numunenin basınç dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$f_b = \frac{P_k}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (3.14)$$

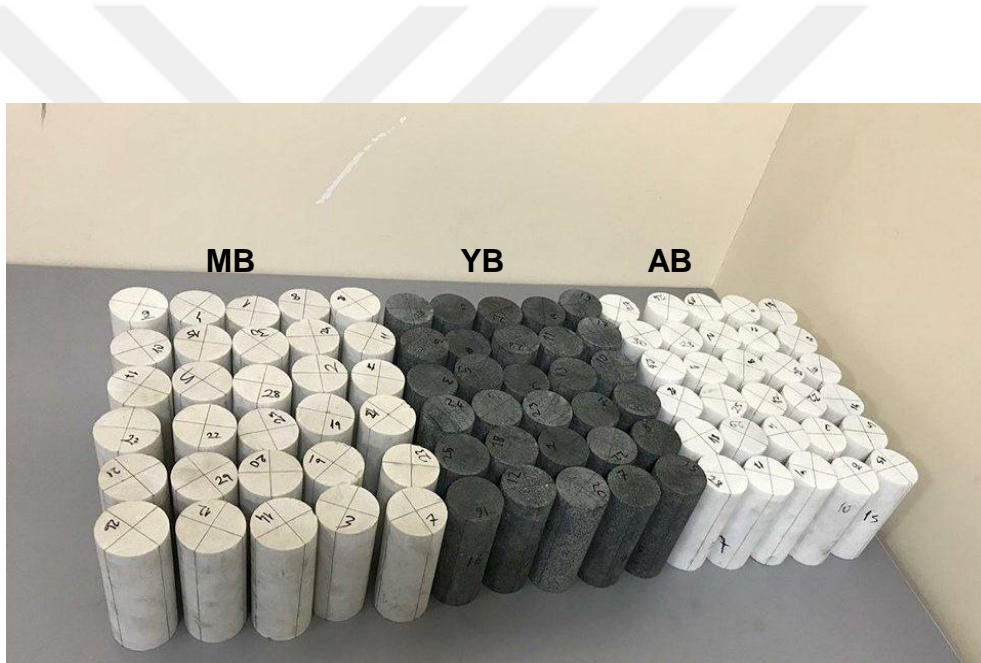
Burada;

$f_b$ : Numunenin basınç dayanımı (MPa)

$P_k$ : Kırılmaya sebep olan en büyük yük (kN)

$A$ : Numunenin yük uygulanan yüzeyinin alanı ( $\text{cm}^2$ )

Şekil 3.13'te ise tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılan numunelere ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.13. Tek eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılan numuneler

#### 3.2.4.2. Nokta yükleme dayanımı deneyi

Kayaçların nokta yükleme dayanımı deneyi ISRM (1985)'te belirtilen yöntemle gerçekleştirilmiştir. Her bir çevresel koşul için karot ucu kesme ve düzeltme makinesi yardımıyla boy/çap oranı 1-1.4 olan 10 adet silindirik karot numune kesilmiştir. 0.1 mm hassasiyete sahip kumpas ile numunelerin boy ve çapları ölçülerek not edilmiştir. Belirlenen çevresel ortama maruz kalan numunelere çapsal nokta yükleme dayanımı testi

uygulanmıştır. Bu amaçla numuneler nokta yükleme test cihazının konik uçları arasında karot eksenine dik yönde yerleştirilmiştir. Konik uçlar arasında yerleştirilen numuneler 10-60 saniye arasında kırılacak biçimde manuel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Numunenin kırıldığı andaki yük kN cinsinden (P) dijital göstergeden okunmuş ve not edilmiştir. Şekil 3.14'te çapsal nokta yükleme dayanımı deneyinin uygulamasına ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.14. Nokta yükleme test cihazı

Elde edilen yük değerleri kullanılarak düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3.15)$$

Burada;

$I_s$ : Nokta yük dayanımı indeksi (MPa)

P: Kırılma yükü (kN)

$D_e$ : Eşdeğer karot çapıdır (mm).

Bulunan düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi değerinden aşağıdaki formül kullanılarak düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi değeri bulunmuştur.

$$I_{s50} = F \times I_s \quad (3.16)$$

Burada;

$I_{s(50)}$ : Düzeltilmiş nokta yükleme dayanım indeksi(MPa)

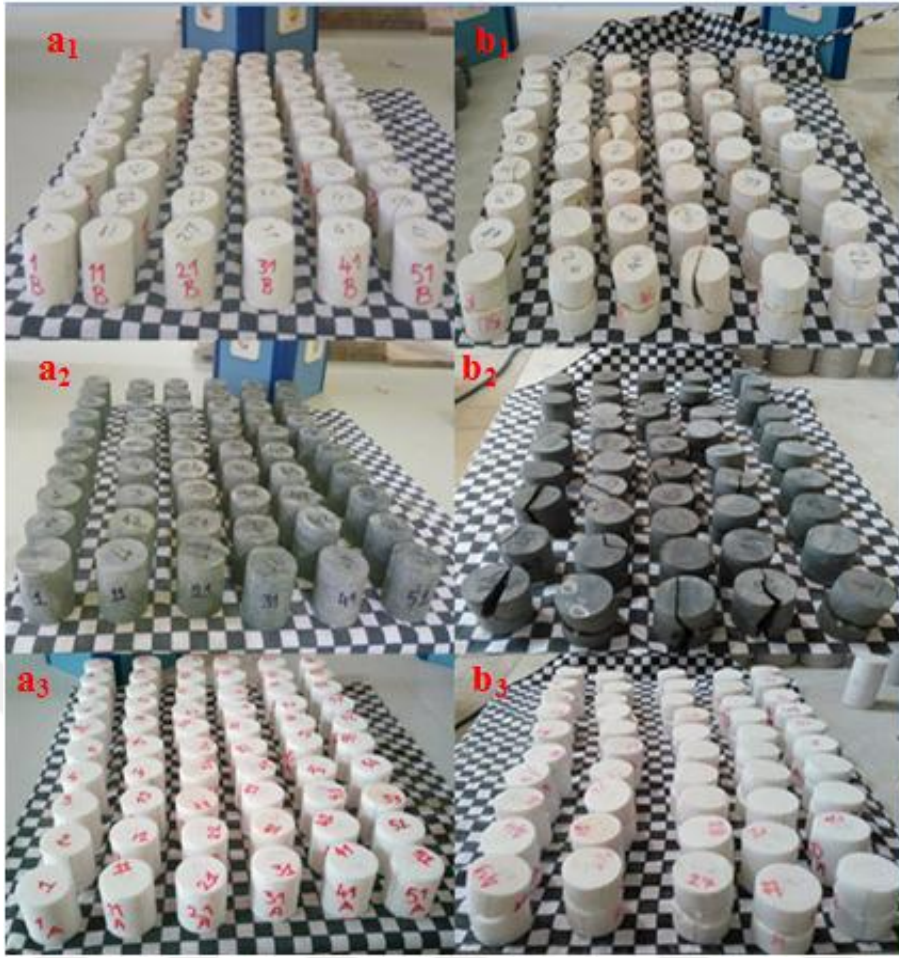
F: Boyut düzeltme faktörüdür.

$$F = \left( \frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (3.17)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Her bir çevresel koşul için 10 adet geçerli deney sonunda elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak kayaçların nokta yükleme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.16'da ise nokta yükleme dayanım deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi ve sonrası görüntüsü verilmiştir.





Şekil 3.16. Nokta yükleme deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi (a<sub>1</sub>-a<sub>3</sub>) ve deney sonrasına (b<sub>1</sub>-b<sub>3</sub>) ait görüntüleri (a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB)

### 3.2.4.3. Sonik hız deneyi

Kayaçların ultrasonik dalga hızları ISRM 1978 tarafından belirtilen yöntemle göre belirlenmiştir (ISRM, 1978c). Deney L/D oranı 2.0-2.5 olan ve NX (54 mm) çaplı silindirik karot numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyu ve çapı kumpas ile 0.1 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Numunenin alt ve üst kısmına konulan silindir şeklinde platenlerin, maksimum 2 derece eğim yapacak şekilde ayarlaması nedeniyle gönderici ve alıcının konumları örnek yüzeyinde V yatak yardımıyla işaretlenmiştir. Ayrıca gönderici ve alıcının temas ettiği yüzeylerin düzgün ve birbirine paralel olmasına özen gösterilmiştir. Deneyde düzgün geometriye sahip karot numuneleri kullanıldığı için sinyalin ilerleme mesafesi karotun boyuna (L) eşit olarak kaydedilmiştir. Sinyalin ilerleme



mesafesi 0.025 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Deneye başlamadan önce dalga hızı belli olan numune üzerinde ölçüm yapılarak cihaz kalibre edilmiştir. Cihazın sinyal üreticisinin voltaj çıktısı, osiloskopun ve yükselticinin duraylılığı uygun zaman ölçümünün yapılması amacıyla ayarlanmıştır. Bu ayarlamalardan sonra dakikada bir veya iki okuma yapılacak şekilde sinyal gönderilerek ses dalgasının (P) numuneden geçiş süresi ( $t_p$ ) %1 duraylılıkla ölçülmüş, başlangıç zamanı ( $t_0$ ) sıfır olarak alınmıştır.

Kayacın P dalga hızını belirlemek için P plateni takılmıştır. Yükselticiden gelen iki kablo silindirik P platenlerin her iki ucuna temas ettirilen çevirgeçlere takılmıştır. Gönderici ve alıcı ile karot numunesinin yüzeyleri arasındaki teması artırmak amacıyla numunenin alt ve üst yüzeyine jel sürülmüştür. Platenler arasındaki karot numunesi boşluk kalmayacak şekilde sıkı bir biçimde tutularak okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. P dalga hızı ölçümü bittikten sonra P platenleri çıkarılıp yerine S platenleri takılarak S dalga hızı ölçümü yapılmıştır. Ölçümler her bir çevresel koşulu için 5 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.16'da deney esnasında çekilmiş görüntüye yer verilmiştir.



Şekil 3.16. Sonik hız deneyine ait bir görüntü

Yayılma hızları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır:

$$V_p = L / T_p \quad (3.18)$$

$$V_s = L / T_s \quad (3.19)$$

$$T_p = (t_p - t_0) \quad (3.20)$$

$$T_s = (t_s - t_0) \quad (3.21)$$

Burada;

L: Silindirik deney örneğinin boyu (sinyalin katettiği mesafe, mm)

$V_p$ : P dalgasının yayılma hızı (m/s)

$V_s$ : S dalgasının yayılma hızı (m/s)

$t_p$ : P dalgasının ölçülen yayılma zamanı ( $\mu$ s)

$t_s$ : S dalgasının ölçülen yayılma zamanı ( $\mu$ s)

$T_p$ : P dalgasının etkin ilerleme zamanı ( $\mu$ s)

$T_s$ : S dalgasının etkin ilerleme zamanı ( $\mu$ s)

$t_0$ : Ölçülen sıfır (başlangıç) zamanı ( $\mu$ s)

#### 3.2.4.4. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı deneyi

Kayaçların Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı TS 7654'te belirtilen yöntemle göre gerçekleştirilmiştir (TS 7654, 1989). Her bir çevresel koşul için L/D oranı 0.5 olan 10 adet silindirik disk numune karot ucu kesme ve düzeltme makinesi yardımıyla hazırlanmıştır. Çapı ve kalınlığı kumpas ile 0.1 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Belirlenen çevresel ortamda koşullandırılan numuneler Brazilian test aparatının arasına

yerleştirildikten sonra test aparatı yükleme yapılacak presin orta kısmına yerleştirilmiştir. Yükleme hızı 0.2 kN/s olarak ayarlanmış, numune 15-30 saniye içerisinde kırılmıştır. Zamana bağlı olarak düşey yönde uygulanan yükün artması ile yatay yönde meydana gelen çekme gerilmelerinin şiddeti de artmıştır. Yatay çekme gerilmesi numunenin çekme dayanımını aştığı anda numune yükleme doğrultusunda kırılmıştır. Kırılma anında elde edilen maksimum yük, presin dijital göstergesinden okunarak not edilmiştir.

Numunenin dolaylı yoldan çekme dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_{\xi} = \frac{0,636 * P_k}{D * t} \quad (3.22)$$

Burada;

$\sigma_{\xi}$  : Numunenin dolaylı yoldan çekme dayanımı (MPa)

$P_k$ : Yenilme anında numuneye uygulanan maksimum yük (kN)

D: Numunenin çapı (mm)

t: Numunenin kalınlığı (mm)

Her bir çevresel koşul için 10 adet geçerli deney sonunda elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak kayaçların Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı hesaplanmıştır. Şekil 3.17’de Brazilian deneyinde kullanılan aparat ve Şekil 3.18’de ise deneyde kullanılan numunelerin deney öncesi ve sonrasına ait görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.17. Brazilian test aparatı



Şekil 3.18. Brazilian deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi (a<sub>1</sub>-a<sub>3</sub>) ve deney sonrasında (b<sub>1</sub>-b<sub>3</sub>) ait görüntüleri (a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB)

### 3.2.4.5. Yarı dairesel eğilme deneyi

Kayaçların yarı dairesel eğilme dayanımı değerleri Kurubbu vd. (2014) tarafından tanımlanan yönteme göre gerçekleştirilmiştir (Kurubbu vd., 2014). Arazi ortamından laboratuvar ortamına getirilen blok haldeki kayaçlar deney güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilecek her türlü darbe ve hasardan korunarak karot alma makinesinin alt tablasına düzgün bir biçimde yerleştirilerek 100 mm çaplı karotiyer ile karot numuneleri alınmıştır. Blok numunelerden alınan karotlar, Malatya merkez sanayi bölgesinde bulunan Porga Mermer fabrikasında öncelikle kenarlarındaki kusurlar kesilip atıldıktan sonra çap düzlemine dik olarak ikiye ayrılmıştır. Şekil 3.19'da görüldüğü üzere ikiye ayrılan

numuneler üzerinde eksen boyunca yaklaşık 20-25 mm boyunda çentik açılmış ve deney standardına uygun kalınlıkta (40-45 mm) boyutlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce düzgün geometrik şekle sahip olan numunelerin yarıçapları (R), çapları (D), kalınlıkları (B) ve çentik uzunluğu ( $a_0$ ) kumpas ile 0.1 mm hassasiyetle ölçülerek not edilmiştir. Kırılmaya maruz kalacak numuneler deneye tabi tutulmadan önce beş farklı çevresel ortama maruz bırakılmıştır. Şekil 3.20’de görüldüğü üzere numuneler 50 kN kapasiteye sahip Marshall test cihazına takılı olan yarı dairesel eğilme test aparatının tam ortasına gelecek şekilde konulmuş ve bilgisayar kontrollü çalışılmıştır. Yük uygulanacak nokta ile açılan çentiğin aynı düzlemde olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca yükleme yapılmadan önce yük-deformasyon ilişkisini belirlemek için deformasyon test çubuğu yarı dairesel eğilme test aparatı üzerine düzgün bir biçimde yerleştirilmiştir. Yükleme başlamadan önce bilgisayarda excel verilerinin aktarılacağı dosyalar açılmış, her bir dosya üç deney numunesinin verisini alacak şekilde ayarlanmıştır. Presin uygulayacağı yükleme hızı 0.2 mm/dk olarak ayarlandıktan sonra deney numunesi kırılıncaya kadar sabit yüklemeye maruz bırakılmıştır. Maksimum dayanım yüküne ulaşıldıktan sonra numune yenilmiştir. Bu işlem üç kez tekrar edilmiş ve yük-deformasyon verileri excel dosyası halinde alınmıştır.

Kayaçların yarı dairesel eğilme dayanımı aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır:

$$Y = -1.297 + 9.516 \frac{S}{2R} - (0.47 + 16.457 \frac{S}{2R}) \frac{a_0}{R} + (1.071 + 34.401 \frac{S}{2R}) \left( \frac{a_0}{R} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$K_{Ic} = Y \frac{P_{max} \sqrt{\pi a_0}}{2RB} \quad (3.24)$$

Burada;

Y: Tasarlanan başlangıç çatlak uzunluğuna ( $a_0$ ) karşılık gelen boyutsal olmayan stres yoğunluk faktörü (SIF)

$K_{Ic}$ : Mod I kırılma tokluğu ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

$a_0$ : Başlangıç çentik uzunluğu (mm)

$P_{max}$ : Kırılma meydana geldiğinde maksimum yük (kN)

R: Numunenin çapı (mm)

B: Numunenin kalınlığı (mm)

S: Mesnetler arası mesafe (mm)



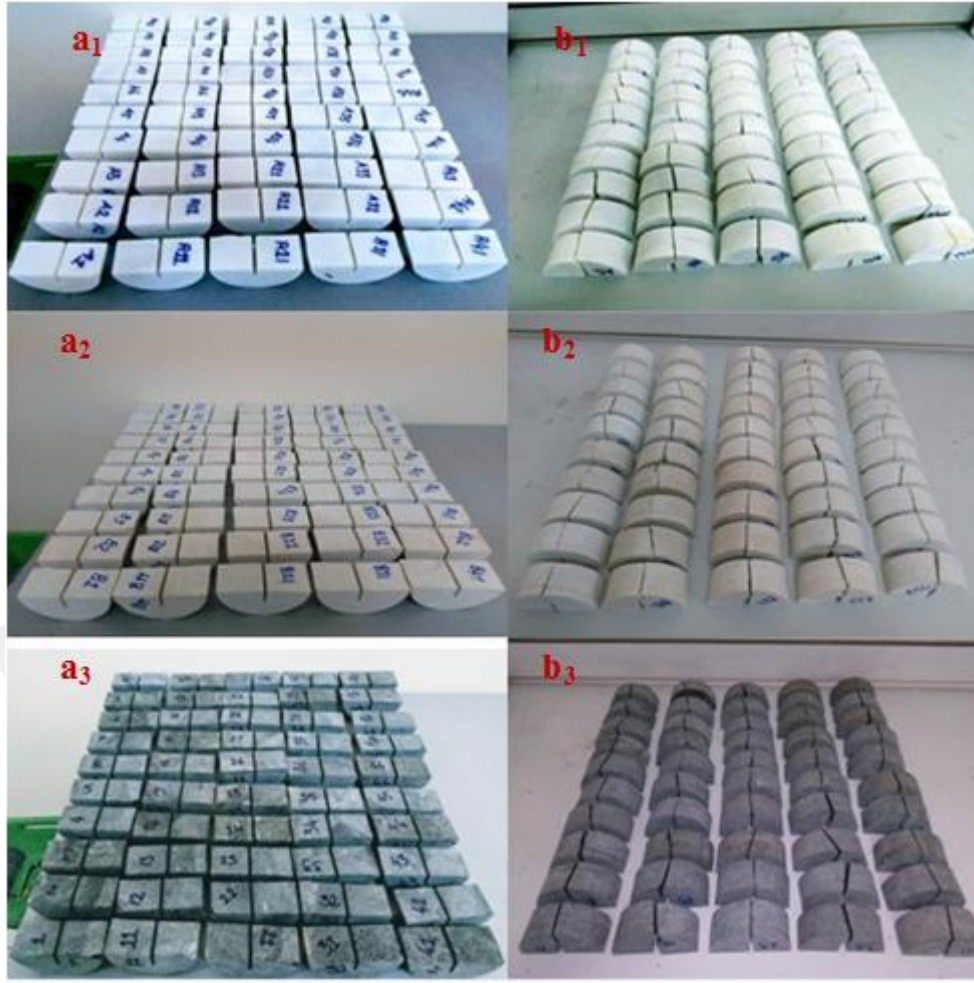


Şekil 3.19. Numune hazırlanmasına ait görüntü



Şekil 3.20. Bilgisayar kontrollü SCB deney çalışmasına ait görüntü

Her bir çevresel koşul için yapılan 10 adet geçerli deney sonunda elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak kayaçların yarı dairesel eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.21’de ise deneyde kullanılan numunelerin deney öncesi ve sonrasına ait görüntüleri yer verilmiştir.



Şekil 3.21. SCB deneyinde kullanılan numunelerin deney öncesi ( $a_1$ - $a_3$ ) ve deney sonrası ( $b_1$ - $b_3$ ) görüntüleri(a,b ve c sırasıyla MB, YB ve AB)

### 3.2.5. Kayaçların kimyasal ve mineralojik özelliklerini belirleyen deneyler

#### a) XRF analizi

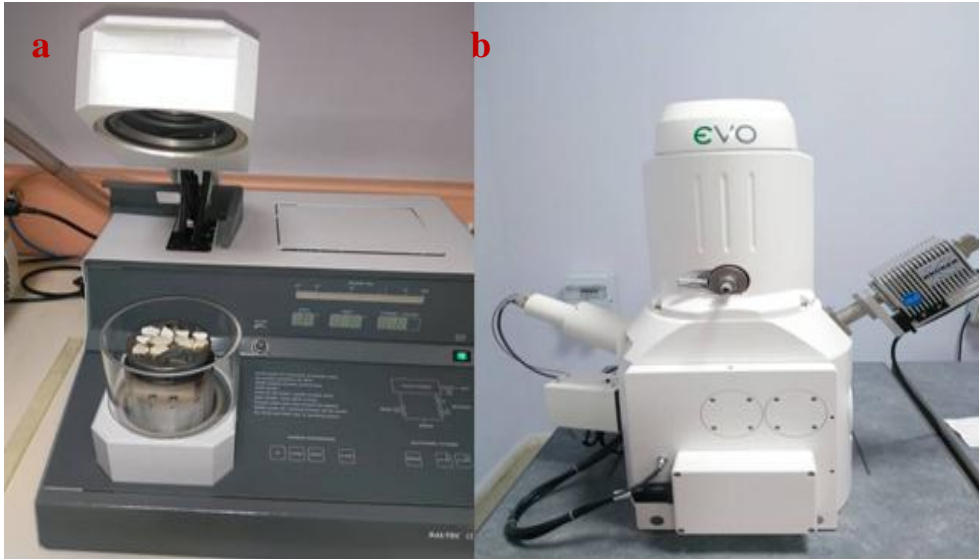
Çalışmada kullanılan kayaçların kimyasal bileşimlerini belirlemek için çeneli ve çekiçli kırıcı ile kırılıp bilyeli değirmende öğütülen ve 212 mikron elekten geçirilen toz halindeki numunelerin XRF analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvar'ında yaptırılmıştır.

## b) Mineralojik bileşim

Çalışmada kullanılan kayaçların mineralojik bileşimlerini belirlemek için çeneli ve çekiçli kırıcı ile kırılıp bilyeli değirmende öğütülen ve 212 mikron elekten geçirilen toz halindeki numunelerin XRD analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel Teknolojik Araştırma Merkezi X-Ray Laboratuvar'ında yaptırılmıştır.

## c) SEM analizi

Çalışmada kullanılan kayaçların kırılma yüzeylerinde meydana gelen değişimleri incelemek için yarı dairesel eğilme deneyinde kullandığımız örneklerin yüzeyinden karot ucu kesme ve düzeltme makinesi yardımıyla temsili örnekler alınmıştır. Yaklaşık 1 cm kalınlığındaki numuneler İnönü Üniversitesi Bilimsel Teknolojik Araştırma Merkezinde düz bir plaka üzerine yerleştirildikten sonra iletkenliğini artırmak için altın tozu ile kaplanmıştır. Daha sonra EVO marka SEM görüntü ölçüm cihazıyla farklı kırılma yüzeylerine ait görüntüler kaydedilmiştir. Şekil 3.22'de SEM analizine ait görüntü bulunmaktadır.



Şekil 3.22. Altın tozu kaplama (a) ve SEM analizine (b) ait görüntü



#### d) Kızdırma kaybı tayini

Çalışılan kayaçların kızdırma kaybı tayini Quadhi 2008’de belirtilen yöntemle göre gerçekleştirilmiştir. Her bir kaya türü için yaklaşık 5 kg kadar temsili numune ilk olarak çeneli kırıcı daha sonra çekiçli kırıcı kullanılarak boyutları küçüldükten sonra bilyeli değirmende öğütülmüş ve 212 mikron elek açıklığına sahip elekten elenmiştir. Temsili numunelerden ilk olarak konileme-dörtleme ile örnek azaltma işlemi yapıldıktan sonra karelej yapılarak 2’şer gram malzeme alınmış, tartım sonucu  $m_0$  olarak kaydedilmiştir. Hazırlanan numuneler 1050 °C’deki kül fırınında (Şekil 3.23) 30 dakika bekletilmiş, sonra desikatörde soğutulup tartılmıştır. Tartım sonucu  $m_1$  olarak kaydedilmiştir.

Örneklerin kızdırma kaybı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Kızdırma kaybı} = 100 \cdot (m_0 - m_1) \quad (3.25)$$

Burada;

$m_0$ : Pişirim işleminden önceki örnek ağırlığı (g)

$m_1$ : Pişirim işleminden sonraki örnek ağırlığı (g)



Şekil 3.23. Kül fırını

### 3.2.6. İstatistiksel yöntemler

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak SPSS 20 paket programı aracılığıyla basit regresyon, çoklu regresyon ve yapay sinir ağı metodları kullanılarak farklı çevresel etmenler altında elde edilen fiziko-mekanik özellikler ile yarı dairesel eğilme dayanımı deneyinden elde edilen mod I kırılma tokluğunun ilişkilerini istatistiksel olarak tahminleyecek modeller geliştirilmiştir. Farklı çevresel koşullar için her bir kaya türüne ait deney sonuçlarından 5 adet veri SPSS 20 paket programına tanımlanmıştır. Tahribatsız deney yöntemlerinden olan Schmidt çekici sertliği ve  $V_p$ - $V_s$  dalga hızları tek eksenli basınç dayanımında kullanılan numunelere ait olup kırılmadan önce belirlenmiştir. Dolayısıyla, kayaçların Schmidt çekici sertliği,  $V_p$ - $V_s$  dalga hızları ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri aynı numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler ile belirlenmiştir. Fakat aynı kayadan farklı numuneler üzerinde yapılan nokta yükleme dayanımı, Brazilian (dolaylı yoldan) çekme dayanımı ve yarı dairesel eğilme dayanımı deneyinde her bir çevresel koşul için 10 adet veri bulunmaktadır. Bu veriler, SPSS 20 paket programında rastgele % 50 azaltılarak yarıya düşürülmüştür. Seçilen sonuçlara herhangi bir müdahale yapılmadan veriler diğer deney sonuçlarına karşılık olarak kabul edilmiştir. İstatistiksel çalışmalarda kullanılan ve SPSS 20 paket programı tarafından seçilmiş olan deney verileri EK 2’de verilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmada kullanılan magmatik, metamorfik ve sedimanter kökenli 3 farklı kayaç örneğinin kökenleri, ticari isimleri ve kodlamaları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan kayaçların kodu, ticari isimleri ve kökenleri

Kodu	Ticari İsimleri	Kökenleri
YB	Malatya (Yazıhan) Bazalt	Magmatik
MB	Malatya (Akçadağ) Bej	Sedimanter
AB	Afyon Beyaz Mermeri	Metamorfik

### 4.1. Deneysel Çalışmaların Sonuçları

#### 4.1.1. Çalışılan kayaçların fiziksel özellikleri

##### 4.1.1.1 Birim hacim ağırlığı

TS 699’a göre yapılan birim hacim ağırlığı deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2-4.4’ de verilmiştir (TS 699, 2009).

Çizelge 4.2. YB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri

Örnek No	Doğal Birim Hacim	Kuru Birim Hacim	Doygun Birim
	Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
1	28.137	28.113	28.177
2	25.932	25.922	25.965
3	28.140	28.118	28.171
4	28.092	28.066	28.132
5	26.037	26.011	26.091
Ort±Sdt. Sap.	27.268±1.172	27.246±1,169	27.307±1,169

Çizelge 4.3. MB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri

Örnek No	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Doygun Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
1	26.250	26.244	26.275
2	26.324	26.326	26.344
3	26.317	26.310	26.337
4	26.341	26.334	26.360
5	26.396	26.390	26.408
Ort±Sdt. Sap.	26.326±0.052	26.321±0.053	26.345±0.048

Çizelge 4.4. AB örneğinin birim hacim ağırlığı değerleri

Örnek No	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )	Doygun Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
1	26.406	26.404	26.439
2	26.416	26.413	26.442
3	26.415	26.413	26.441
4	26.288	26.284	26.309
5	26.394	26.393	26.417
Ort±Sdt. Sap.	26.384±0.054	26.381±0.055	26.409±0.057

#### 4.1.1.2. Su emme deneyi sonuçları

TS 699'a göre yapılan su emme deneyi sonucunda elde edilen ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri Çizelge 4.5 – 4.7'de verilmiştir (TS 699, 2009).

Çizelge 4.5. YB örneğinin su emme değerleri

Örnek No	Ağırlıkça Su Emme (%)	Hacimce Su Emme (%)
1	0.227	0.651
2	0.167	0.441
3	0.188	0.540
4	0.237	0.677
5	0.311	0.824
Ortalama ± Std. Sap.	0.226±0.55	0.627±0.145

Çizelge 4.6. MB örneğinin su emme değerleri

Örnek No	Ağırlıkça Su Emme (%)	Hacimce Su Emme (%)
1	0.120	0.320
2	0.070	0.189
3	0.103	0.277
4	0.097	0.260
5	0.066	0.177
Ortalama ± Std. Sap.	0.091±0.023	0.245±0.061

Çizelge 4.7. AB örneğinin su emme değerleri

Örnek No	Ağırlıkça Su Emme (%)	Hacimce Su Emme (%)
1	0.133	0.358
2	0.106	0.286
3	0.105	0.282
4	0.094	0.251
5	0.094	0.253
Ortalama ± Std. Sap.	0.106±0.016	0.286±0.043

#### 4.1.1.3. Özgül ağırlık deneyi sonuçları

TS 699'a göre yapılan özgül ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir (TS 699, 2009).

Çizelge 4.8. Çalışılan kayaçların özgül ağırlık değerleri

Örnekler	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )
YB	2.90±0.003
MB	2.77±0.002
AB	2.76±0.002

#### 4.1.1.4. Doluluk oranı deneyi sonuçları

TS 699'a göre yapılan doluluk oranı hesaplamaları sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir (TS 699, 2009).

Çizelge 4.9. Çalışılan kayaçların doluluk oranı değerleri

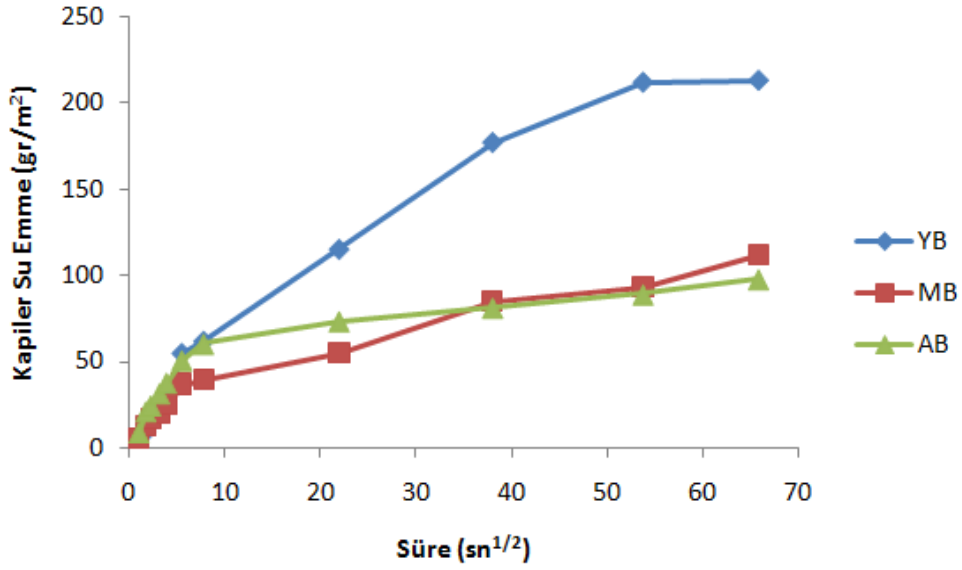
Örnekler	Doluluk Oranı Değerleri (%)
YB	99.373
MB	99.755
AB	99.714

#### 4.1.1.5. Kapilerite değerleri deneyi sonuçları

TS EN 1925'e göre yapılan kapiler su emme deneyi sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir (TS EN 1925, 2000). Ayrıca zamana bağlı olarak kılcal su emme değerlerindeki değişimin grafiksel görünümü Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Çalışılan kayaçların kapiler su emme değerleri

Örnekler	Kapiler Su Emme ( $gr.\sqrt{sn}$ )/ $m^2$ )
YB	3.90
MB	1.70
AB	1.49



Şekil 4.1. Kayaçların zamana bağlı olarak kılcal su emme değişimi

Çizelge 4.10 incelendiğinde en yüksek ortalama kapiler su emme değeri 3.90 ( $gr.\sqrt{sn}$ )/ $m^2$ ) ile Yazıhan Bazalt örneğine, en düşük ortalama kapiler su emme değerinin ise 1.49 ( $gr.\sqrt{sn}$ )/ $m^2$ ) ile Afyon Beyaz örneğine ait olduğu görülmektedir. Kapiler su emme değeri yüksek olan Yazıhan Bazaltın ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin de yüksek olduğu Çizelge 4.5'te görülmektedir. Kayaç örneklerinin yüzey alanına bağlı kılcal su emme değerlerinin zamanın karekökü ile değişim grafiği (Şekil 4.1) incelendiğinde örneklerde belirli bir süreye kadar hızlı bir kılcal su emme gözlemlenirken, bir süre sonunda kayacın kılcal olarak neredeyse doygun hale geldiği görülmektedir. Bu durum özellikle metamorfik kökenli Afyon Beyaz örneğinde görülmektedir. Çizelge 4.10 ile Şekil 4.1 incelendiğinde Malatya bej ile Afyon beyaz örneklerinin kılcal su emme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

#### 4.1.1.6. Porozite

TS 699'da tanımlanan yöntemle göre belirlenen porozite değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir (TS 699, 2009).

Çizelge 4.11. Çalışılan kayaçların görünür porozite değerleri

Örnek No	YB (%)	MB (%)	AB (%)
1	0.651	0.320	0.358
2	0.441	0.189	0.286
3	0.540	0.277	0.282
4	0.677	0.260	0.251
5	0.824	0.177	0.253
Ort.±Std. Sap	0.627±0.145	0.245±0.061	0.286±0.043

(Tarhan, 1989) sınıflamasına göre (Çizelge 2.1) çalışılan tüm kayaçların çok kompakt yapıya sahip olduğu görülmektedir (Tarhan, 1989). Derinlerde meydana gelen magmatik kayaçlar yüksek sıcaklık ve basınç altında oluştukları için damar ve yüzeyde oluşan kayaçlarına nazaran poroziteleri daha düşüktür. Ancak Yazıhan Bazaltı gibi yüzey magmatik kayaçlar aniden soğudukları için yapılarında daha fazla boşluk bulundurmaktadır. Metamorfik kökenli kayaçlar yüksek sıcaklık ve basınç altında alterasyona uğradıkları için çok az gözenekliliğe sahiptir. Rekrystalize kireçtaşı olan Afyon Beyaz örneğinin porozitesinin oldukça düşük olduğu görülmektedir.

#### 4.1.1.7. Sertlik

Kayaçların farklı çevresel ortamlara maruz bırakıldıktan sonra ölçülen Schmidt çekici sertlik değerleri Çizelge 4.12-14'te verilmiştir.



Çizelge 4.12.YB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri

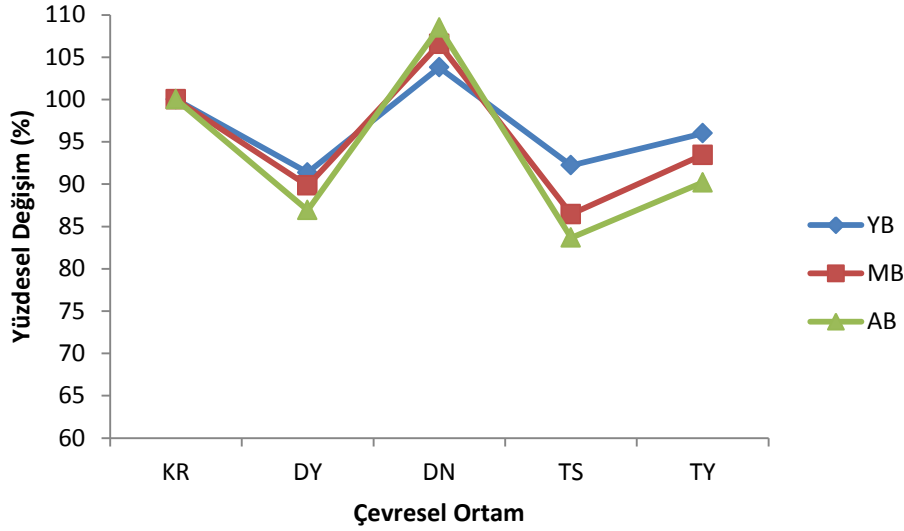
N.No	KR	DY	DN	TS	TY
1	47.6	45.2	49.6	45.0	45.4
2	47.6	43.8	49.8	43.4	45.0
3	48.6	43.8	48.8	44.4	46.2
4	47.2	44.4	49.0	43.0	46.4
5	47.0	44.6	49.4	43.4	44.8
Ort.	47.5±0.6	43.4±0.5	49.3±0.4	43.8±0.7	45.6±0.6

Çizelge 4.13. MB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri

N.No	KR	DY	DN	TS	TY
1	43.4	40.0	47.2	37.6	41.2
2	44.2	40.4	47.0	38.2	41.2
3	45.2	40.0	47.6	38.6	42.0
4	44.4	39.0	47.4	38.0	41.0
5	44.4	39.4	46.6	39.2	40.8
Ort.	44.3±0.6	39.8±0.5	47.2±0.3	38.3±0.5	41.4±0.4

Çizelge 4.14. AB örneğinin farklı çevresel koşullardaki sertlik değerleri

N.No	KR	DY	DN	TS	TY
1	30.4	26.8	33.2	26.2	27.6
2	30.8	26.6	33.4	25.6	28.2
3	30.6	27.2	33.4	26.0	27.8
4	31.2	26.4	33.0	25.2	27.4
5	30.2	26.0	32.8	24.8	27
Ort.	30.6±0.3	26.6±0.4	33.2±0.2	25.6±0.5	27.6±0.4



Şekil 4.2. Schmidt çekicinin çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi

Farklı çevresel koşullara maruz bırakılan kayaçların Schmidt çekici sertlik değerleri incelendiğinde, magmatik kökene sahip olan Yazıhan Bazalt örneğinin en yüksek, metamorfik kökene sahip olan Afyon beyaz örneğinin ise en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 4.13-4.15 incelendiğinde ISRM 1978 sınıflamasına göre Yazıhan Bazalt örneği tüm çevre koşulları için “sert (40-60)” mermerler grubunda, Malatya Bej örneği ise doymun ve termal şok koşullarında “az sert (20-40)” grubunda yer alırken kuru, don ve termal yaşlandırma koşullarında ise “sert (40-60)” grubunda yer aldığı görülmektedir. Afyon Beyaz örneğinin ise tüm çevre koşullarında “Az Sert (20-40)” grubunda yer aldığı görülmektedir.

Şekil 4.2 incelendiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin Schmidt sertliği kuru halden doymun hale geldiğinde % 8.63, termal şok uygulaması sonunda % 7.78, termal yaşlandırma uygulaması sonunda % 4.0 azalırken, donmuş halde % 3.78 artmıştır. Malatya Bej örneğinin Schmidt sertliği kuru halden doymun hale geldiğinde % 10.15, termal şok uygulaması sonunda % 13.54, termal yaşlandırma uygulaması sonunda % 6.54 azalırken, donmuş halde % 6.54 artmıştır. Afyon beyaz örneğinin Schmidt sertliği ise kuru halden doymun hale geldiğinde % 13.07, termal şok uygulaması sonunda % 16.33, termal yaşlandırma uygulaması sonunda % 9.80 azalırken, donmuş halde % 8.49 artmıştır. Yazıhan Bazalt örneğinin çevresel etmenler altındaki sertlik değişiminin diğer iki kaya türüne nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Malatya Bej ve Afyon Beyaz örneğinin termal şok uygulaması sonunda ve doymun haldeki Schmidt çekici sertliğindeki değişim % 10’un üzerindedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değişim değerleri

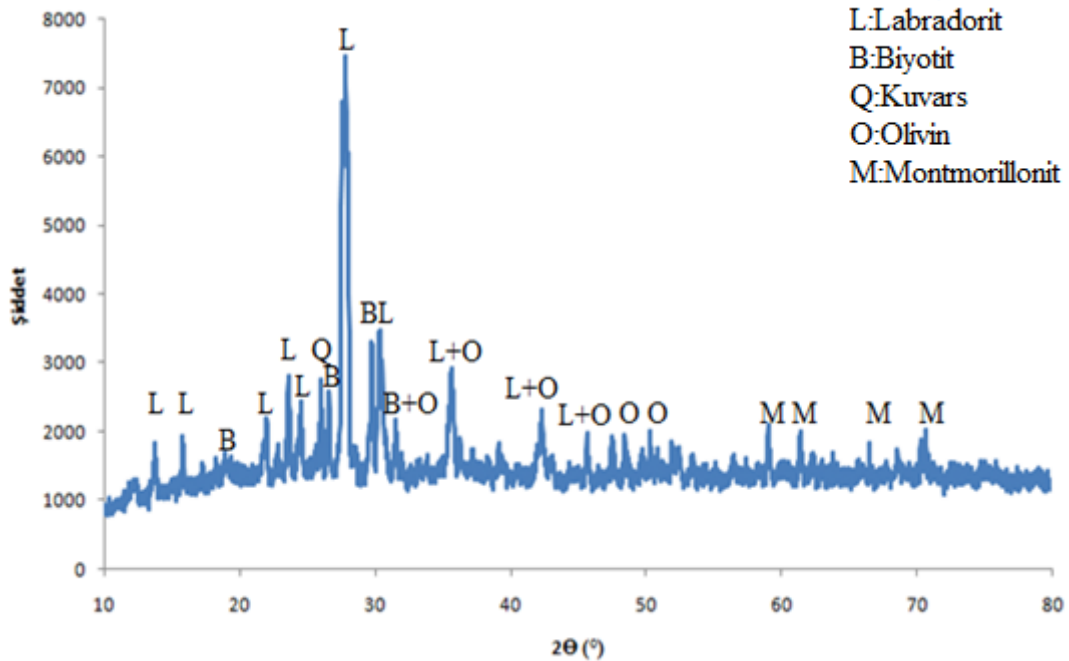
incelendiğinde en büyük değişimin termal şok uygulaması sonucunda elde edildiği görülmektedir. Bu değişim kalsit kristallerinin metamorfizma sonucu yeniden kristallenmesiyle oluşan Afyon Beyaz örneğin en büyük oranda gelişmiştir. Kalsit kristallerinin termal etkilerle genişip aniden soğuması sonucu büzülmenin bu etkiyi yarattığı düşünülmüştür.

#### 4.1.2. Çalışılan kayaçların mineralojik özellikleri

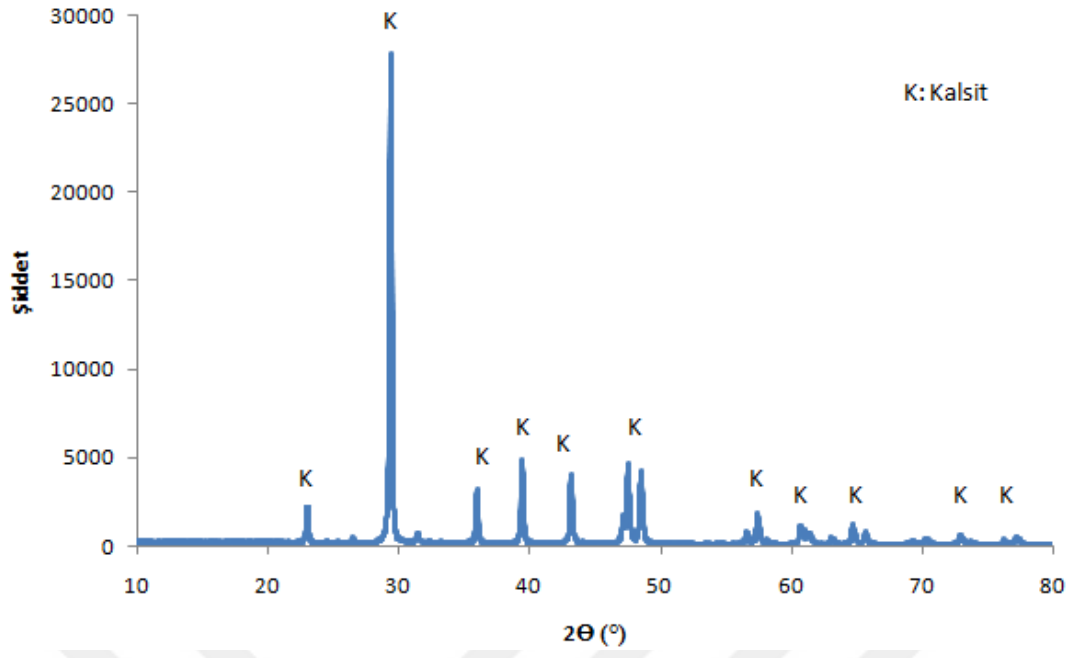
##### 4.1.2.1. XRD analiz sonuçları

Çalışılan kayaçların İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yaptırılan XRD analizi sonucunda elde edilen X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.3-4.5'te verilmiştir.

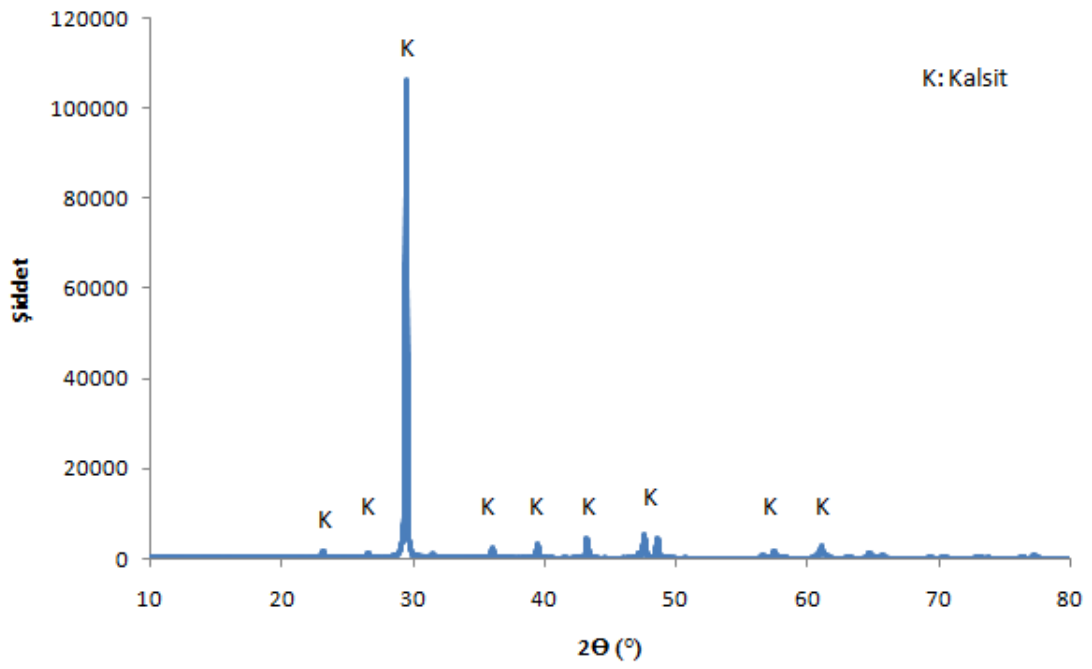
Yapılan incelemeler sonucunda Afyon Beyaz ve Malatya Bej örneğinin ana bileşen olarak kalsit minareli, Yazihan Bazalt örneğinin ise Labradorit, Biyotit, Kuvars, Olivin ve montmorillonit mineralleri içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Yazihan Bazalt örneğinin XRD analiz deseni



Şekil 4.4. Malatya Bej örneğinin XRD analiz deseni



Şekil 4.5. Afyon Beyaz örneğinin XRD analiz deseni

#### 4.1.2.2. XRF analiz sonuçları

Çalışılan kayaçların XRF analizi sonucunda Yazıhan Bazalt örneğinin % 45.41 oranında SiO<sub>2</sub> ve % 17.46 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Malatya Bej örneğinin % 58.77 CaO ve Afyon Beyaz örneğinin ise % 56.89 CaO içerdiği belirlenmiştir (Çizelge 4.15).

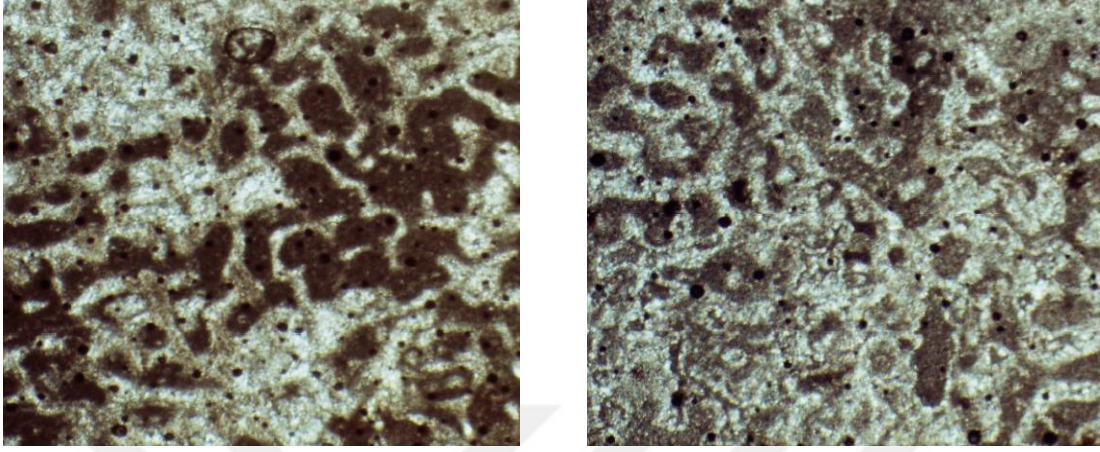
Malatya Bej ve Afyon Beyaz örneklerinin ana yapısının CaO olduğu ve kızdırma kaybının yüksek olduğu gözlemlenmektedir. CaCO<sub>3</sub> içerikli kayaçlar yüksek sıcaklığa maruz kalınca CO<sub>2</sub> ve diğer organik maddelerin uzaklaşmasından kaynaklı olarak kütle kaybı yaşanmaktadır. Yazıhan Bazalt örneğinin ise kızdırma kaybı daha düşük değerdedir. Bu durumun, bu örneğin yabancı madde içeriğinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çizelge 4.15. Çalışılan kayaçların XRF analiz sonuçları

Oksit Elementleri	Yazıhan Bazalt (%)	Malatya Bej (%)	Afyon Beyaz (%)
SiO <sub>2</sub>	45.4140	0.0011	0.2031
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.4589	0.0878	0.0767
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.7582	0.1642	0.0560
CaO	8.9768	58.7700	56.8871
MgO	7.4893	0.3290	0.1766
Na <sub>2</sub> O	4.0373	0.0012	-
TiO <sub>2</sub>	1.1867	0.0116	-
K <sub>2</sub> O	0.6550	0.0012	0.0066
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.3508	0.0116	-
MnO	0.1791	0.0030	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0832	-	-
SrO	0.0646	0.0198	-
NiO	0.0380	-	-
ZrO <sub>2</sub>	0.0244	-	-
SO <sub>3</sub>	0.0225	-	-
Kızdırma Kaybı	3.2611	40.7300	42.5940

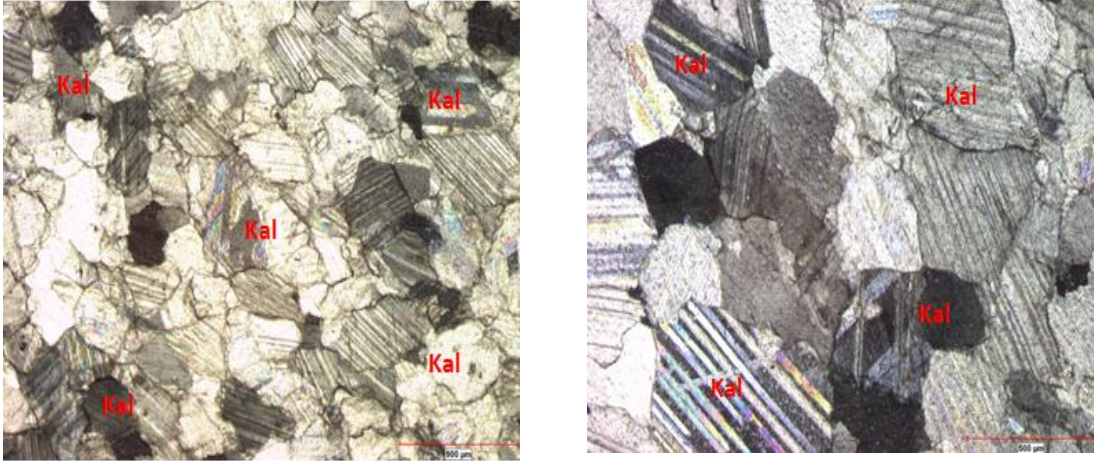
#### 4.1.2.3. İnce kesit analizi sonuçları

Çalışılan kayaçların Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvar'ında yaptırılan ince kesit analizi sonucunda elde edilen görüntüleri Şekil 4.6-4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Malatya Bej örneğine ait ince kesit görüntü

Ana bileşen olarak kalsit içeren Malatya Bej örneği, Folk; (1959) sınıflamasına göre biyomikrosparit (7-9 $\mu$ ) bileşimine sahiptir. Karbonatlı kayaçların bağlayıcısı olarak adlandırılan spartitler (10-15 $\mu$ ) genellikle ikincildir (diyajenetik). Malatya Bej örneğinin yersel olarak *Alveolina* sp., *Assilina* sp, *Miliola* sp., ve mercan fosilleri içerdiği tespit edilmiştir.

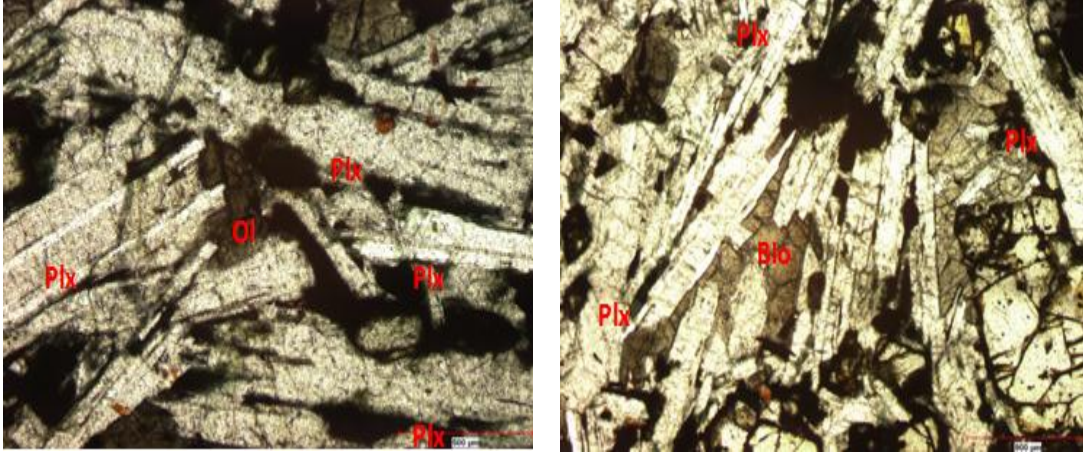


Şekil 4.7. Afyon Beyaz örneğine ait ince kesit görüntü

Afyon Beyaz örneğinin ince kesit görüntüsü incelendiğinde tanelerin birbirleriyle kenetlenmiş halde ve yuvarlağa yakın mineral şekilli ve granoblastik bir dokuya sahip olduğu görülmektedir. Granoblastik dokulu kayaçlarda kalsit mineral tanelerinin dilinim yüzeyleri oldukça belirgindir. Afyon Beyaz örneği grift dokulu, homejen ve orta



büyükte tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca taneler arası dilinim yüzeyleri oldukça belirgin biçimde gözlemlenmektedir.



Şekil 4.8. Yazihan Bazalt örneğine ait ince kesit görüntü

Yazihan Bazaltının ince kesit görüntüsü incelendiğinde başlıca plajiyoklas, biyotit ve olivinlerden oluştuğu görülmektedir. Plajiyoklaslar prizmatik yarı öz ve öz şekillidirler. Büyük bir kısmı polisentetik ikizleme gösterirler. Magmatik kayalarda yaygın olarak bulunan ve bu tür kayaların sınıflandırılmasında da kullanılan plajiyoklaslar bazalt ve gabronun ana bileşimini oluşturmaktadırlar. Özellikle magnezyum içerikli olivinler ise bazik ve ultrabazik kayaç içinde bulunurlar ve magmanın yüksek sıcaklık etkisiyle ilk kristalleşen mineralleridir.

### 4.1.3. Çalışılan kayaçların mekanik özellikleri

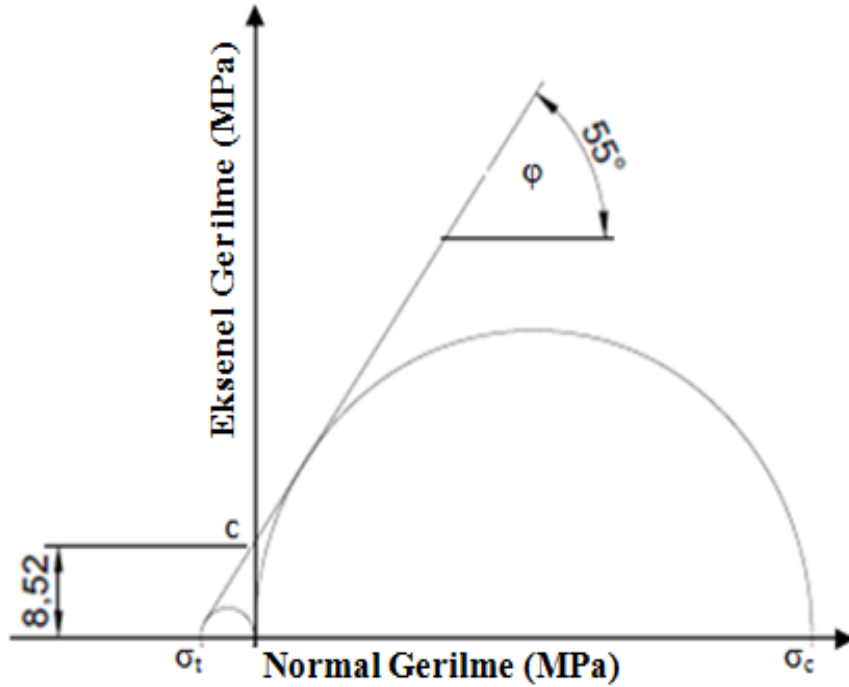
#### 4.1.3.1. Tek eksenli basınç dayanımı ve makaslama parametre değerleri

Çalışılan kayaçların farklı çevresel koşullara (kuru, doymuş, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) maruz bırakıldıktan sonra ISRM 1978’de önerilen yonteme uygun olarak tek eksenli basınç dayanımları elde edilmiştir (ISRM, 1978b).

Elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.16-4.20’de verilmiştir.

Ayrıca Brazilian (dolaylı yoldan çekme) ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerini kullanarak kayaçların makaslama parametresi olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı dolaylı olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9’da kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı( $\phi$ ) değerlerinin dolaylı yoldan belirlenmesine ait örnek gösterim verilmiştir.

Elde edilen makaslama parametreleri değerleri ise Çizelge 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Kayaçların makaslama parametrelerinin dolaylı yoldan belirlenmesi (örnek gösterim)



Çizelge 4.16. Kayaçların kuru halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Numune	Çap (mm)	Kırılma Yükü (kN)	Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
YB_1	53.85	306.1	2278.4	134.3
YB_2	53.95	297.3	2286.9	130.0
YB_3	53.96	314.2	2287.7	137.3
YB_4	53.92	302.1	2284.3	132.2
YB_5	53.92	287.1	2284.3	125.6
			<b>ORT.</b>	<b>131.9±4.4</b>
MB_1	54.17	206.4	2305.591	89.5
MB_2	54.21	220.7	2308.998	95.5
MB_3	54.2	238.4	2308.146	103.2
MB_4	54.09	215.9	2298.786	93.9
MB_5	54.16	223.1	2304.74	96.8
			<b>ORT.</b>	<b>95.8±4.9</b>
AB_1	54.29	114.9	2315.8	49.6
AB_2	54.03	127.8	2293.7	55.7
AB_3	53.75	124.1	2269.9	54.7
AB_4	54.16	129.4	2304.7	56.1
AB_5	54.18	115.1	2306.443	49.9
			<b>ORT.</b>	<b>53.2±3.2</b>

Çizelge 4.17. Kayaçların doymun halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Numune	Çap (mm)	Kırılma Yükü (kN)	Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
YB_1	54.05	326.2	2295.388	142.1
YB_2	53.89	257.3	2281.818	112.8
YB_3	54.07	254.2	2297.087	110.6
YB_4	54.08	299.1	2297.936	130.2
YB_5	54.14	312.5	2303.038	135.6
			<b>ORT.</b>	<b>126.2±13.9</b>
MB_1	54.14	178.0	2303.038	77.3
MB_2	54.16	180.9	2304.74	78.5
MB_3	54.45	180.2	2329.488	77.3
MB_4	54.13	156.5	2302.188	67.9
MB_5	54.13	172.5	2302.188	74.9
			<b>ORT.</b>	<b>75.2±4.3</b>
AB_1	54.14	104.7	2303.0	45.5
AB_2	54.15	102.3	2303.8	44.4
AB_3	54.1	110.3	2299.6	47.9
AB_4	54.15	99.4	2303.8	43.1
AB_5	54.12	97.4	2301.3	42.3
			<b>ORT.</b>	<b>44.7±2.2</b>

Çizelge 4.18. Kayaçların donmuş halde tek eksenli basınç dayanımı değerleri

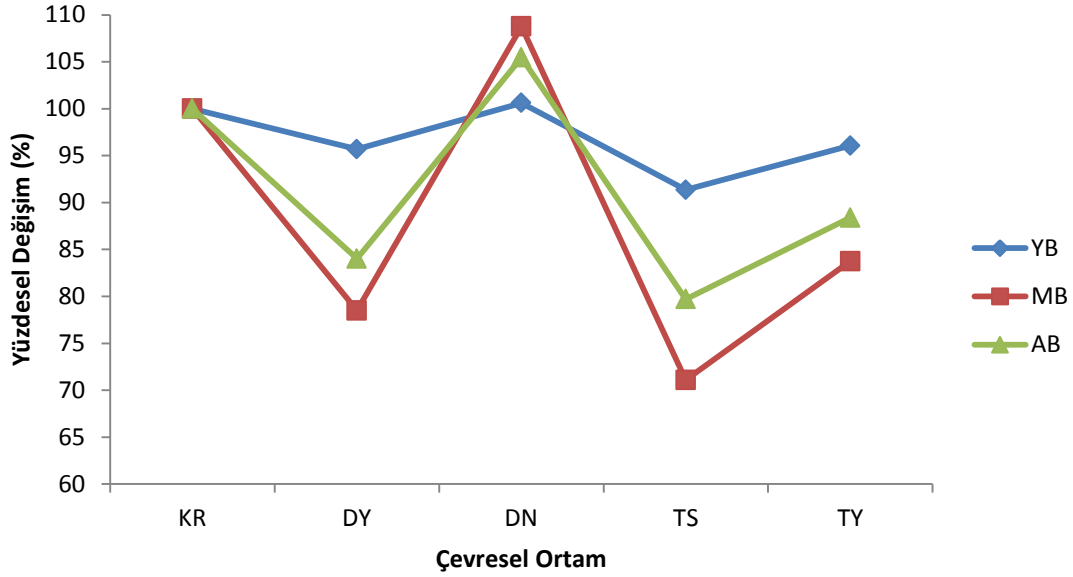
Numune	Çap (mm)	Kırılma Yükü (kN)	Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
YB_1	53.99	315.2	2290.294	137.6
YB_2	54.03	317.1	2293.689	138.2
YB_3	54.06	287.3	2296.237	125.1
YB_4	54.08	295.5	2297.936	128.6
YB_5	54.01	307.2	2291.992	134.0
			<b>ORT.</b>	<b>132.7±5.7</b>
MB_1	53.81	238.1	2275.048	104.7
MB_2	53.92	228.6	2284.359	100.1
MB_3	54.14	259.1	2303.038	112.5
MB_4	54.16	249.2	2304.74	108.1
MB_5	54.12	220.4	2301.337	95.7
			<b>ORT.</b>	<b>104.2±6.5</b>
AB_1	54.01	129.5	2291.9	56.5
AB_2	54.05	134.8	2295.4	58.7
AB_3	54.06	133.2	2296.2	58.0
AB_4	54.17	125.8	2305.6	54.6
AB_5	54.15	121.3	2303.9	52.6
			<b>ORT.</b>	<b>56.1±2.5</b>

Çizelge 4.19. Kayaçların termal şok uygulaması sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Numune	Çap (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
YB_1	54.08	308.3	2297.9	134.2
YB_2	53.99	263.3	2290.3	114.9
YB_3	54.01	295.2	2291.3	128.8
YB_4	54.02	253	2292.8	110.3
YB_5	54.04	262.5	2294.5	114.4
			<b>ORT.</b>	<b>120.5±10.4</b>
MB_1	54.04	137.7	2294.5	60.1
MB_2	54.1	159.5	2299.6	69.3
MB_3	54.05	161.3	2295.4	70.3
MB_4	54.03	152.7	2293.7	66.5
MB_5	54.11	170.4	2300.5	74.1
			<b>ORT.</b>	<b>68.1±5.2</b>
AB_1	54.04	101.7	2294.5	44.3
AB_2	54.01	96.7	2291.9	42.2
AB_3	54.01	100.8	2291.9	43.9
AB_4	54.07	94.3	2297.1	41.1
AB_5	53.99	92.7	2290.3	40.5
			<b>ORT.</b>	<b>42.4±1.7</b>

Çizelge 4.20. Kayaçların termal yaşlandırma uygulaması sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Numune	Çap (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Yüzey Alanı (mm <sup>2</sup> )	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
YB_1	54.12	288.5	2301.337	125.4
YB_2	53.99	279.1	2290.294	121.8
YB_3	54.06	307.1	2296.237	133.7
YB_4	54.01	309.9	2291.992	135.2
YB_5	54.04	267.7	2294.538	116.7
			<b>ORT.</b>	<b>126.7±7.9</b>
MB_1	54.04	175.1	2294.5	76.31
MB_2	54.1	209.1	2299.6	90.93
MB_3	54.05	205.5	2295.4	89.53
MB_4	54.03	167.3	2293.7	72.94
MB_5	54.11	164.4	2300.5	71.46
			<b>ORT.</b>	<b>80.23±9.3</b>
AB_1	53.99	107.4	2290.3	46.89
AB_2	54.01	121.4	2292.0	52.97
AB_3	54.02	107.9	2292.8	47.06
AB_4	54.01	101.6	2292.0	44.33
AB_5	54.07	100.7	2297.1	43.84
			<b>ORT.</b>	<b>47.02±3.6</b>



Şekil 4.10. Tek eksenli basınç dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi

Çalışılan kayaçların tek eksenli basınç dayanım değerleri incelendiğinde dayanımı en yüksek kayacın magmatik kökenli Yazıhan Bazalt örneği, en düşük kayacın ise rekristalize kireçtaşı olan Afyon Beyaz örneği olduğu görülmektedir. Deere ve Miller 1966 sınıflamasına göre (Çizelge 2.4) Yazıhan Bazalt örneği tüm çevre koşullarında yüksek dayanımlı kayaç (110-220 MPa), Malatya Bej örneği ise orta dayanımlı kayaç (55-110 MPa) sınıfında yer almaktadır. Afyon Beyaz örneği donmuş halde orta dayanımlı kayaç (55-110 MPa) sınıfında yer alırken diğer çevresel koşullarda düşük dayanımlı kayaç (27-55 MPa) sınıfında yer almaktadır.

Şekil 4.10. incelediğinde Yazıhan Bazalt örneğinin tek eksenli basınç dayanımı kuru halden doymun hale geçildiğinde % 4.32, termal şok uygulandıktan sonra % 8.64, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 3.99 azalırken, donmuş halde % 0.60 oranında artış göstermiştir. Malatya Bej örneğinin tek eksenli basınç dayanımı kuru halden doymun hale gelindiğinde % 21.50, termal şok uygulandıktan sonra % 28.91, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 16.25 azalırken, donmuş halde % 8.76 artmıştır. Afyon Beyaz örneğinin tek eksenli basınç dayanımı kuru halden doymun hale gelindiğinde % 15.97, termal şok uygulandıktan sonra % 20.30, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 11.61 azalırken, donmuş halde % 5.45 artmıştır. Yazıhan Bazalt örneğinin farklı çevresel koşullara tabii tutulduktan sonraki tek eksenli basınç dayanımındaki değişimi diğer iki kaya türüne göre oldukça düşüktür. Afyon Beyaz örneğinin doymun, termal şok ve termal

yaşlandırma uygulandıktan sonra tek eksenli basınç dayanımlarındaki yüzdesel azalma ile Schmidt çekici sertliğindeki yüzdesel azalma oranları birbirine yakındır. Malatya Bej örneğinin termal şok uygulaması ardından elde edilen tek eksenli basınç dayanımı ile doygun haldeki tek eksenli basınç dayanımındaki değişimin % 20'nin üzerinde olması dikkat çekici olup bu azalmanın ana sebebinin kayacın ana bileşeni olan kalsit mineralinin anizotropik termal genişleme-büzülme göstermesinden kaynaklı olduğu düşünülmüştür.

Çizelge 4.21. Kayaçların makaslama parametre değerleri

Kayaç	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)
YB_KR	8.31	131.92	16.65	62
YB_DY	7.51	126.27	15.37	62
YB_DN	8.86	132.73	16.78	61
YB_TS	7.46	120.53	14.74	63
YB_TY	7.80	126.56	15.94	62
MB_KR	5.94	95.82	11.95	63
MB_DY	4.56	75.21	9.26	62
MB_DN	6.83	104.23	13.34	61
MB_TS	4.27	68.06	8.52	62
MB_TY	5.09	80.23	10.01	62
AB_KR	4.96	53.21	8.12	56
AB_DY	4.07	44.66	6.74	56
AB_DN	5.46	56.09	8.52	55
AB_TS	4.07	42.40	6.56	56
AB_TY	4.61	47.02	7.36	55

Çizelge 4.21 incelendiğinde farklı çevresel koşullara maruz kalan kayaçların kohezyonları ile diğer fiziko-mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin yüzdesel olarak benzer oranlarda geliştiği görülmektedir. Kayaç tanelerinin bağını yıpratıcı ve zayıflatan en önemli uygulama termal şok uygulamasıdır. Çünkü ısınma ve ani soğuma kayaç tanelerinde anizotropik genişleme-büzülme yaratarak taneler arası bağın zayıflamasına yol açmaktadır.

#### 4.1.3.2. Nokta yükleme dayanımı değeri

Çalışılan kayaçların farklı çevresel etmenlere (kuru, doygun, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) maruz bırakıldıktan sonra ISRM 1985’de önerilen standartlara uygun olarak nokta yükleme dayanımları tespit edilmiştir.

Elde edilen nokta yükleme dayanımları değerleri Çizelge 4.22-4.36’da verilmiştir.

Çizelge 4.22. YB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.92	24.04	2907.3	8.26	1.034	8.55
2	53.73	24.15	2886.9	8.36	1.032	8.64
3	53.76	25.79	2890.1	8.92	1.033	9.21
4	53.87	24.47	2901.9	8.43	1.034	8.71
5	53.89	29.96	2904.1	10.31	1.034	10.67
6	53.9	23.17	2905.2	7.97	1.034	8.24
7	53.96	21.63	2911.6	7.42	1.034	7.68
8	53.91	24.63	2906.2	8.47	1.034	8.76
9	53.9	28.81	2905.2	9.91	1.034	10.25
10	53.89	24.39	2904.1	8.39	1.034	8.68
					Ort.	<b>8.94±0.89</b>



Çizelge 4.23. MB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.98	15.12	2913.8	5.18	1.035	5.37
2	53.97	16.40	2912.7	5.63	1.034	5.83
3	53.97	15.82	2912.7	5.43	1.034	5.62
4	53.96	15.37	2911.6	5.28	1.034	5.46
5	53.98	15.12	2913.8	5.19	1.035	5.37
6	53.97	16.17	2912.7	5.55	1.035	5.75
7	53.99	17.93	2914.9	6.15	1.035	6.37
8	53.97	15.80	2912.7	5.42	1.035	5.61
9	53.98	17.13	2913.8	5.88	1.035	6.08
10	53.99	16.95	2914.9	5.81	1.035	6.02
					<b>Ort.</b>	<b>5.75±0.33</b>

Çizelge 4.24. AB örneğinin kuru halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	54.01	10.33	2917.1	3.54	1.035	3.67
2	54.02	10.10	2918.2	3.46	1.035	3.58
3	54.02	9.73	2918.2	3.33	1.035	3.45
4	53.98	10.89	2913.8	3.74	1.035	3.87
5	53.81	9.63	2895.5	3.32	1.033	3.44
6	53.98	10.80	2913.8	3.71	1.035	3.84
7	53.99	10.15	2914.9	3.48	1.035	3.60
8	54.0	9.68	2916.0	3.32	1.035	3.43
9	54.0	9.46	2916.0	3.24	1.035	3.35
10	54.02	10.04	2918.2	3.44	1.035	3.56
					<b>Ort.</b>	<b>3.58±0.17</b>

Çizelge 4.25. YB örneğinin doygun halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	54.00	22.46	2916.0	7.70	1.035	7.97
2	53.97	24.04	2912.7	8.25	1.035	8.54
3	53.98	23.26	2913.8	7.98	1.035	8.26
4	53.99	22.43	2914.9	7.69	1.035	7.97
5	53.98	26.96	2913.8	9.25	1.035	9.58
6	53.97	24.09	2912.7	8.27	1.035	8.60
7	54.00	24.01	2916.0	8.23	1.035	8.54
8	54.01	23.51	2917.1	8.06	1.035	8.34
9	53.97	23.53	2912.8	8.08	1.034	8.36
10	53.99	27.74	2914.9	9.52	1.035	9.85
					<b>Ort.</b>	<b>8.60±0.63</b>

Çizelge 4.26. MB örneğinin doygun halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.97	13.08	2912.7	4.49	1.034	4.65
2	53.96	13.07	2911.6	4.49	1.034	4.65
3	54.01	12.44	2917.0	4.26	1.035	4.42
4	54.01	12.81	2917.0	4.39	1.035	4.54
5	53.99	11.34	2914.9	3.89	1.035	4.02
6	53.92	10.71	2907.4	3.68	1.034	3.81
7	53.98	12.08	2913.8	4.14	1.035	4.29
8	53.95	10.99	2910.6	3.78	1.034	3.91
9	54.01	11.89	2917.0	4.08	1.035	4.21
10	54.00	11.17	2916.0	3.83	1.035	3.96
					<b>Ort.</b>	<b>4.25±0.31</b>

Çizelge 4.27. AB örneğinin doygun halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.76	9.15	2890.1	3.17	1.033	3.27
2	53.95	10.03	2910.6	3.45	1.034	3.56
3	53.81	8.70	2895.5	3.00	1.033	3.10
4	53.93	9.05	2908.4	3.11	1.034	3.22
5	53.90	8.83	2905.2	3.04	1.034	3.15
6	53.87	8.97	2901.9	3.09	1.034	3.20
7	53.96	9.04	2911.7	3.10	1.034	3.21
8	53.70	8.89	2883.7	3.08	1.032	3.18
9	53.89	9.09	2904.1	3.13	1.034	3.24
10	53.92	8.79	2907.4	3.02	1.034	3.13
					<b>Ort.</b>	<b>3.23±0.13</b>

Çizelge 4.28. YB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.91	23.66	2906.3	8.14	1.034	8.42
2	53.96	24.14	2911.7	8.29	1.035	8.58
3	53.92	24.46	2907.4	8.41	1.035	8.70
4	53.94	23.89	2909.5	8.21	1.035	8.50
5	53.94	29.96	2909.5	10.30	1.035	10.65
6	53.96	24.12	2911.7	8.28	1.035	8.57
7	53.89	24.15	2904.1	8.32	1.034	8.60
8	53.91	28.71	2906.3	9.88	1.034	10.22
9	53.90	27.89	2905.2	9.60	1.034	9.93
10	53.93	27.04	2908.4	9.30	1.035	9.62
					<b>Ort.</b>	<b>9.18±0.84</b>

Çizelge 4.29. MB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.94	16.66	2909.5	5.73	1.035	5.92
2	53.98	16.66	2913.8	5.72	1.035	5.92
3	53.98	17.63	2913.8	6.05	1.035	6.26
4	53.99	17.46	2914.9	5.99	1.035	6.20
5	54.01	15.88	2917.1	5.44	1.035	5.64
6	53.98	16.11	2913.8	5.53	1.035	5.72
7	53.99	17.64	2914.9	6.05	1.035	6.26
8	53.90	18.69	2905.2	6.43	1.034	6.65
9	53.94	16.43	2909.5	5.65	1.035	5.84
10	53.98	16.3	2913.8	5.59	1.035	5.79
					<b>Ort.</b>	<b>6.02±0.31</b>

Çizelge 4.30. AB örneğinin donmuş halde nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.98	10.30	2913.8	3.53	1.035	3.66
2	53.97	10.30	2912.8	3.54	1.035	3.66
3	53.97	10.12	2912.8	3.47	1.035	3.60
4	53.96	10.39	2911.7	3.57	1.035	3.69
5	53.93	10.62	2908.4	3.65	1.035	3.78
6	53.98	10.69	2913.8	3.67	1.035	3.80
7	53.97	10.71	2912.8	3.68	1.035	3.81
8	53.98	10.80	2913.8	3.71	1.035	3.84
9	53.96	10.05	2911.7	3.45	1.035	3.57
10	54.01	10.46	2917.1	3.59	1.035	3.71
					<b>Ort.</b>	<b>3.71±0.09</b>

Çizelge 4.31. YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.82	25.88	2896.6	8.93	1.034	9.24
2	53.88	23.17	2903.1	7.98	1.034	8.25
3	53.81	23.80	2895.5	8.22	1.034	8.50
4	53.83	24.84	2897.7	8.57	1.034	8.86
5	53.97	22.97	2912.8	7.89	1.035	8.16
6	53.81	20.11	2895.5	6.95	1.034	7.18
7	53.96	21.59	2911.7	7.41	1.035	7.67
8	53.97	24.75	2912.8	8.50	1.035	8.79
9	53.78	24.87	2892.3	8.60	1.033	8.89
10	53.79	22.17	2893.4	7.66	1.033	7.92
					<b>Ort.</b>	<b>8.35±0.63</b>

Çizelge 4.32. MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.98	10.88	2913.8	3.73	1.035	3.86
2	53.97	11.39	2912.8	3.91	1.035	4.05
3	53.99	12.79	2914.9	4.39	1.035	4.54
4	53.98	13.17	2913.8	4.52	1.035	4.68
5	53.97	11.59	2912.8	3.98	1.035	4.12
6	54.05	10.14	2921.4	3.47	1.036	3.59
7	54.08	10.23	2924.6	3.50	1.036	3.62
8	54.00	11.02	2916.0	3.78	1.035	3.91
9	54.07	12.08	2923.6	4.13	1.036	4.28
10	54.05	10.34	2921.4	3.54	1.036	3.67
					<b>Ort.</b>	<b>4.03±0.38</b>

Çizelge 4.33. AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.75	8.74	2889.1	3.03	1.033	3.13
2	53.76	8.77	2890.1	3.03	1.033	3.14
3	53.85	8.13	2899.8	2.80	1.034	2.90
4	54.03	8.40	2919.2	2.88	1.035	2.98
5	53.71	8.68	2884.8	3.01	1.033	3.11
6	53.88	7.77	2903.1	2.68	1.034	2.77
7	53.71	8.25	2884.8	2.86	1.033	2.95
8	53.67	8.44	2880.5	2.93	1.032	3.02
9	53.86	8.47	2900.9	2.92	1.034	3.02
10	53.74	8.51	2888.0	2.95	1.033	3.04
					<b>Ort.</b>	<b>3.01±0.11</b>

Çizelge 4.34. YB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

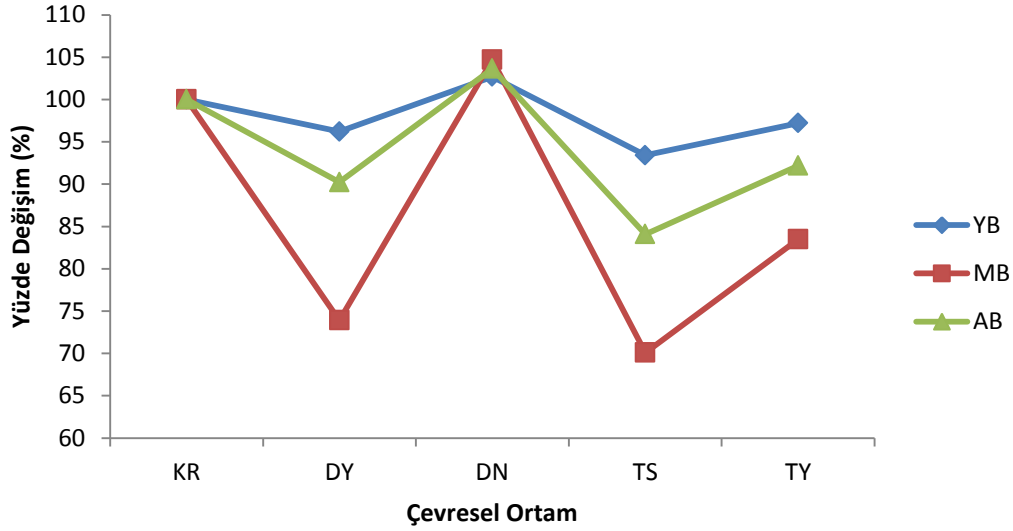
N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.81	25.34	2895.5	8.75	1.034	9.05
2	53.84	24.94	2898.7	8.60	1.034	8.90
3	53.81	23.76	2895.5	8.21	1.034	8.48
4	53.91	26.49	2906.3	9.11	1.034	9.43
5	53.77	23.85	2891.2	8.25	1.033	8.52
6	54.02	26.62	2918.2	9.12	1.035	9.45
7	53.77	21.78	2891.2	7.53	1.033	7.78
8	53.82	23.92	2896.6	8.26	1.034	8.54
9	53.83	23.94	2897.7	8.26	1.034	8.54
10	54.00	23.10	2916.0	7.92	1.035	8.20
					<b>Ort.</b>	<b>8.69±0.53</b>

Çizelge 4.35. MB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.99	12.92	2914.9	4.43	1.035	4.59
2	53.97	14.97	2912.8	5.14	1.035	5.32
3	53.97	14.52	2912.8	4.98	1.035	5.16
4	54.04	13.71	2920.3	4.69	1.036	4.86
5	53.98	13.87	2913.8	4.76	1.035	4.93
6	54.02	12.76	2918.2	4.37	1.035	4.53
7	53.98	12.47	2913.8	4.28	1.035	4.43
8	53.97	13.61	2912.8	4.67	1.035	4.84
9	53.98	12.52	2913.8	4.30	1.035	4.45
10	53.97	13.94	2912.8	4.79	1.035	4.95
					<b>Ort.</b>	<b>4.80±0.30</b>

Çizelge 4.36. AB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası nokta yükleme değerleri

N. No	De (mm)	Fk (kN)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Is (MPa)	F	Is <sub>(50)</sub> (MPa)
1	53.64	9.23	2877.3	3.21	1.032	3.31
2	53.76	9.37	2890.1	3.24	1.033	3.35
3	53.95	9.70	2910.6	3.33	1.035	3.45
4	53.74	8.89	2888.0	3.08	1.033	3.18
5	53.67	8.88	2880.5	3.08	1.032	3.18
6	53.93	9.37	2908.4	3.22	1.035	3.33
7	53.51	8.82	2863.3	3.08	1.031	3.18
8	53.75	9.14	2889.1	3.16	1.033	3.27
9	53.71	9.45	2884.8	3.28	1.033	3.38
10	53.75	9.46	2889.1	3.27	1.033	3.38
					<b>Ort.</b>	<b>3.30±0.10</b>



Şekil 4.11. Nokta yükleme dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi

Bieniawski 1975'e göre (Çizelge 2.6) kayalar nokta yükü dayanım indekslerine göre sınıflandırıldığında Yazihan Bazalt örneği tüm çevre koşulları için çok yüksek dirençli (>8 MPa), Malatya Bej örneği yüksek dirençli (4-8 MPa) ve Afyon Beyaz örneği orta dirençli (2-4 MPa) kayaç sınıfında yer almaktadır.

Şekil 4.11. incelediğinde Yazihan Bazalt örneğinin nokta yükleme dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 3.80, termal şok uygulandıktan sonra % 6.59, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 2.79 azalırken, donmuş halde % 2.68 oranında artmıştır. Malatya Bej örneğinin nokta yükleme dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 26.08, termal şok uygulandıktan sonra % 29.91, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 16.52 azalırken, donmuş halde % 4.69 artmıştır. Afyon Beyaz örneğinin nokta yükleme dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 9.77, termal şok uygulandıktan sonra % 15.92, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 7.82 azalırken, donmuş halde % 3.63 artmıştır. Yazihan Bazalt örneğinin farklı çevresel koşullar uygulandıktan sonra nokta yükleme dayanımındaki değişim diğer iki kaya türüne nazaran daha düşüktür. Bu durumun YB örneğinin kohezyon değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Malatya Bej örneğinin doygun, termal şok ve termal yaşlandırma uygulandıktan sonra tek eksenli basınç dayanımlarındaki yüzdesel azalma ile nokta yükleme dayanımındaki yüzdesel azalmanın yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Malatya Bej örneğinin termal şok uygulandıktan sonra ve doygun haldeki nokta yükleme dayanımındaki değişimin % 25'nin üzerinde olması dikkat çekmiştir. Her



üç kayaç için en büyük bozunma termal şok uygulaması sonucunda elde edilmiştir. Bu durumun sebebinde kayaçların tanelerini bir arada tutan kohezyon değerlerinin termal şok uygulaması sonucunda diğer ortam koşullarda elde edilen kohezyon değerlerine nazaran düşük olmasıdır.

#### 4.1.3.3. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı değeri

Çalışılan kayaçların farklı çevresel etmenlere (kuru, doymuş, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) maruz bırakıldıktan sonra TS 7654'te önerilen yöntemle göre Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımları belirlenmiştir (TS 7654,1989).

Elde edilen Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımları değerleri Çizelge 4.37-4.51'de verilmiştir.

Çizelge 4.37. YB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.92	27.16	19.6	8.51
2	54.04	27.12	18.9	8.20
3	53.87	26.44	19.8	8.84
4	53.78	27.37	18.9	8.17
5	53.76	28.16	17.5	7.35
6	54.03	27.06	19.9	8.66
7	54.07	28.13	19.3	8.07
8	53.97	28.06	20.8	8.74
9	54.07	28.87	19.8	8.07
10	54.07	28.04	20.2	8.47
			<b>Ort.</b>	<b>8.31±0.44</b>

Çizelge 4.38. MB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.95	28.80	15.0	6.14
2	53.99	27.36	13.8	5.94
3	54.04	27.26	14.6	6.30
4	54.00	27.80	14.3	6.06
5	54.01	27.84	14.1	5.96
6	54.05	27.95	13.8	5.81
7	54.05	28.30	13.0	5.41
8	54.08	27.98	13.7	5.76
9	53.98	28.65	15.1	6.21
10	53.98	28.01	13.9	5.85
			<b>Ort.</b>	<b>5.94±0.26</b>

Çizelge 4.39. AB örneğinin kuru halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.10	28.53	12.6	5.19
2	53.97	28.08	11.8	4.95
3	53.98	27.98	12.1	5.10
4	54.04	28.02	11.8	4.96
5	53.93	28.83	12.3	5.03
6	54.08	26.87	10.8	4.73
7	54.05	26.67	11.9	5.25
8	53.97	28.54	12.2	5.04
9	54.09	28.08	11.4	4.77
10	53.97	28.58	11.2	4.62
			<b>Ort.</b>	<b>4.96±0.20</b>

Çizelge 4.40. YB örneğinin doygun halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.79	28.08	19.7	8.30
2	53.85	26.37	18.3	8.20
3	53.88	28.06	17.1	7.19
4	53.87	28.39	16.3	6.78
5	53.88	27.96	17.2	7.26
6	53.99	28.65	19.2	7.89
7	53.96	27.71	16.6	7.06
8	54.08	28.05	17.3	7.25
9	54.02	27.74	18.5	7.85
10	53.87	28.01	17.5	7.38
			<b>Ort.</b>	<b>7.52±0.51</b>

Çizelge 4.41. MB örneğinin doygun halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.08	27.67	11.1	4.72
2	54.06	28.84	10.1	4.12
3	54.08	27.85	10.9	4.60
4	54.10	27.08	10.7	4.65
5	54.00	27.09	9.4	4.09
6	54.02	28.04	11.7	4.91
7	54.06	28.27	10.9	4.54
8	54.20	28.20	11.1	4.62
9	53.96	27.98	10.5	4.42
10	54.01	27.90	11.8	4.98
			<b>Ort.</b>	<b>4.56±0.29</b>

Çizelge 4.42. AB örneğinin doygun halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.18	28.71	9.9	4.05
2	54.15	27.19	9.5	4.10
3	53.99	27.27	10.0	4.32
4	54.04	28.30	10.1	4.20
5	54.02	27.38	9.0	3.87
6	54.21	26.38	9.7	4.31
7	54.20	28.20	8.7	3.62
8	54.08	26.01	8.7	3.93
9	54.01	27.93	10.1	4.26
10	53.96	28.63	9.9	4.08
<b>Ort.</b>				<b>4.07±0.22</b>

Çizelge 4.43. YB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.81	26.72	19.9	8.80
2	54.10	26.62	21.9	9.67
3	53.78	27.57	18.9	8.11
4	54.09	26.62	20.3	8.97
5	53.96	27.06	21.4	9.32
6	53.73	26.65	19.6	8.71
7	53.98	27.13	19.4	8.43
8	53.95	28.90	20.4	8.32
9	53.90	28.61	21.6	8.91
10	53.81	27.38	21.7	9.37
<b>Ort.</b>				<b>8.86±0.50</b>

Çizelge 4.44. MB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.09	26.78	14.6	6.41
2	53.98	27.91	15.5	6.54
3	54.07	28.08	16.1	6.74
4	53.97	28.10	15.4	6.46
5	53.85	27.96	17.5	7.39
6	54.02	28.06	17.5	7.34
7	54.00	28.17	15.9	6.65
8	54.05	27.48	17.9	7.66
9	54.02	27.81	14.9	6.31
10	53.96	28.14	16.1	6.74
			<b>Ort.</b>	<b>6.83±0.46</b>

Çizelge 4.45. AB örneğinin donmuş halde Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.20	27.20	12.9	5.57
2	54.23	27.52	13.7	5.84
3	54.11	26.52	13.1	5.81
4	54.18	26.58	11.4	5.03
5	54.06	28.10	12.6	5.28
6	54.07	27.78	13.3	5.63
7	54.03	27.84	11.2	4.74
8	54.07	28.58	12.9	5.31
9	54.04	27.66	13.8	5.87
10	54.05	28.08	13.2	5.53
			<b>Ort.</b>	<b>5.46±0.37</b>

Çizelge 4.46. YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.98	27.90	19.2	8.11
2	53.91	28.54	16.9	6.99
3	54.00	27.98	15.9	6.69
4	53.80	27.21	18.5	8.04
5	53.89	27.80	19.3	8.19
6	53.97	27.50	16.3	6.98
7	53.87	27.61	17.9	7.65
8	53.88	27.05	15.3	6.68
9	53.87	28.26	16.1	6.73
10	54.09	25.97	18.8	8.51
			<b>Ort.</b>	<b>7.46±0.72</b>

Çizelge 4.47. MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.05	29.02	10.4	4.22
2	53.95	28.73	11.6	4.76
3	53.93	26.91	11.6	5.08
4	54.03	28.17	10.7	4.47
5	53.99	28.00	10.6	4.46
6	54.07	28.19	10.7	4.46
7	54.02	27.84	9.9	4.19
8	54.07	29.30	9.0	3.61
9	54.01	27.79	8.9	3.77
10	54.00	28.55	8.8	3.63
			<b>Ort.</b>	<b>4.27±0.48</b>

Çizelge 4.48. AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.00	28.68	7.9	3.24
2	53.94	27.80	10.1	4.28
3	54.00	26.66	10.2	4.51
4	53.97	25.66	9.2	4.23
5	54.04	28.93	10.3	4.19
6	54.14	28.15	10.1	4.21
7	54.05	29.14	10.0	4.04
8	54.18	29.11	10.4	4.19
9	54.07	28.47	8.2	3.39
10	54.14	27.78	10.5	4.44
			<b>Ort.</b>	<b>4.07±0.42</b>

Çizelge 4.49. YB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.87	27.34	19.8	8.55
2	53.90	27.09	17.8	7.75
3	53.69	27.61	20.0	8.58
4	54.05	27.99	19.6	8.24
5	54.17	27.53	18.6	7.93
6	54.00	27.41	19.8	8.51
7	54.01	28.23	19.0	7.93
8	53.95	27.86	17.7	7.49
9	53.92	27.38	15.9	6.85
10	54.10	27.20	18.9	8.17
			<b>Ort.</b>	<b>8.00±0.54</b>

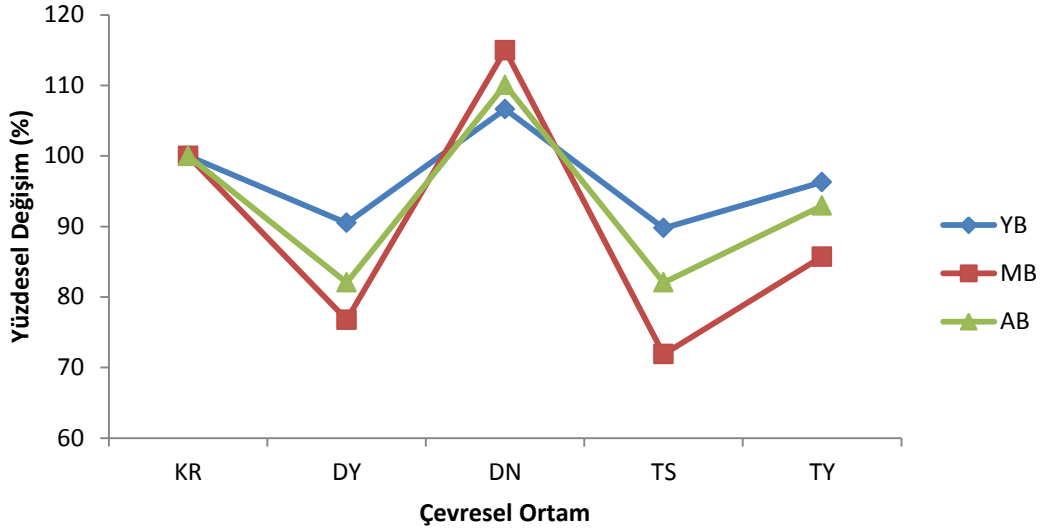
Çizelge 4.50. MB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	53.98	29.90	12.0	4.73
2	54.00	26.98	12.9	5.63
3	54.02	29.30	13.1	5.26
4	54.10	27.17	11.3	4.89
5	54.02	28.44	13.5	5.59
6	54.11	28.04	11.3	4.74
7	54.04	27.98	13.5	5.68
8	53.94	28.08	11.1	4.66
9	53.99	27.48	11.9	5.10
10	53.89	28.08	11.1	4.67
			<b>Ort.</b>	<b>5.09±0.42</b>

Çizelge 4.51. AB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası Brazilian dayanımı değerleri

N. No	D (mm)	t (mm)	Fk (kN)	$\sigma_t$ (MPa)
1	54.04	27.25	10.7	4.62
2	53.99	30.10	11.2	4.38
3	53.95	28.77	11.0	4.51
4	54.00	28.94	11.7	4.76
5	53.99	28.49	11.1	4.59
6	54.02	27.73	11.5	4.88
7	54.04	25.27	9.8	4.56
8	54.04	28.47	9.7	4.01
9	53.95	27.12	11.3	4.91
10	53.93	26.70	11.1	4.90
			<b>Ort.</b>	<b>4.61±0.28</b>





Şekil 4.12. Brazilian (dolaylı yoldan) çekme dayanımının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi

Çalışılan kayaçların Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımları diğer mekanik testlerde olduğu gibi en yüksek Yazıhan Bazalt örneğinde iken metamorfik kökenli Afyon Beyaz örneğinde en düşük bulunmuştur.

Şekil 4.12. incelediğinde Yazıhan Bazalt örneğinin Brazilian çekme dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 9.50, termal şok uygulandıktan sonra % 10.22, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 3.73 azalırken, donmuş halde % 6.61 oranında artmıştır. Malatya Bej örneğinin Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 23.23, termal şok uygulandıktan sonra % 28.11, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 14.30 azalırken, donmuş halde % 14.98 artmıştır. Afyon Beyaz örneğinin Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı kuru halden doygun hale geldiğinde % 17.94, termal şok uygulandıktan sonra % 17.94, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 7.05 azalırken, donmuş halde % 10.08 artmıştır. Yazıhan Bazalt örneğinin çevresel etmenler altındaki Brazilian çekme dayanımındaki değişim diğer iki kaya türüne nazaran daha düşüktür. Afyon beyaz ve Malatya bej örneğinin termal şok ve doygun haldeki Brazilian çekme dayanımındaki değişimin % 17'nin üzerinde olması dikkat çekmiştir. Her üç kayaç için en büyük bozunma termal şok işlemi sonucunda elde edilmiştir. Kayaçların donmuş haldeyken Brazilian çekme dayanımları diğer mekanik dayanımlarına nazaran daha yüksektir. Bu durum kayaçların donmuş haldeyken çekme

dayanımlarının basma dayanımlarına göre yüzdesel olarak daha fazla artış gösterdiğini ifade etmektedir.

Kodama vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, farklı doygunluk derecelerine bağlı olarak kayaçların donmuş haldeyken tek eksenli basınç ve Brazilian çekme dayanımlarında meydana gelen değişimleri incelenmiştir. Araştırmacılar sıfırın altındaki düşük sıcaklıklarda doygunluktaki artışa bağlı olarak kayacın tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımlarında artma olduğunu, ayrıca Brazilian çekme dayanımlarındaki artışın yüzdesel olarak daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum tez çalışması kapsamında elde edilen sonucun doğruluğunu desteklemektedir.

#### **4.1.3.4. Ultrasonik dalga hızı değeri**

Çalışılan kayaçların farklı çevresel etmenlere (kuru, doymuş, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) maruz bırakıldıktan sonra ISRM 1978'de önerilen standartlara uygun ultrasonik dalga hızı değerleri belirlenmiştir (ISRM, 1978c). Ayrıca birim hacim ağırlığı ve  $V_p$ - $V_s$  dalga hızları kullanılarak kayaçların elastisite modülü ( $E_u$ ) ve dinamik poisson oranı ( $\nu_{dyn}$ ) dolaylı yoldan değerleri belirlenmiştir.

Elde edilen ultrasonik dalga hızı değerleri Çizelge 4.52-4.56'da verilmiştir.

Çizelge 4.52. Kayaçların kuru halde ultrasonik dalga hızı değerleri

N.No	L (mm)	Tp ( $\mu$ s)	Ts ( $\mu$ s)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Eu (GPa)	$\nu_{dyn}$
YB_1	126.66	20.6	30.4	6149	4166	106.98	0.08
YB_2	124.88	20.5	31.0	6092	4028	95.45	0.11
YB_3	119.79	19.4	30.5	6175	3928	102.77	0.16
YB_4	115.08	18.9	30.9	6089	3724	95.53	0.20
YB_5	124.90	20.8	30.1	6005	4150	95.051	0.04
			<b>Ort.</b>	<b>6102±65</b>	<b>3999±181</b>	<b>99.24</b>	<b>0.12</b>
MB_1	123.21	19.9	31.6	6191	3899	95.27	0.17
MB_2	126.34	20.2	32.1	6254	3936	97.44	0.17
MB_3	126.75	19.6	30.1	6467	4211	107.74	0.13
MB_4	125.25	20.7	31.3	6051	4002	95.63	0.11
MB_5	124.80	20.4	30.9	6118	4039	97.77	0.11
			<b>Ort.</b>	<b>6216±159</b>	<b>4017±121</b>	<b>98.77</b>	<b>0.14</b>
AB_1	124.24	33.7	50.1	3687	2480	35.97	0.09
AB_2	124.41	33.0	50.9	3770	2444	36.59	0.14
AB_3	120.09	32.6	50.3	3684	2387	34.96	0.14
AB_4	125.72	33.4	50.2	3764	2504	37.09	0.10
AB_5	123.43	33.1	50.9	3729	2425	35.89	0.13
			<b>Ort.</b>	<b>3727±40</b>	<b>2448±45</b>	<b>36.10</b>	<b>0.12</b>

Çizelge 4.53. Kayaçların doymun halde ultrasonik dalga hızı değerleri

N.No	L (mm)	Tp ( $\mu$ s)	Ts ( $\mu$ s)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Eu (GPa)	$\nu_{dyn}$
YB_1	126.66	19.8	30.1	6397	4208	113.4	0.12
YB_2	124.88	19.8	30.8	6307	4055	99.90	0.15
YB_3	119.79	19.7	32.3	6081	3709	95.17	0.20
YB_4	115.08	18.8	29.6	6121	3888	100.81	0.16
YB_5	124.90	19.7	30.3	6340	4122	110.17	0.13
			<b>Ort.</b>	<b>6249±139</b>	<b>3996±198</b>	<b>103.92</b>	<b>0.15</b>
MB_1	123.80	19.7	29.8	6284	4154	102.82	0.11
MB_2	127.06	19.9	31.5	6385	4034	102.12	0.17
MB_3	125.56	19.8	31.4	6341	3999	100.46	0.17
MB_4	130.76	20.5	32.0	6379	4086	103.37	0.15
MB_5	122.85	19.3	30.9	6365	3976	100.40	0.18
			<b>Ort.</b>	<b>6351±41</b>	<b>4050±71</b>	<b>101.83</b>	<b>0.16</b>
AB_1	125.59	33.4	49.1	3760	2558	37.65	0.07
AB_2	122.85	32.8	49.9	3745	2462	36.54	0.12
AB_3	123.88	32.4	49.3	3823	2513	38.11	0.12
AB_4	123.54	33.1	49.2	3732	2511	36.73	0.09
AB_5	120.66	33.0	49.9	3656	2418	34.99	0.11
			<b>Ort.</b>	<b>3744±59</b>	<b>2492±53</b>	<b>36.80</b>	<b>0.10</b>

Çizelge 4.54. Kayaçların donmuş halde ultrasonik dalga hızı değerleri

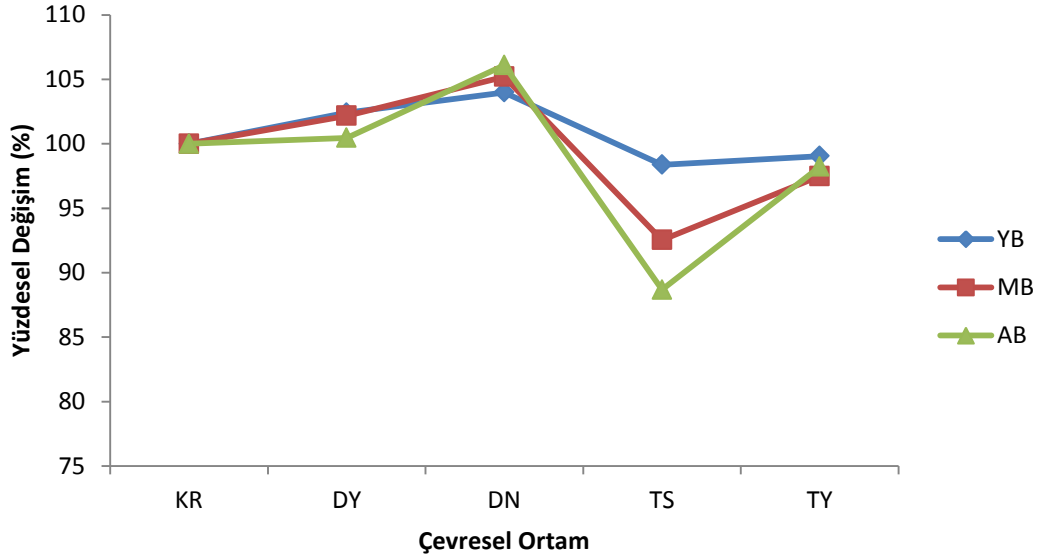
N.No	L (mm)	Tp ( $\mu$ s)	Ts ( $\mu$ s)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Eu (GPa)	$\nu_{dyn}$
YB_1	125.53	19.9	28.6	6308	4389	113.78	0.03
YB_2	128.51	19.1	28.1	6728	4573	118.50	0.07
YB_3	125.79	20.4	30.9	6166	4071	105.98	0.11
YB_4	122.55	20.1	30.7	6097	3992	102.78	0.12
YB_5	131.10	20.4	30.1	6426	4355	108.47	0.08
			<b>Ort.</b>	<b>6345±249</b>	<b>4276±239</b>	<b>109.90</b>	<b>0.08</b>
MB_1	124.33	18.9	29.9	6578	4158	107.98	0.17
MB_2	126.17	19.5	31.6	6470	3993	102.01	0.19
MB_3	128.99	18.8	30.8	6861	4188	113.27	0.20
MB_4	127.17	19.4	29.9	6555	4253	110.48	0.14
MB_5	125.83	20.2	32.6	6229	3860	95.29	0.19
			<b>Ort.</b>	<b>6539±227</b>	<b>4090±160</b>	<b>105.81</b>	<b>0.18</b>
AB_1	123.25	32.1	48.2	3840	2557	38.76	0.10
AB_2	125.88	31.1	47.1	4048	2673	42.82	0.11
AB_3	124.29	30.8	47.7	4035	2606	41.81	0.14
AB_4	122.23	31.8	47.2	3844	2590	38.99	0.08
AB_5	124.87	31.2	47.5	4002	2629	41.69	0.12
			<b>Ort.</b>	<b>3954±103</b>	<b>2611±43</b>	<b>40.82</b>	<b>0.11</b>

Çizelge 4.55. Kayaçların termal şok uygulaması sonrası ultrasonik dalga hızı değerleri

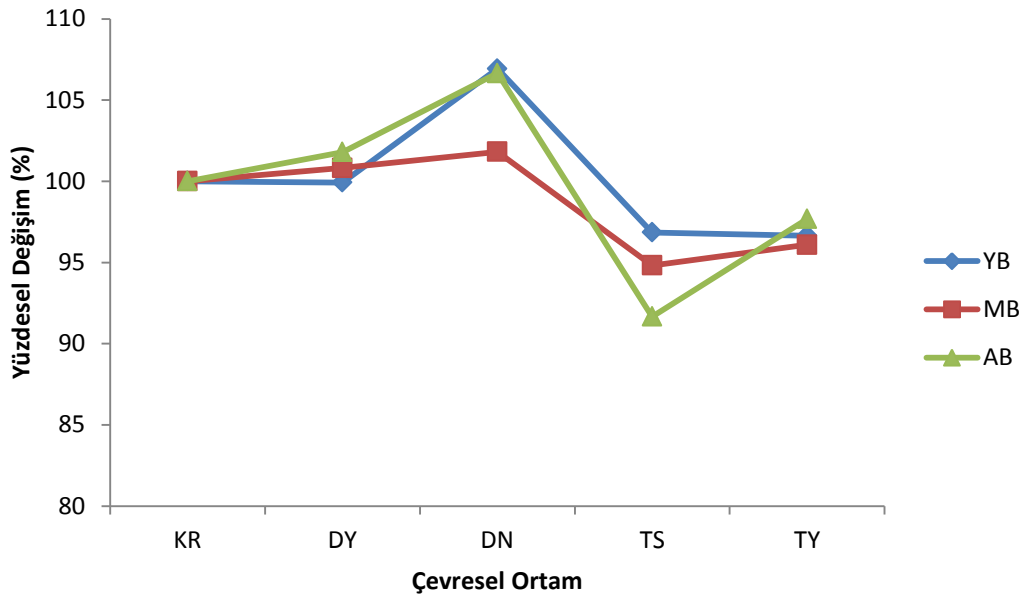
N.No	L (mm)	Tp ( $\mu$ s)	Ts ( $\mu$ s)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Eu (GPa)	$v_{dyn}$
YB_1	125.67	20.4	30.8	6160	4080	105.85	0.11
YB_2	128.17	20.9	32.0	6133	4005	95.80	0.13
YB_3	125.92	21.0	32.5	5996	3874	98.50	0.14
YB_4	125.63	21.8	34.5	5763	3641	88.88	0.17
YB_5	128.78	21.6	34.2	5962	3765	94.71	0.17
			<b>Ort.</b>	<b>6003±158</b>	<b>3873±177</b>	<b>96.75</b>	<b>0.14</b>
MB_1	129.88	22.9	34.8	5672	3732	83.45	0.12
MB_2	125.56	21.7	33.5	5786	3748	85.95	0.14
MB_3	124.74	21.4	32.4	5829	3850	88.60	0.11
MB_4	127.18	22.4	33.9	5678	3752	84.15	0.11
MB_5	126.38	21.8	31.9	5797	3962	89.70	0.06
			<b>Ort.</b>	<b>5752±72</b>	<b>3809±97</b>	<b>86.37</b>	<b>0.11</b>
AB_1	122.04	36.3	54.8	3362	2227	29.60	0.11
AB_2	121.61	37.6	54.6	3234	2227	28.02	0.05
AB_3	122.87	36.8	54.8	3339	2242	29.52	0.09
AB_4	124.45	37.7	55.2	3301	2255	28.97	0.06
AB_5	124.33	37.8	54.8	3289	2269	28.99	0.05
			<b>Ort.</b>	<b>3305±49</b>	<b>2244±18</b>	<b>29.02</b>	<b>0.07</b>

Çizelge 4.56. Kayaçların termal yaşlandırma uygulaması sonrası ultrasonik dalga hızı değerleri

N.No	L (mm)	Tp ( $\mu$ s)	Ts ( $\mu$ s)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Eu (GPa)	$v_{dyn}$
YB_1	124.03	20.6	31.8	6021	3900	99.27	0.14
YB_2	125.84	20.8	31.9	6050	3945	93.11	0.13
YB_3	126.68	20.9	32.4	6061	3910	100.50	0.14
YB_4	126.50	20.6	32.5	6141	3892	101.24	0.16
YB_5	125.44	21.1	34.1	5945	3679	92.06	0.19
			<b>Ort.</b>	<b>6044±70</b>	<b>3865±106</b>	<b>97.24</b>	<b>0.15</b>
MB_1	124.44	20.4	32.40	6100	3841	92.60	0.17
MB_2	128.37	20.7	32.50	6201	3950	97.15	0.16
MB_3	126.04	20.2	32.40	6240	3890	96.06	0.18
MB_4	127.87	21.2	32.90	6032	3887	92.95	0.14
MB_5	123.19	21.5	33.00	5730	3733	84.84	0.13
			<b>Ort.</b>	<b>6060±202</b>	<b>3860±80</b>	<b>92.72</b>	<b>0.16</b>
AB_1	124.15	33.8	51.7	3673	2401	34.97	0.13
AB_2	124.48	34.3	52.5	3629	2371	34.13	0.13
AB_3	125.05	34.1	52.4	3667	2386	34.77	0.13
AB_4	127.06	34.4	52.7	3694	2411	35.18	0.13
AB_5	124.94	34.3	52.4	3643	2384	34.44	0.13
			<b>Ort.</b>	<b>3661±26</b>	<b>2391±16</b>	<b>34.70</b>	<b>0.13</b>



Şekil 4.13. Vp dalgı hızının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi



Şekil 4.14. Vs dalgı hızının çevresel ortama bağlı olarak yüzdesel değişimi

Şekil 4.13.-4.14. incelediğinde kayaçların Vp-Vs dalgı hızlarının kayaçlar doğun ve donmuş koşullarda iken arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın ana sebebi ise boşlukların içerisine nüfuz eden sıvı ve katı haldeki suyun dalgı ilerlemesine pozitif yöndeki etkisidir. Termal şok ve termal yaşlandırma uygulanmış kayaçların dalgı hızlarında ise azalma



meydana gelmiştir. Bunun ana sebebi ise termal işlemler sonucunda kayaç bünyesinde bulunan kayaçların mikro veya makro gözeneklilik dereceleri arttıkça, sismik dalgalar boşlukta daha fazla dağılmıştır. Buda Vp-Vs dalga hızlarının düşmesine neden olmuştur.

Şekil 4.13. incelendiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin Vp dalga hızları kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 1.62, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 0.95 azalırken, doygun halde % 2.40 ve donmuş halde % 3.98 oranında artmıştır. Malatya Bej örneğinde ise Vp dalga hızı kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 7.46, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 2.50 azalırken, doygun halde % 2.17 ve donmuş halde % 5.19 artmıştır. Afyon Beyaz örneğinin Vp dalga hızı kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 11.32, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 1.77 azalırken, doygun halde % 0.45 ve donmuş halde % 6.09 artmıştır. Donmuş ve doygun halde iken ultrasonik dalga hızları kayaç içinde yayılım yapmadan iletilme imkanı bulmuşlar bunun sonucunda da Vp-Vs dalga hızları artmıştır.

Şekil 4.14. incelendiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin Vs dalga hızı kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 3.15, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 3.35 ve doygun halde % 0.07 azalırken, donmuş halde % 6.92 oranında artmıştır. Malatya Bej örneğinin Vs dalga hızı kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 5.17, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 3.90 azalırken, doygun halde % 0.82 ve donmuş halde % 1.82 artmıştır. Afyon Beyaz örneğinin Vs dalga hızı kuru halden termal şok uygulandıktan sonra % 8.33, termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 2.32 azalırken, doygun halde % 1.80 ve donmuş halde % 6.66 artmıştır.

#### **4.1.3.5. Yarı dairesel eğilme (SCB) dayanımı değeri**

Çalışılan kayaçların yarı dairesel eğilme dayanımı değerleri farklı çevresel etmenlere (kuru, doygun, donmuş, termal şok ve termal yaşlandırma) maruz bırakıldıktan sonra Kuruppu vd. 2014 tarafından önerilen yöntem uygun olarak belirlenmiştir. Ayrıca bilgisayar kontrollü yük-deformasyon değerleri kullanılarak, kırılma esnasında yapılan iş (Wf) ve kırılma enerjisi (Gf) değerleri de tespit edilmiştir.

Elde edilen yarı dairesel eğilme dayanımı değerleri Çizelge 4.57-4.71’de verilmiştir.

Çizelge 4.57. YB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>Ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.36	99.53	43.89	23.15	5.614	6.250	2.229	1.383	1.250
2	48.15	99.92	43.16	22.26	5.446	5.601	1.941	1.591	1.424
3	48.94	99.94	43.92	23.66	5.592	5.792	2.054	1.247	1.123
4	48.17	100.36	43.97	20.92	5.137	6.201	1.928	1.647	1.375
5	45.32	100.28	41.62	21.31	5.966	6.514	2.665	1.603	1.648
6	48.57	100.56	44.06	22.61	5.425	6.844	2.312	1.659	1.401
7	48.92	100.19	44.01	22.52	5.317	5.962	1.958	1.626	1.428
8	48.33	100.21	43.70	22.45	5.447	6.850	2.346	1.926	1.437
9	49.42	100.50	44.04	23.68	5.472	6.282	2.154	1.493	1.699
10	49.71	100.79	43.61	25.92	5.993	6.342	2.501	1.409	1.439
<b>Ort. 2.209±0.25</b>								<b>1.558±0.18</b>	<b>1.422±0.16</b>

Çizelge 4.58. YB örneğinin doyunhalde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>Ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.63	100.56	43.42	22.32	5.341	5.781	1.936	1.568	1.372
2	48.48	100.71	43.19	22.43	5.404	5.813	1.991	1.648	1.465
3	48.24	100.47	43.83	22.68	5.526	5.871	2.048	1.533	1.341
4	49.10	100.51	44.35	23.37	5.477	5.678	1.935	1.313	1.151
5	50.12	100.55	43.74	26.35	5.995	5.980	2.353	1.710	1.496
6	48.70	100.50	43.65	23.38	5.583	5.810	2.068	1.348	1.220
7	48.08	100.55	44.06	22.63	5.555	5.992	2.095	1.624	1.421
8	48.71	100.76	43.65	23.02	5.49	6.029	2.093	1.240	1.085
9	48.06	100.34	43.65	22.54	5.538	5.973	2.098	1.336	1.200
10	49.21	99.81	43.99	23.08	5.379	6.122	2.048	1.330	1.163
<b>Ort. 2.067±0.12</b>								<b>1.465±0.17</b>	<b>1.291±0.15</b>

Çizelge 4.59. YB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

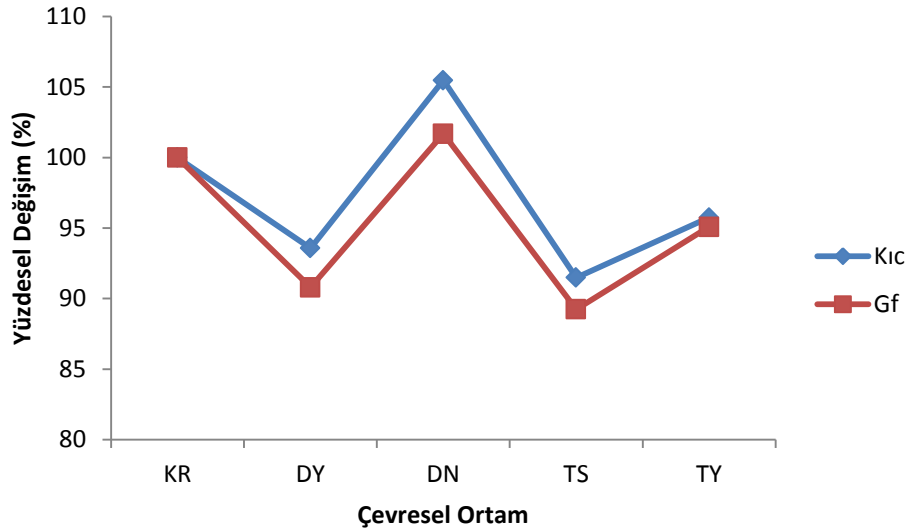
N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	47.66	100.42	43.55	22.70	5.685	5.877	2.149	1.937	1.782
2	50.01	100.38	43.43	27.52	6.381	6.358	2.746	1.674	1.714
3	49.11	100.32	44.21	22.81	5.339	6.777	2.231	1.273	1.095
4	47.80	100.08	44.43	22.43	5.578	6.067	2.115	1.376	1.221
5	48.41	100.36	44.06	22.33	5.398	5.998	2.01	1.372	1.194
6	50.70	100.84	43.69	29.99	6.958	6.837	3.296	1.919	2.121
7	49.23	100.44	42.01	23.18	5.398	6.445	2.27	1.835	1.676
8	48.73	100.10	45.07	22.65	5.395	6.694	2.193	1.199	1.020
9	45.01	99.84	42.65	20.01	5.703	6.282	2.34	1.642	1.540
10	49.54	100.68	43.93	23.31	5.352	5.871	1.954	1.269	1.101
<b>Ort. 2.330±0.40 1.550±0.29 1.446±0.37</b>									

Çizelge 4.60. YB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

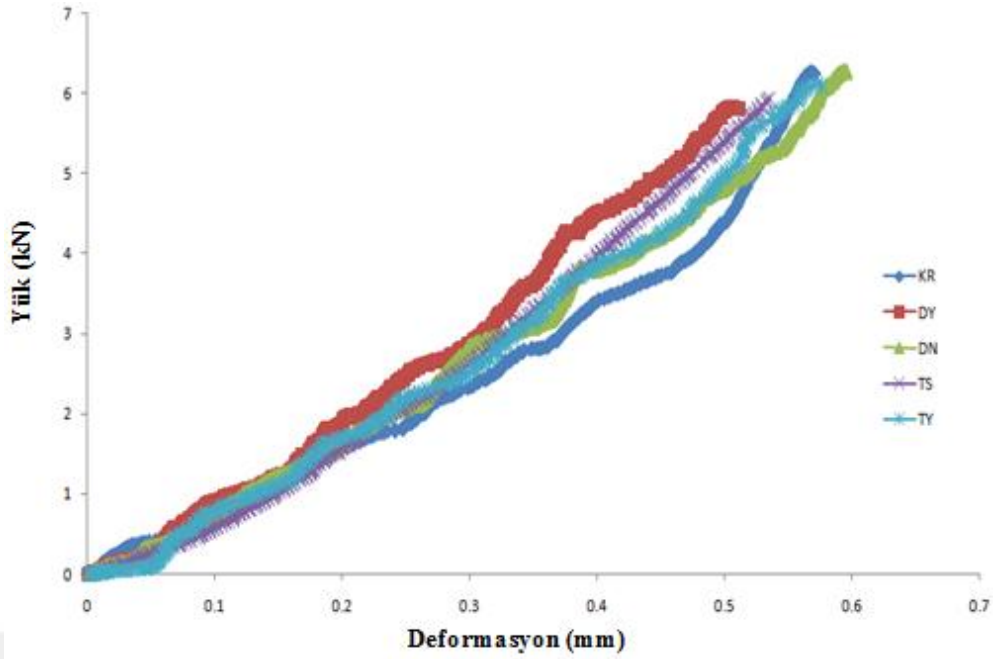
N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.26	100.44	43.35	23.05	5.615	5.050	1.824	0.845	0.773
2	48.14	100.72	43.74	22.78	5.578	5.035	1.784	1.152	1.038
3	48.43	100.82	42.90	23.94	5.805	5.903	2.262	1.063	1.012
4	50.93	100.85	43.61	27.16	5.989	5.854	2.305	1.534	1.480
5	48.31	100.43	44.17	22.80	5.538	5.932	2.06	1.336	1.186
6	48.54	100.49	42.14	23.14	5.564	4.787	1.755	1.025	0.958
7	48.52	100.14	44.14	22.69	5.457	5.877	1.999	1.194	1.047
8	48.80	100.76	40.06	22.81	5.416	5.692	2.111	0.870	0.835
9	48.94	100.33	44.11	23.53	5.559	5.448	1.907	1.069	0.954
10	48.87	100.86	43.87	23.86	5.662	6.090	2.202	1.370	1.248
<b>Ort. 2.021±0.20 1.146±0.22 1.269±0.21</b>									

Çizelge 4.61. YB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.84	100.57	43.96	23.37	5.544	5.506	1.926	1.330	1.188
2	48.56	100.57	44.33	22.58	5.42	6.127	2.054	1.542	1.339
3	49.52	100.74	44.02	23.47	5.395	6.091	2.047	1.292	1.126
4	48.35	100.65	43.68	23.46	5.698	6.079	2.226	1.753	1.613
5	48.68	100.76	44.73	22.39	5.345	5.379	1.751	1.502	1.277
6	48.62	100.64	43.98	23.06	5.523	6.383	2.219	1.989	1.769
7	48.68	100.76	40.71	22.47	5.364	6.408	2.304	1.535	1.439
8	48.41	100.50	44.15	23.24	5.624	6.089	2.165	1.104	0.993
9	49.17	100.91	41.23	23.23	5.425	5.669	2.049	1.344	1.256
10	47.65	100.68	43.79	23.06	5.784	6.464	2.411	1.746	1.523
<b>Ort. 2.115±0.19</b>								<b>1.514±0.26</b>	<b>1.352±0.24</b>



Şekil 4.15. YB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim



Şekil 4.16. YB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi

Şekil 4.15. incelendiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin kırılma tokluğu değerleri kuru halden doymun hale geldiğinde % 6.42, termal şok uygulandıktan sonra % 8.51 ve termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 4.25 azalırken, donmuş halde % 5.48 oranında artmıştır. Benzer biçimde Yazıhan Bazalt örneğinin kırılma enerjisi değerleride kuru halden doymun hale geçtiğinde % 9.21, termal şok uygulandıktan sonra % 10.75 ve termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 4.92 azalırken, donmuş halde % 1.68 oranında artış göstermiştir. Şekil 4.16. incelendiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin doymun durumda, termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonrasında deformasyon ve maksimum kırılma yüklerinde düşme, don halinde ise artma olduğu görülmüştür. Buna rağmen Yazıhan Bazalt örneğinin diğer iki kaya türüne nazaran kırılma tokluğu ve kırılma enerjilerindeki değişim daha azdır. Lavların soğuması ve bünyesindeki organik maddelerin buharlaşmasıyla oluşan Yazıhan Bazalt örneğinin yapısında bulunan olivin minarali (mohs sertliği: 6.5-7.0) ile dayanıklılığı diğer iki kaya türüne göre yüksektir. Yazıhan Bazalt örneğinin tüm mekanik özellikleri incelendiğinde de en dayanıklı örnek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.62. MB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>İc</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	49.27	99.74	43.80	23.58	5.486	3.769	1.304	0.803	0.713
2	48.89	99.73	43.52	23.41	5.541	4.380	1.547	0.909	0.820
3	48.10	100.46	43.58	23.24	5.708	3.694	1.359	0.855	0.789
4	48.80	100.12	43.13	23.23	5.519	3.714	1.315	0.789	0.715
5	48.18	100.48	43.65	21.33	5.223	3.531	1.135	0.820	0.673
6	48.95	100.52	42.53	23.28	5.493	3.738	1.334	0.902	0.751
7	49.10	100.28	44.09	23.12	5.416	3.540	1.193	0.841	0.787
8	48.26	100.49	44.18	22.49	5.474	3.975	1.356	0.788	0.738
9	48.52	99.62	43.82	22.82	5.489	3.701	1.279	0.874	0.699
10	48.45	99.84	43.46	23.01	5.555	3.344	1.186	0.580	0.791
<b>Ort. 1.301±0.12 0.816±0.09 0.748±0.05</b>									

Çizelge 4.63. MB örneğinin doymun halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>İc</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.74	100.44	44.69	22.89	5.45	2.698	0.905	0.500	0.433
2	48.41	100.14	43.96	23.55	5.706	2.610	0.952	0.463	0.423
3	48.22	100.14	43.78	22.72	5.542	2.481	0.87	0.323	0.289
4	48.12	100.61	45.27	22.61	5.54	2.509	0.85	0.500	0.433
5	48.36	100.05	43.67	22.65	5.488	2.610	0.905	0.471	0.420
6	49.24	100.30	44.21	23.11	5.378	2.397	0.798	0.462	0.400
7	48.65	100.01	42.27	22.82	5.456	2.037	0.724	0.385	0.353
8	48.98	99.99	42.05	23.21	5.468	2.299	0.824	0.466	0.430
9	49.40	100.14	43.68	23.25	5.372	2.410	0.811	0.398	0.348
10	49.48	99.93	44.12	23.09	5.315	2.537	0.832	0.333	0.286
<b>Ort. 0.847±0.06 0.430±0.07 0.382±0.06</b>									

Çizelge 4.64. MB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	49.21	100.29	43.57	23.58	5.501	4.962	1.733	1.021	0.914
2	49.19	100.15	44.17	23.88	5.582	4.720	1.661	1.181	1.056
3	47.96	99.31	43.42	22.53	5.561	4.440	1.577	0.927	0.839
4	49.24	100.55	43.76	23.71	5.526	4.585	1.605	0.970	0.868
5	48.38	100.61	43.52	22.95	5.558	4.578	1.622	0.816	0.737
6	48.41	100.21	43.45	22.79	5.51	3.944	1.382	0.937	0.842
7	49.35	100.20	45.21	23.21	5.375	4.251	1.383	0.932	0.788
8	48.47	100.47	44.41	24.01	5.813	4.410	1.635	1.138	1.048
9	50.01	100.41	45.21	24.12	5.431	3.995	1.321	0.935	0.799
10	48.91	100.15	43.99	23.48	5.554	4.322	1.515	0.938	0.839

**Ort. 1.543±0.14 0.979±0.11 0.873±0.11**

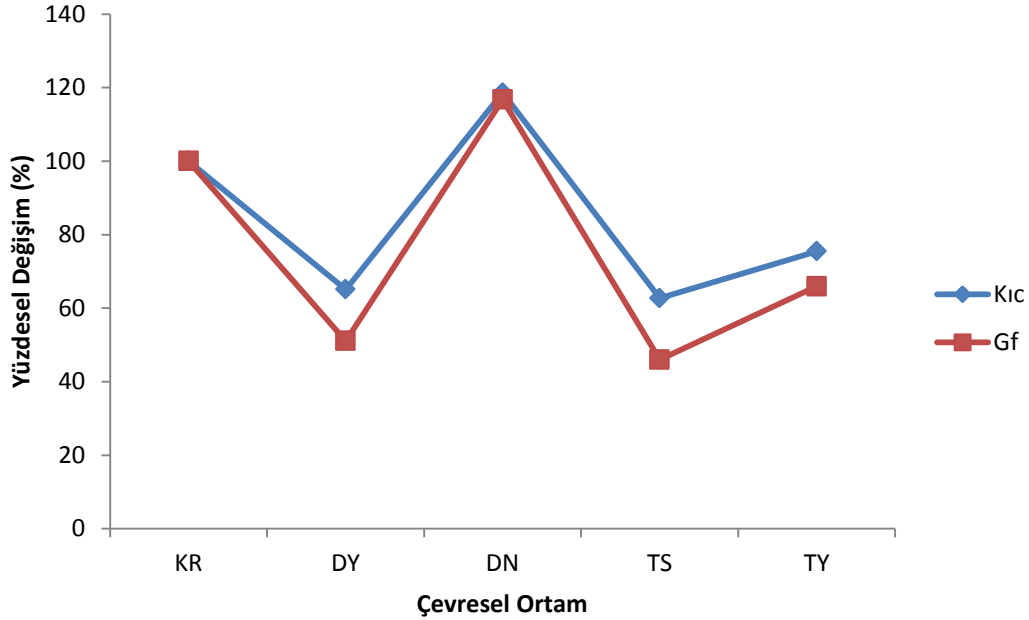
Çizelge 4.65. MB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N. No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.23	99.95	43.39	22.59	5.506	1.937	0.679	0.286	0.257
2	48.62	99.78	44.28	23.39	5.607	2.816	0.994	0.589	0.527
3	48.37	100.16	44.51	23.40	5.677	2.364	0.845	0.352	0.317
4	48.56	99.20	45.16	22.78	5.469	1.859	0.62	0.281	0.241
5	48.99	100.44	44.23	23.73	5.597	2.025	0.714	0.368	0.330
6	48.99	100.46	43.23	22.60	5.319	2.951	0.987	0.511	0.448
7	48.15	100.18	43.60	23.46	5.753	1.944	0.723	0.363	0.337
8	49.04	100.22	43.56	22.79	5.352	2.054	0.688	0.346	0.302
9	48.16	99.99	43.42	23.51	5.764	2.867	1.074	0.344	0.321
10	48.56	99.90	43.42	22.72	5.454	2.424	0.838	0.402	0.358

**Ort. 0.816±0.15 0.384±0.10 0.344±0.09**

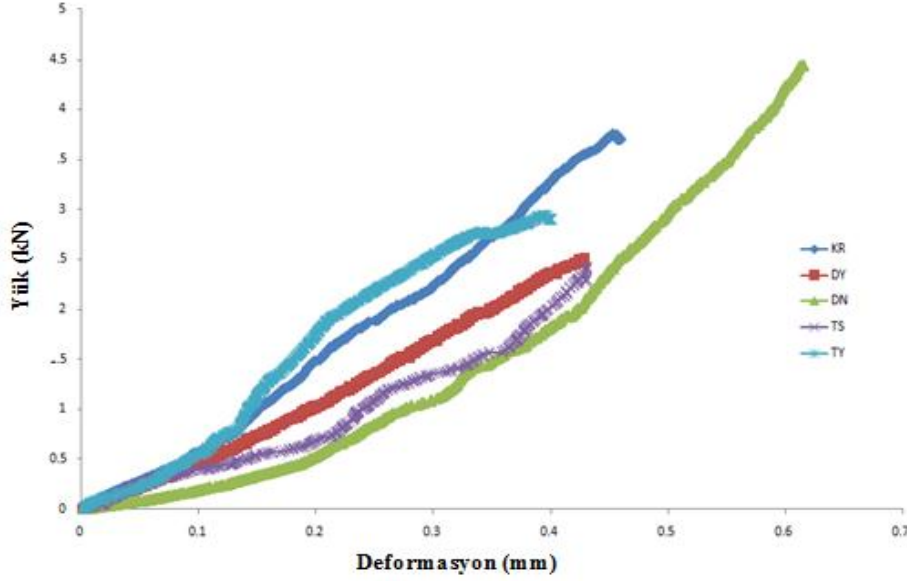
Çizelge 4.66. MB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N. No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.62	100.31	44.13	22.73	5.442	2.943	0.997	0.633	0.554
2	48.98	100.65	44.22	23.52	5.546	3.093	1.076	0.428	0.380
3	48.63	100.04	43.82	22.58	5.403	2.476	0.836	0.479	0.420
4	49.31	100.74	44.31	23.41	5.434	3.083	1.04	0.632	0.551
5	49.29	100.10	43.39	23.47	5.453	2.744	0.95	0.443	0.395
6	48.30	100.31	45.48	23.48	5.717	2.917	1.031	0.657	0.582
7	47.42	99.01	45.35	21.90	5.544	2.833	0.958	0.631	0.545
8	49.18	100.04	43.46	23.10	5.391	2.989	1.015	0.601	0.530
9	48.62	100.51	45.74	23.30	5.584	3.017	1.025	0.555	0.480
10	49.05	99.92	44.02	22.77	5.344	2.688	0.89	0.574	0.496
<b>Ort. 0.982±0.07</b>							<b>0.563±0.08</b>	<b>0.493±0.07</b>	



Şekil 4.17. MB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim





Şekil 4.18. MB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi

Şekil 4.17. incelendiğinde Malatya Bej örneğinin kırılma tokluğu değerlerinin kuru halden doygun hale geldiğinde % 34.90, termal şok uygulandıktan sonra % 37.28 ve termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 24.52 azalırken, donmuş halde % 18.60 oranında attığı görülmektedir. Benzer biçimde Yazıhan Bazalt örneğinin kırılma enerjisi değerleri de kuru halden doygun hale geldiğinde % 48.93, termal şok uygulandıktan sonra % 54.01 ve termal yaşlandırma uygulandıktan sonra % 34.09 azalırken, donmuş halde % 16.71 oranında artmıştır. Şekil 4.18. incelendiğinde kayaçların doygun durumda, termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonrasında deformasyon ve maksimum kırılma yüklerinin düştüğü, don halinde ise arttığı görülmüştür. Farklı çevresel ortamlarda bu tür kayaçlar üzerinde yapılacak olan mühendislik çalışmalarında kayaçların mod I kırılma tokluğu değerlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Kayacın termal şok, termal yaşlandırma uygulaması sonrasında ve suya tam doygun durumlarında kuru haldeki dayanımından oldukça düşük değerler çıkması, kayacın mod I kırılma ihtimalinin artırdığını göstermiştir. Şevlerin, yeraltı açıklıkların duraylılığının sağlanması gibi kayaçlarda ani kırılmanın etken olduğu ve bu durumların istenmediği mühendislik çalışmalarında termal şok, termal yaşlandırma ve doygunluğun kırılma tokluğuna etkilerinin belirlenmesi ve tasarımların bu koşullardaki kırılma parametreleri göz önünde bulundurularak yapılması önem arz etmektedir. Ayrıca kazılabilirlik, delme-patlatma tasarımı gibi çalışmalarda bu koşulların kırılma tokluğunu artırarak işlemlerin verimliliğinde olumlu etki yaptığı göz önünde bulundurulmalıdır. Aynı şekilde don halinde kayacın mod I kırılma değerindeki yüksek artış, delme-patlatma, kazılabilirlik gibi çalışmalarda donanım-

ekipman seçiminde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Aksi takdirde donanım-ekipmanlarda erken yıpranma ve bundan kaynaklanan olarak iş tamamlama sürelerinde gecikmeler kaçınılmaz olacaktır.

Çizelge 4.67. AB örneğinin kuru halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>0</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.30	99.90	44.14	22.93	5.574	3.720	1.305	0.681	0.608
2	47.21	100.17	44.62	22.61	5.785	3.580	1.31	0.467	0.426
3	48.37	99.54	44.27	22.18	5.372	3.432	1.136	0.441	0.381
4	49.04	100.11	44.45	24.07	5.672	3.408	1.219	0.786	0.709
5	47.96	99.97	43.89	22.85	5.643	3.580	1.286	0.68	0.617
6	48.48	100.03	44.44	22.90	5.519	3.638	1.25	0.608	0.535
7	48.42	100.24	43.62	23.51	5.692	3.591	1.315	0.857	0.789
8	48.40	100.21	44.46	22.86	5.53	3.666	1.262	0.47	0.414
9	47.43	99.58	44.50	22.07	5.584	3.615	1.259	0.471	0.417
10	48.29	99.89	44.08	22.77	5.536	3.957	1.376	0.67	0.595
<b>Ort. 1.272±0.06 0.613±0.15 0.546±0.14</b>									

Çizelge 4.68. AB örneğinin doygun halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.43	99.25	44.01	25.31	6.202	2.076	0.852	0.237	0.233
2	47.88	100.18	44.02	25.78	6.53	2.022	0.891	0.208	0.214
3	49.86	100.08	43.57	27.71	6.491	2.025	0.893	0.285	0.295
4	48.78	100.17	43.63	26.45	6.445	1.995	0.871	0.46	0.472
5	48.95	100.21	44.72	26.80	6.501	2.396	1.032	0.322	0.325
6	48.04	100.06	44.07	26.27	6.637	2.393	1.078	0.428	0.446
7	48.80	100.01	44.53	25.66	6.192	2.214	0.896	0.584	0.566
8	49.20	100.20	43.26	25.08	5.903	2.199	0.856	0.575	0.551
9	49.22	99.78	44.17	25.79	6.102	2.180	0.871	0.528	0.51
10	49.35	100.04	42.48	26.67	6.329	2.325	1.016	0.593	0.615
<b>Ort. 0.926±0.08 0.422±0.15 0.423±0.15</b>									

Çizelge 4.69. AB örneğinin donmuş halde kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

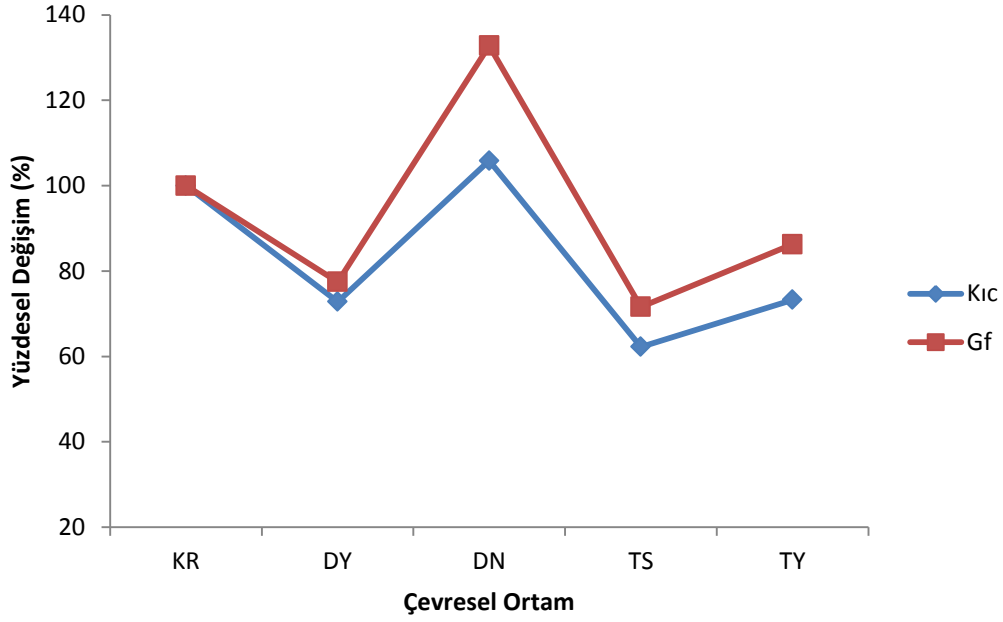
N. No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>1c</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.42	100.22	44.27	22.64	5.47	3.859	1.313	0.795	0.697
2	48.41	100.33	44.77	22.95	5.55	3.683	1.266	0.632	0.554
3	48.20	99.88	43.49	22.28	5.438	4.079	1.4	0.939	0.833
4	49.40	100.08	43.02	22.99	5.311	4.056	1.362	0.810	0.713
5	48.34	99.92	43.92	22.15	5.372	3.784	1.263	0.946	0.823
6	48.01	99.88	42.52	21.71	5.35	3.798	1.3	0.834	0.746
7	48.42	100.19	44.21	22.79	5.507	4.201	1.446	0.992	0.875
8	48.85	99.91	43.23	22.96	5.44	3.744	1.295	0.720	0.644
9	47.42	99.65	44.50	22.44	5.682	4.101	1.466	0.712	0.640
10	48.62	100.30	43.70	22.87	5.476	3.996	1.38	0.820	0.729
<b>Ort. 1.349±0.07 0.820±0.11 0.725±0.10</b>									

Çizelge 4.70. AB örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

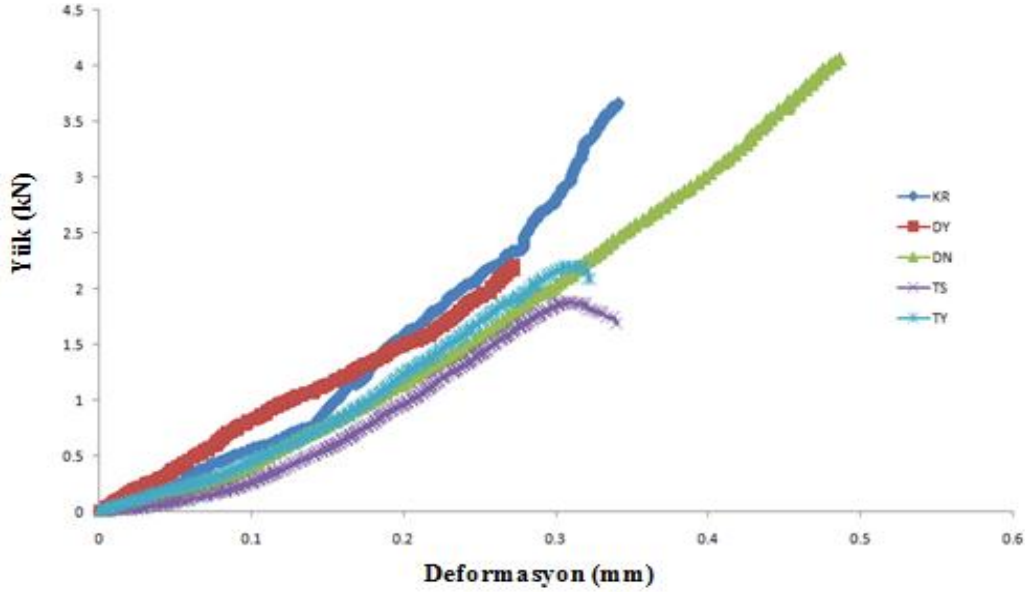
N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	48.01	99.99	43.66	25.25	6.316	1.899	0.806	0.291	0.293
2	47.84	99.99	43.47	25.26	6.375	1.997	0.862	0.49	0.499
3	48.24	99.91	42.74	26.94	6.795	1.939	0.930	0.274	0.301
4	48.67	100.38	43.28	25.85	6.292	1.878	0.799	0.281	0.284
5	49.45	100.48	43.08	26.96	6.387	1.885	0.822	0.598	0.618
6	48.23	100.34	43.09	26.74	6.73	1.785	0.838	0.521	0.563
7	49.15	100.55	43.23	25.01	5.897	1.577	0.613	0.495	0.474
8	48.80	99.62	43.55	26.88	6.578	1.657	0.745	0.344	0.36
9	48.31	100.38	42.37	26.79	6.718	1.630	0.776	0.289	0.317
10	47.76	99.25	42.26	25.56	6.498	1.587	0.724	0.186	0.198
<b>Ort. 0.792±0.09 0.377±0.14 0.391±0.14</b>									

Çizelge 4.71. AB örneğinin termal yaşlandırma uygulaması sonrası kırılma tokluğu, enerjisi ve iş

N.No	R (mm)	D (mm)	B (mm)	a <sub>o</sub> (mm)	Y	P (kN)	K <sub>ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	W <sub>f</sub> (Joule)	G <sub>f</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )
1	49.39	100.01	42.22	26.90	6.388	2.461	1.096	0.463	0.487
2	49.38	100.06	42.72	26.67	6.319	2.201	0.954	0.579	0.596
3	49.85	100.63	42.06	25.58	5.856	2.047	0.81	0.482	0.472
4	47.96	100.30	42.04	25.51	6.415	2.056	0.926	0.322	0.341
5	48.38	100.01	42.51	25.65	6.322	2.199	0.959	0.418	0.432
6	49.74	100.45	42.21	25.26	5.799	2.045	0.796	0.447	0.432
7	47.86	100.91	42.44	25.38	6.407	2.071	0.922	0.699	0.733
8	48.41	99.31	42.82	25.04	6.126	2.025	0.839	0.404	0.404
9	47.83	100.54	42.54	25.37	6.413	2.261	1.006	0.326	0.341
10	48.67	100.16	42.10	25.86	6.295	2.319	1.015	0.457	0.476
<b>Ort. 0.932±0.10 0.457±0.11 0.471±0.12</b>									



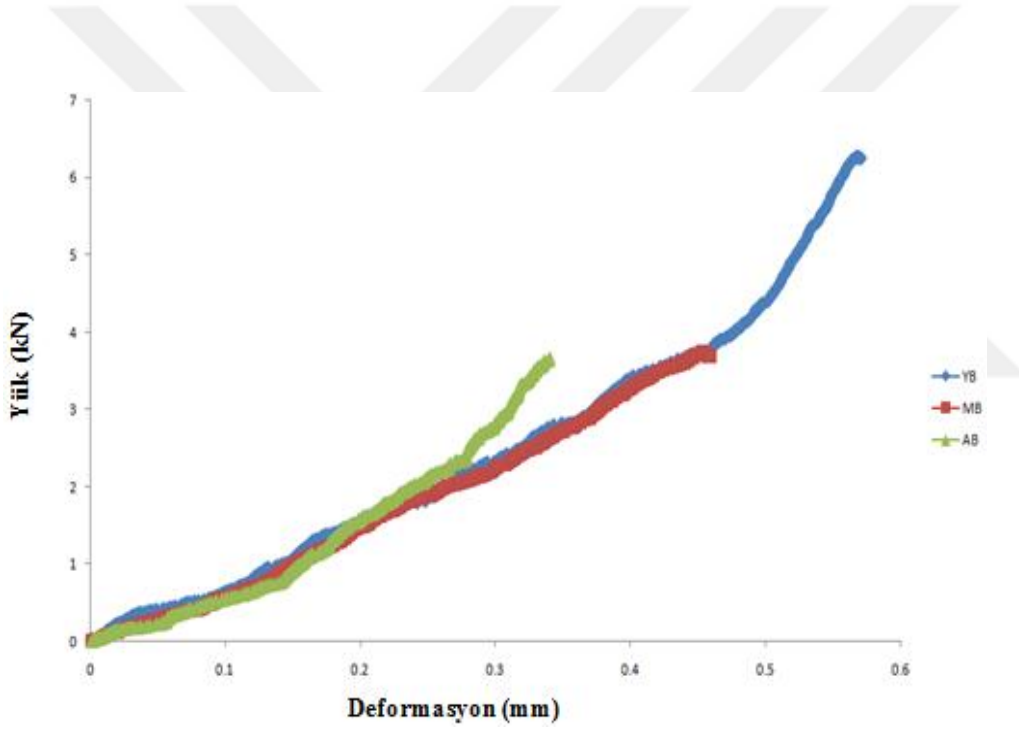
Şekil 4.19. AB örneğinin farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu ve enerjisindeki yüzdesel değişim



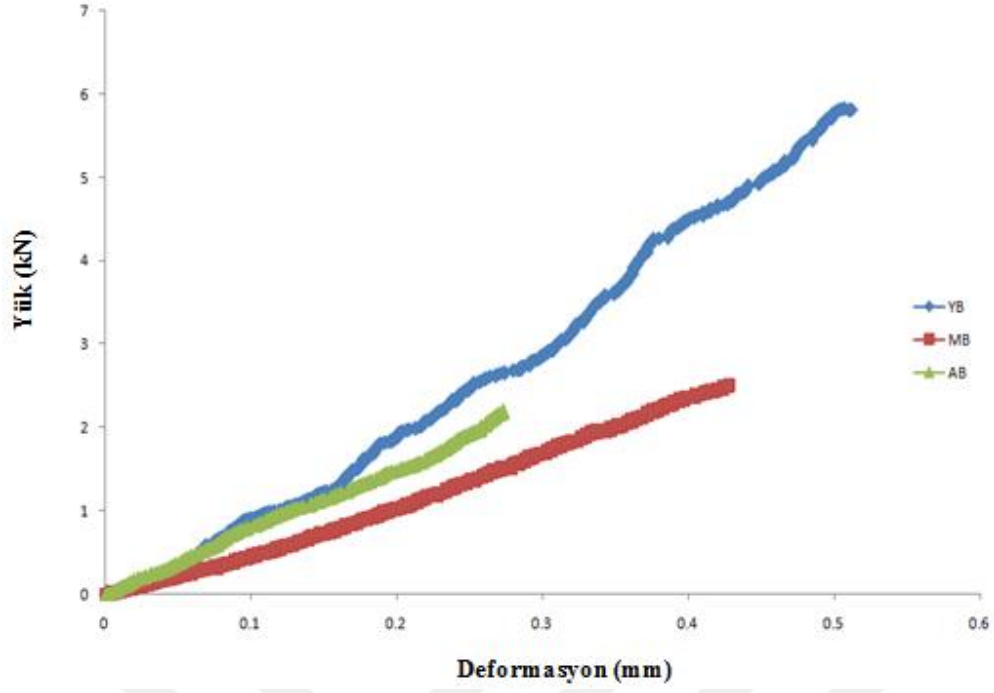
Şekil 4.20. AB örneğinin farklı çevresel koşullar altında deformasyon-yük ilişkisi

Şekil 4.19. incelendiğinde Afyon Beyaz örneğinin kırılma tokluğu değerinin kuru halden doygun hale geldiğinde % 27.20, termal şok uygulaması sonrası % 37.73 ve termal yaşlandırma uygulaması sonrası % 26.72 azalırken, donmuş halde % 5.81 oranında arttığı görülmektedir. Benzer biçimde Yazihan Bazalt örneğinin kırılma enerjisi değerinin kuru halden doygun hale geldiğinde % 22.53, termal şok uygulaması sonrası % 28.38 ve termal

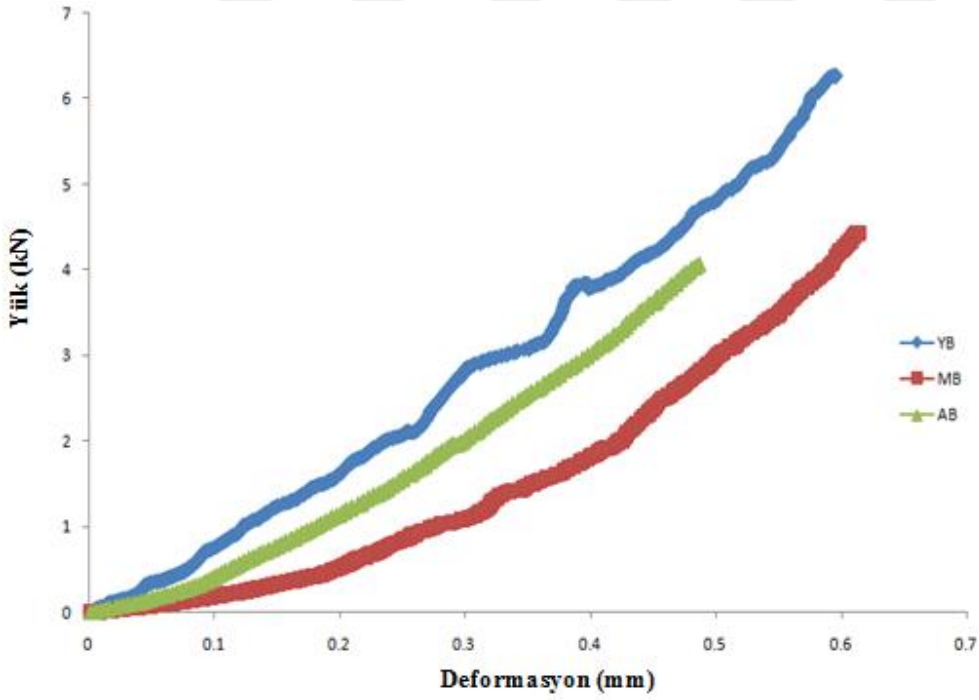
yaşlandırma uygulaması sonrası % 13.73 azalırken, donmuş halde % 32.78 oranında arttığı görülmektedir. Şekil 4.20. incelendiğinde Afyon Beyaz örneğinin doymun, termal şok ve termal yaşlandırma durumlarında deformasyon ve maksimum kırılma yüklerinin azaldığı, don halinde ise arttığı görülmüştür. Afyon Beyaz ile Malatya Bej örneğinin termal şok ve termal yaşlandırma işlemleri sonunda kırılma tokluğundaki yüzdesel azalma neredeyse eşit iken doymun halde Malatya Bej örneği daha fazla dayanım kaybı yaşamıştır. Afyon Beyaz örneğinin tüm çevresel etmenler sonucunda kırılma enerji değerleri en düşük olmasına rağmen, yüzdesel olarak incelendiğinde Malatya Bej örneğindeki değişimin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, Malatya Bej örneğinin maksimum kırılma yükünün çok etkilenmediğini fakat birim deformasyon miktarında azalmanın fazla olduğu anlamına gelmektedir.



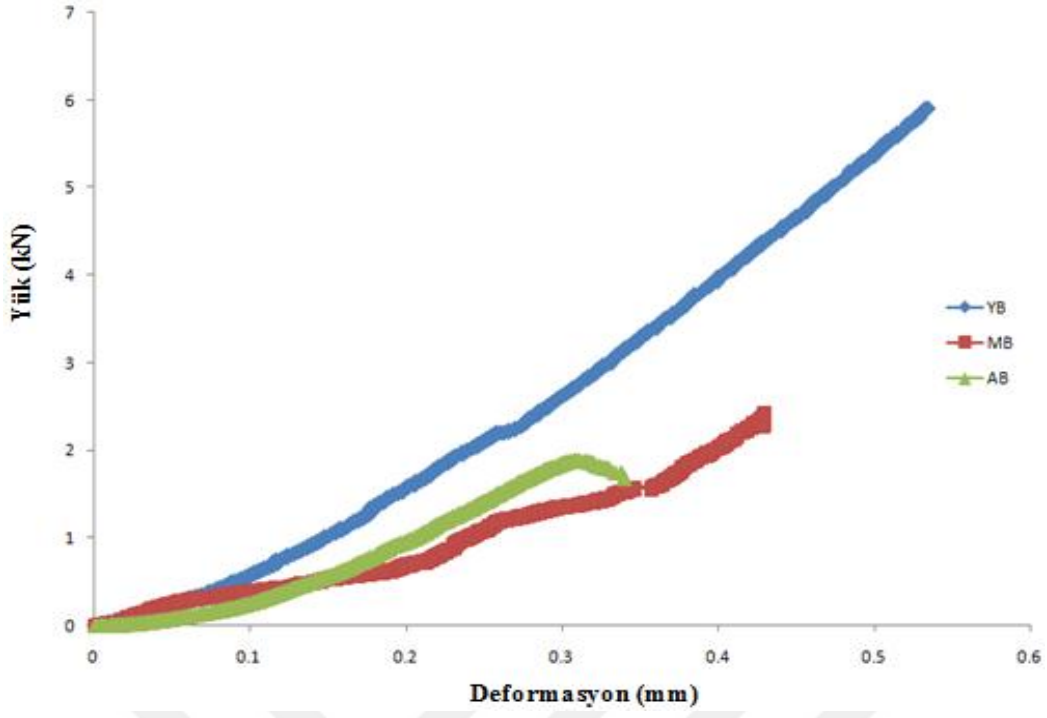
Şekil 4.21. Kuru halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi



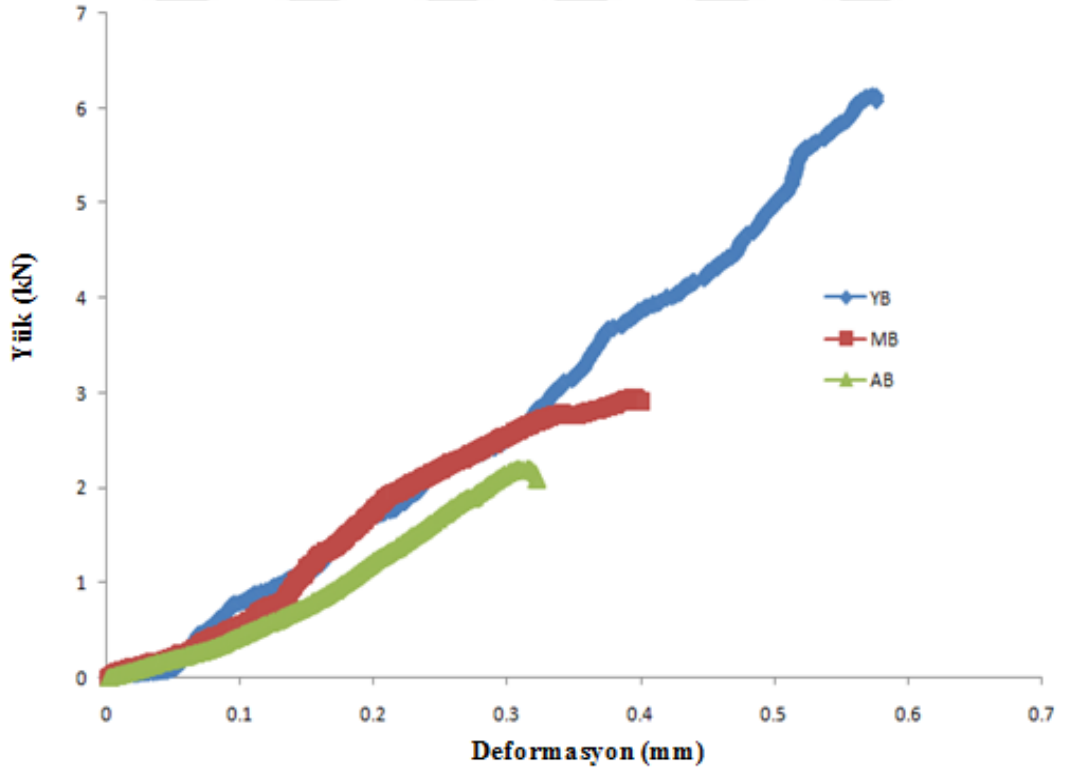
Şekil 4.22. Doğru halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi



Şekil 4.23. Donmuş halde kayaçların deformasyon-yük ilişkisi



Şekil 4.24. Termal şok uygulaması sonrası kayaçların deformasyon-yük ilişkisi



Şekil 4.25. Termal yaşlandırma uygulaması sonrası kayaçların deformasyon-yük ilişkisi

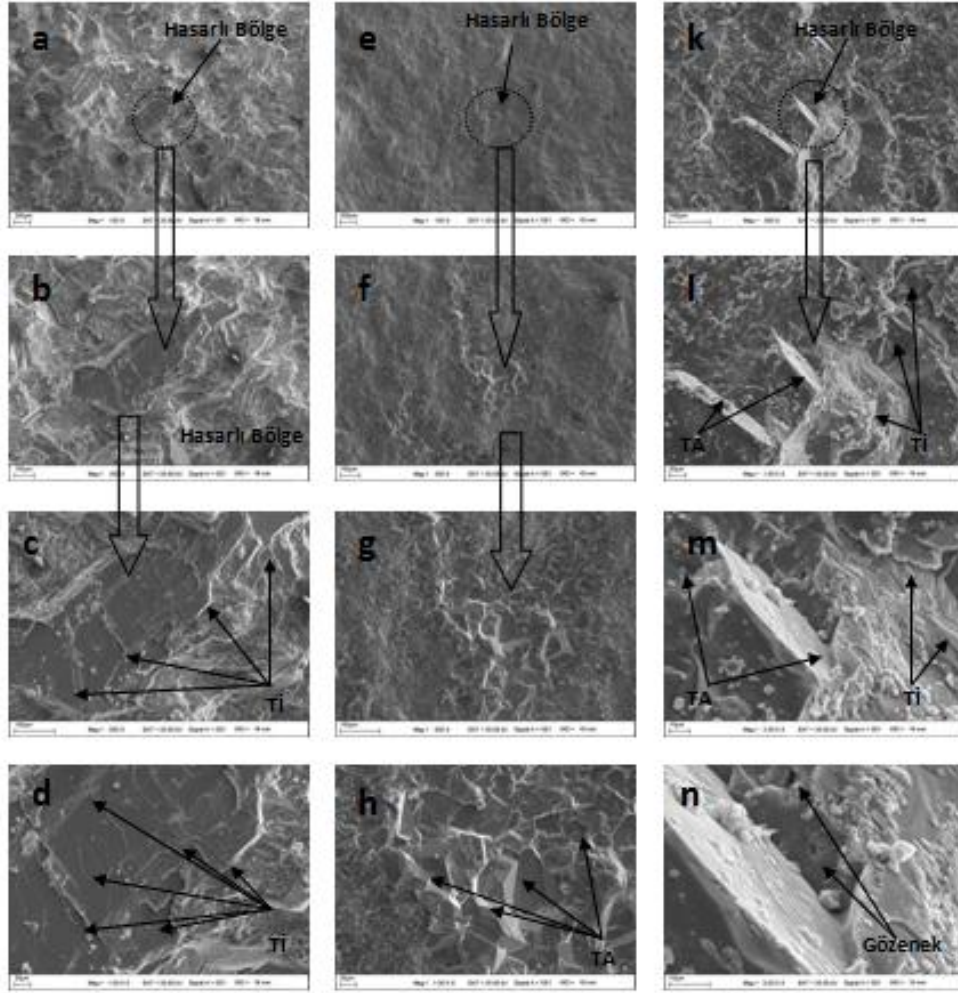


Kırılma mekaniği çalışmalarında insan yapımı malzemeler (metal gibi) ile doğal malzemelerin (kayaç gibi) mühendislik uygulamasında farklılıklar gösterebileceği dikkate alınması gereken bir konudur. Kayaçlar heterojen yapıya sahip olduklarından farklı jeolojik ve mühendislik özellikler göstermektedir. Bu farklılıklarından ötürü fiziko-mekanik özellikleri kayacın türü, mineralojik yapısı, oluşum yerleri, tane şekilleri, taneler arası bağı, gözenekliliği gibi birçok parametreye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kaya kütlelerinin karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle, karakterizasyonlarının belirlenmesi oldukça zordur. Laboratuvar çalışmaları genellikle kaya malzemesinin özelliklerini belirlemeye yönelik olduğundan dolayı tasarım yaparken bu özelliklere ek olarak kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri ve çevresel ortam koşullarındaki değişiklikler sebebiyle gelişen değişikliklerde ele alınmalıdır.

Şekil 4.21-4.25. incelendiğinde tüm çevresel etmenler altında kayacın kırılması için yapılan iş (Wf) ve harcanan enerjinin (Gf) Yazıhan bazalt örneğinde en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Yazıhan bazaltın farklı çevresel etmenler altında kırılması için yapılan iş ve harcanan enerji diğer kayaçlara nazaran daha az farklılık göstermektedir. Buna karşın Malatya Bej örneğinin termal şok uygulaması sonrası kırılma için yapılan iş ve harcanan enerji diğer örneklere nazaran daha düşük değerdedir. Afyon Beyaz örneği ise termal şok uygulaması hariç diğer dört çevresel koşuldan en çok etkilenen örnek olup diğer fiziko-mekanik özellikleri ile benzer eğilimler göstermiştir.

#### 4.1.3.6. SEM analizi sonuçları

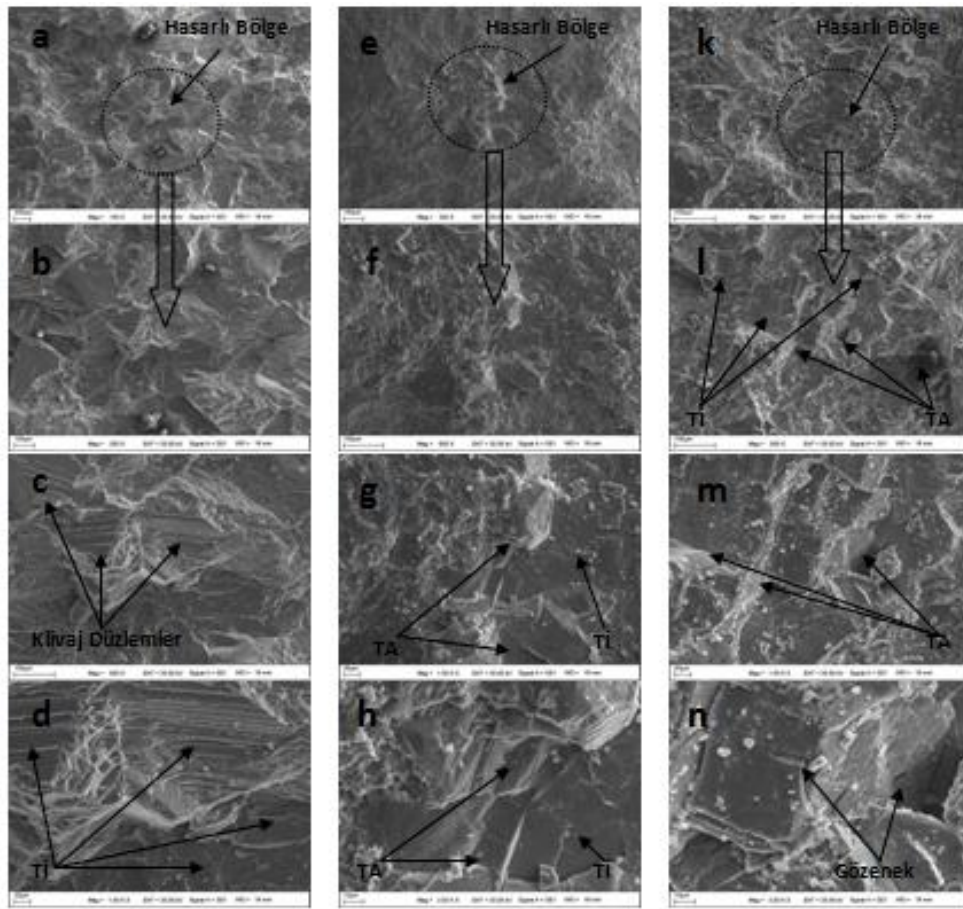
Çalışılan kayaçların İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan SEM analizi sonucunda elde edilen görüntüleri Şekil 4.26-4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.26. Kayaçların kuru haldeki SEM görüntüleri

Şekil 4.26 (a-d)'de Afyon Beyaz örneğine ait SEM görüntülerine yer verilmiştir. Kayacın kırılma yüzeyleri incelendiğinde genel olarak tane içi kırılmanın olduğu bunun gevrek kırılma türüne girdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.26 (c-d)'de kırılmanın numunenin kristal düzlemleri boyunca gerçekleştiği görülmektedir. Diğer bir deyişle her bir kırık tanenin belli bir kristal düzlemi boyunca ilerleyerek numunede yenilme gerçekleştirmiştir. Ayrıca malzemenin tane içi kırılma gösterdiğinin diğer bir kanıtı da hem kırılma yüzeyinin traşlanmış görünümü hem de nehir izi adı verilen basamaklar (Şekil 4.26 (c-d)) şeklindeki izlerdir. Şekil 4.26 (e-h)'de verilen Malatya Bej örneğine ait SEM görüntülerinde diğer

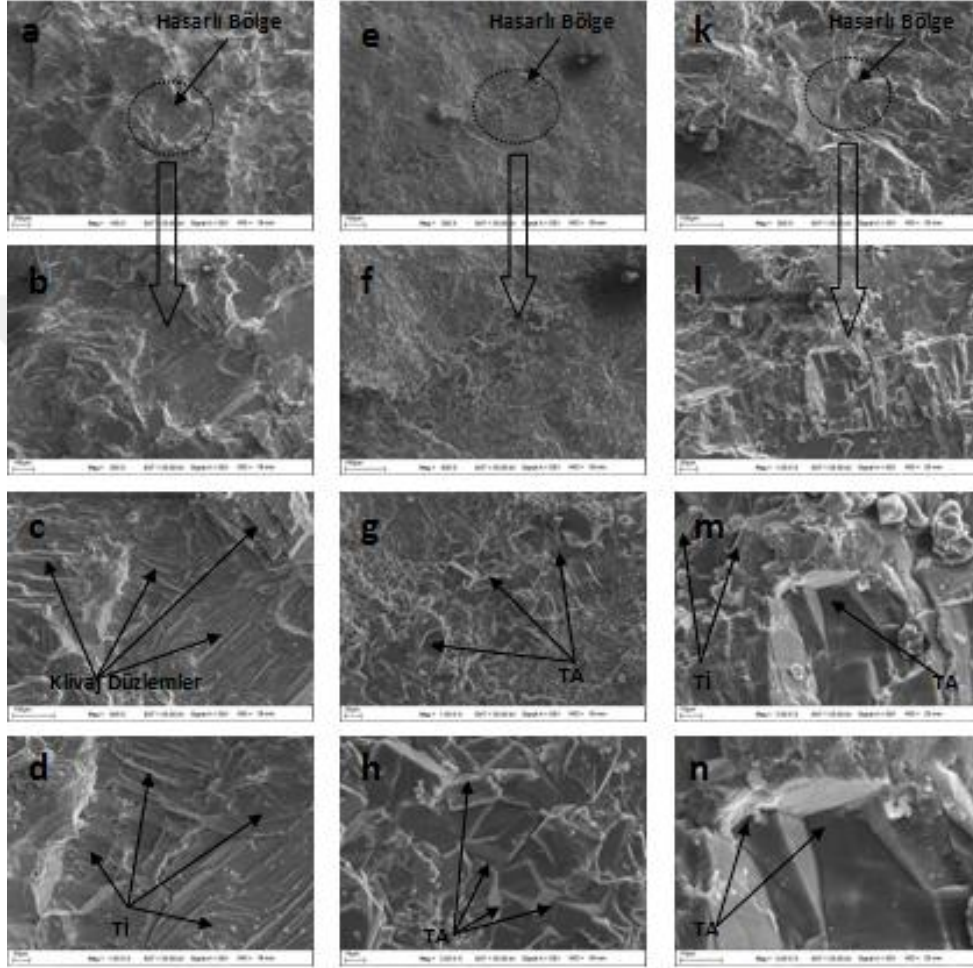
gevrek kırılma türü olan taneler arası kırılmanın meydana geldiği net olarak gözlemlenmektedir (Şekil 4.26 (h)). SEM görüntülerinde kopan tanelerin yüzeylerinin oluşturmuş olduğu tane boşlukları net biçimde görülmektedir. Bu tür kırılmalar çatlağın tanelerin içinden geçerek değil tanelerin arasından ilerlediğinin kanıtıdır. SEM görüntüsü daha yakından incelediğinde ise numune parçalanmasına rağmen tane yapıları açıkça görülmektedir. Şekil 4.26 (k-n)'de ise Yazihan Bazalt örneğine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Yazihan Bazalt örneği kuru halde iken hem taneler arası hem de tane içi kırılma türü göstermiştir (Şekil 4.26 (l-m)). Tane kopmasına ek olarak kayma gerilmesine bağlı gelişen yenilme sonucunda kayacın tane içi kırılma düzlemi de görülmektedir.



Şekil 4.27. Kayaçların doygun haldeki SEM görüntüleri

Şekil 4.27 (a-d)'de Afyon Beyaz örneğine ait SEM görüntülerine yer verilmiştir. Afyon Beyaz örneği kuru halden doygun hale geçtiği zaman kuru haldeki kırılmaya benzer olarak tane içi kırılma göstermiştir. Kopmalar klivaj düzlemleri boyunca meydana geldiği için tane içi klivaj kırılmasına örnek bir görüntü elde edilmiştir. Şekil 4.27 (e-h)'de Malatya Bej örneğine ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Malatya Bej örneği kuru halden

doğun hale geçtiği zaman hem taneler arası hem de tane içi kırılma olayı gözlemlenmiştir. Çatlağın hem tane içinde hem de tane köşelerinde ilerlediği net olarak görülmektedir. Şekil 4.27 (k-n)'de Yazıhan Bazalt örneğine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Yazıhan Bazalt örneği kuru halden doğun hale geldiğinde ise çatlağın hem tane içi hem de taneler arasında ilerlediği görülmektedir.

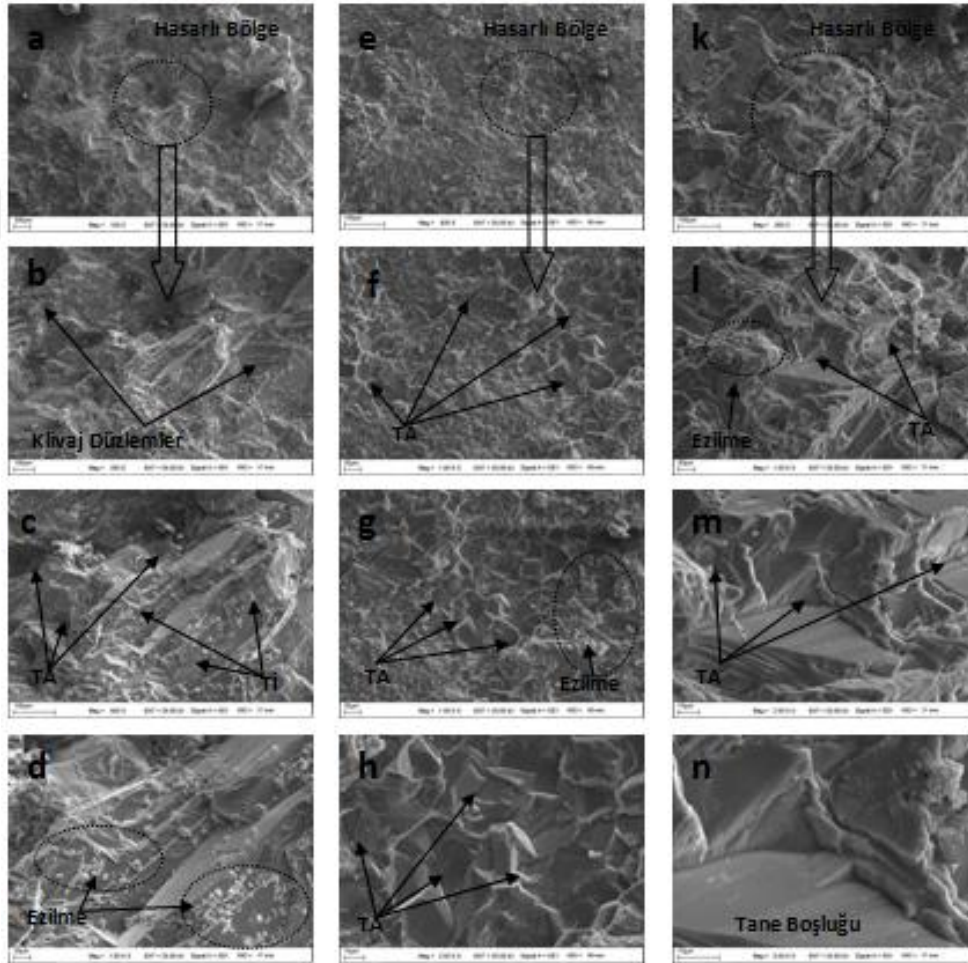


Şekil 4.28. Kayaçların donmuş haldeki SEM görüntüleri

Şekil 4.28 (a-d)'de verilen Afyon Beyaz örneğine ait SEM görüntüleri incelendiğinde numune kuru halden donmuş hale geldiğinde kırılma yüzeylerinde tane içi kırılmanın geliştiği görülmektedir. Örnek tane içi kırılma türünü temsil eden traşlanmış görüntünün yanı sıra nehir izleri de taşımaktadır. Bu nehir izleri, çatlağın birkaç ayrı düzleme geçerek büyümesinden kaynaklandığını göstermektedir. Çatlak tek bir düzlem üzerinde değil paralel konumlanan bir düzlemden diğer bir düzleme geçerek ilerlemektedir. Şekil 4.28 (d)'de görüldüğü üzere çatlaklar basamak şeklinde nehir izi adı verilen izler bırakmaktadır. Şekil 4.28 (e-h)'de Malatya Bej örneğine ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Malatya Bej



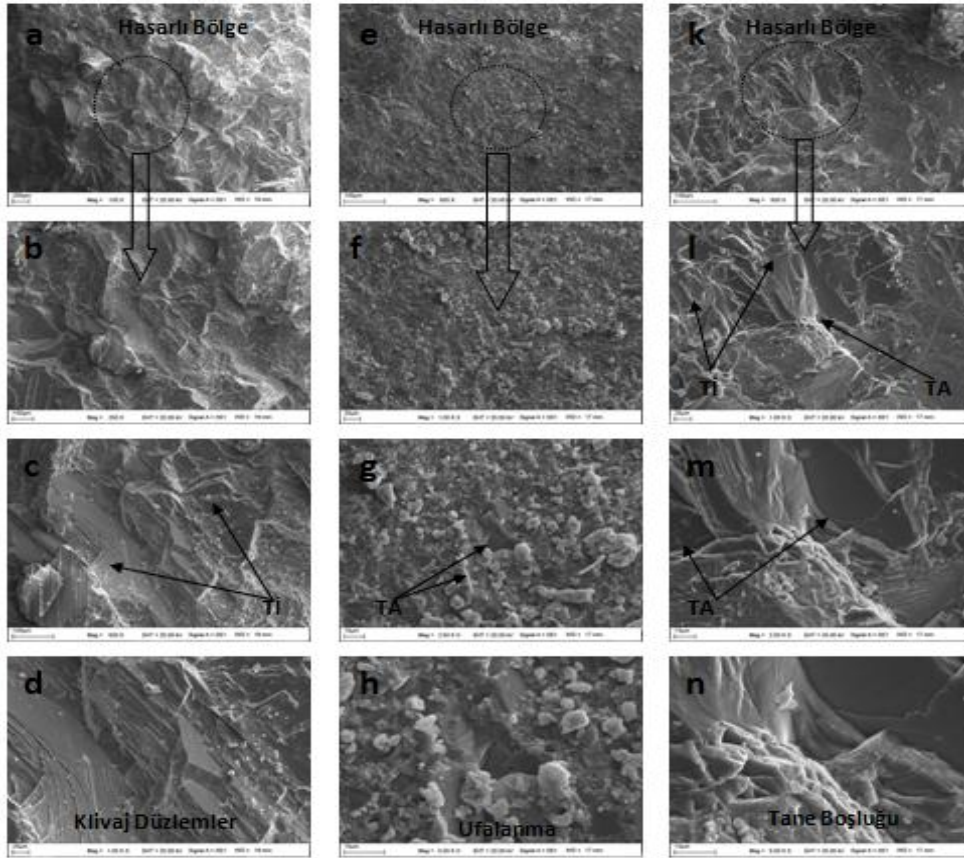
örneği kuru halden donmuş hale geldiği zaman taneler arası kırılma gözlemlenmektedir. Şekil 4.28 (k-n)'de Yazıhan Bazalt örneğine ait SEM görüntüsüne yer verilmiştir. Yazıhan Bazalt numunesi kuru halden donmuş hale geldiği zaman elde edilen SEM görüntülerinde hem klivaj düzlemlerinden kaynaklı olarak tane içi kırılma hem de tane boşluklarından dolayı taneler arası kırılma net bir biçimde görülmektedir (Şekil 4.28 (m)). Bu durumda çatlağın yalnız tane içinde değil aynı zamanda tane köşelerinden de ilerlediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.29. Kayaçların termal şok uygulaması sonrasında SEM görüntüleri

Şekil 4.29 (a-d)'de Afyon Beyaz örneğine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Termal şok uygulanmış Afyon Beyaz örneklerinde ilk kez tane içi kırılmaya ek olarak taneler arası kırılma da görülmektedir. Şekil 4.29 (b)'de ise kırılma esnasında meydana gelen klivaj düzlem çizgileri bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 4.29 (c)'de hem tane içi hem de taneler arası kırılma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.29 (d)'de ise termal şok etkisiyle kırılma yüzeylerinde ek olarak tanelerin ezildiğine dair görüntü de

gözükmektedir. Şekil 4.29 (e-h)'de Malatya Bej örneğine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Termal şok uygulanmış Malatya bej örneklerinde taneler arası kırılma gözlemlenmektedir. Afyon Beyaz örneğinin SEM görüntülerinde tanelerin kendi aralarında da parçalandığı görülmektedir. Şekil 4.29 (k-n)'de Yazıhan Bazalt örneğine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Termal şok uygulanmış Yazıhan bazalt örneğinde taneler arası kırılma gözlemlenmektedir. Tanelerin sürtünme ile kayması sonucunda Şekil 4.29 (d, g ve l)'de görüldüğü üzere tane ayrışmasına neden olan minerallerinin etrafında termal şokun oluşturmuş olduğu yorulmadan kaynaklı ezilme-parçalanmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca tane köşelerinin yakınında biriken tanelerin etrafındaki ince parçalar da (toz halinde) gözlenmektedir.



Şekil 4.30. Kayaçların termal yaşlandırma haldeki SEM görüntüleri

Şekil 4.30 (a-d)'de Afyon Beyaz örneğine ait SEM görüntüsü bulunmaktadır. Termal yaşlandırma uygulanan Afyon Beyaz örneğinde tane içi kırılma gözlemlenmiştir. Şekil 4.30 (d)'de makaslama gerilmesine bağlı gelişen yenilmeye meydana gelen klivaj düzlem yüzeyleri net olarak görülmektedir. Şekil 4.30 (e-h)'de Malatya Bej örneğine ait SEM görüntülerine yer verilmiştir. Termal yaşlandırma uygulanmış Malatya Bej örneğinde

taneler arası kırılma gözlemlenmektedir (Şekil 4.30 (g-h)). Ayrıca termal şoktaki duruma benzer biçimde taneler arasında ufalanma ve gevşeme meydana gelmiştir. Şekil 4.30 (k-n)'de Yazıhan Bazalt örneğine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Termal yaşlandırma uygulanan Yazıhan Bazalt örneğinde hem taneler arası hem de tane içi kırılma türü gözlemlenmektedir.

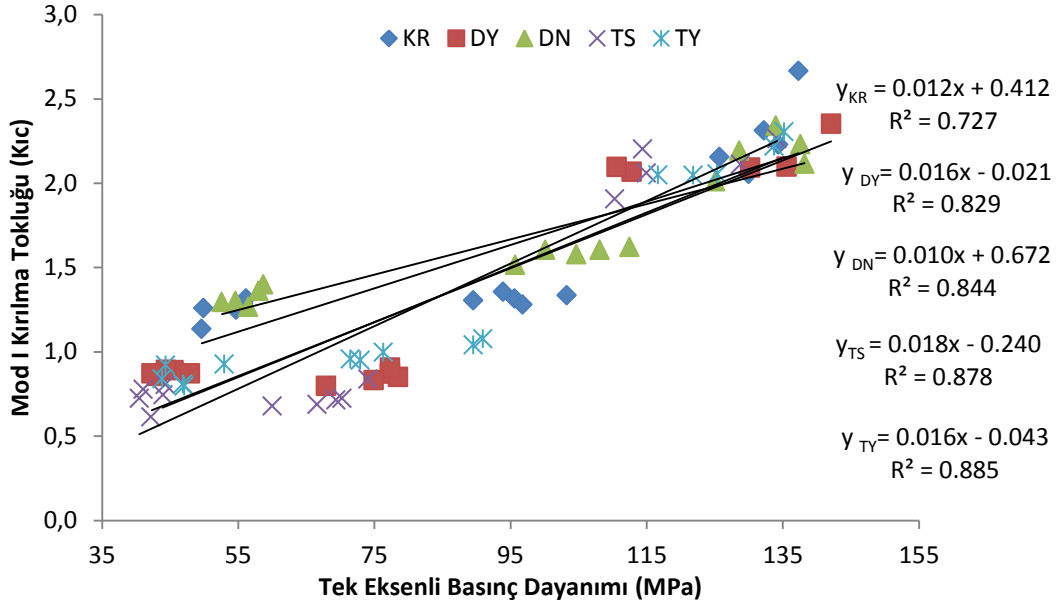
SEM görüntüleri incelendiğinde termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonrası kayaçların kırılma yüzeylerinde ezilme ve taneler arası kopmanın arttığı görülmektedir. Özellikle termal şok uygulamasının kayaçların taneler arası kırılmaya neden olduğu SEM analizleri sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu durumun ısıl değişimlerin kayaç kohezyonunda düşüş yaratmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

#### **4.1.4. İstatistiksel sonuçlar**

Kayaçların kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi yerbilimleri ile ilgili tasarım çalışmalarında oldukça önem arz etmektedir. Fakat bu değerlerin belirlenmesi için deneye uygun numune hazırlama, kalifiye eleman ve pahalı teçhizata gereksinim duyulmaktadır. Bir alternatif olarak, kayaçların bazı fiziko-mekanik testlerini kullanarak kırılma tokluğu değerlerini tahminlemede kullanılacak basit modeller geliştirilebilir. Tez kapsamında SPSS 20 paket programı kullanılarak yapay sinir ağları, basit ve çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir.

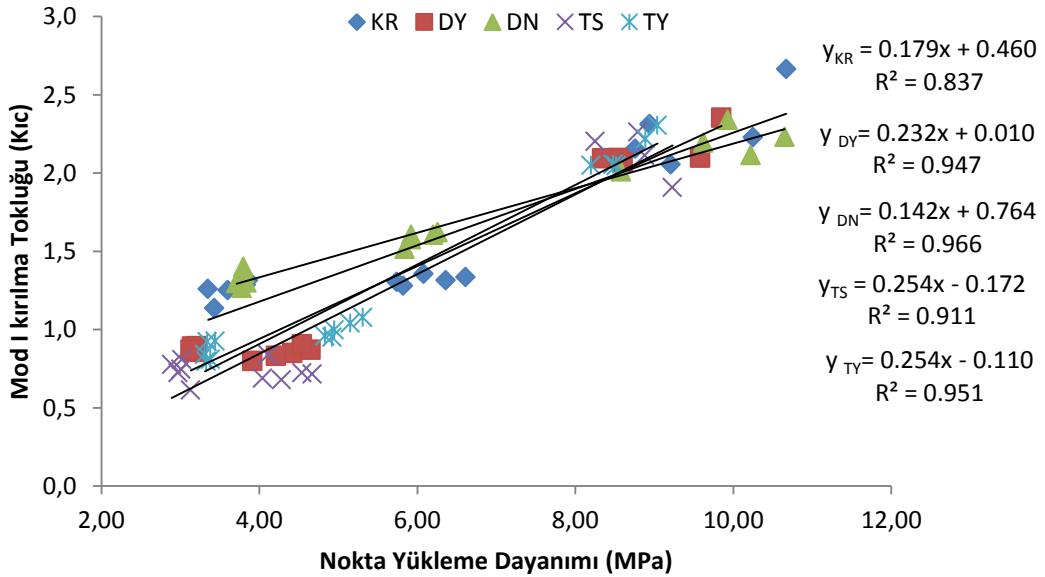
##### **4.1.4.1. Basit regresyon sonuçları**

Kayaçların farklı çevresel ortamlardan elde edilen kırılma tokluğu değerleri bağımlı değişken olarak kabul edilerek diğer fiziko-mekanik testler (bağımsız değişkenler) ile tahminleme yapılacak basit modeller geliştirilmiştir.



Şekil 4.31. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile tek eksenli basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki

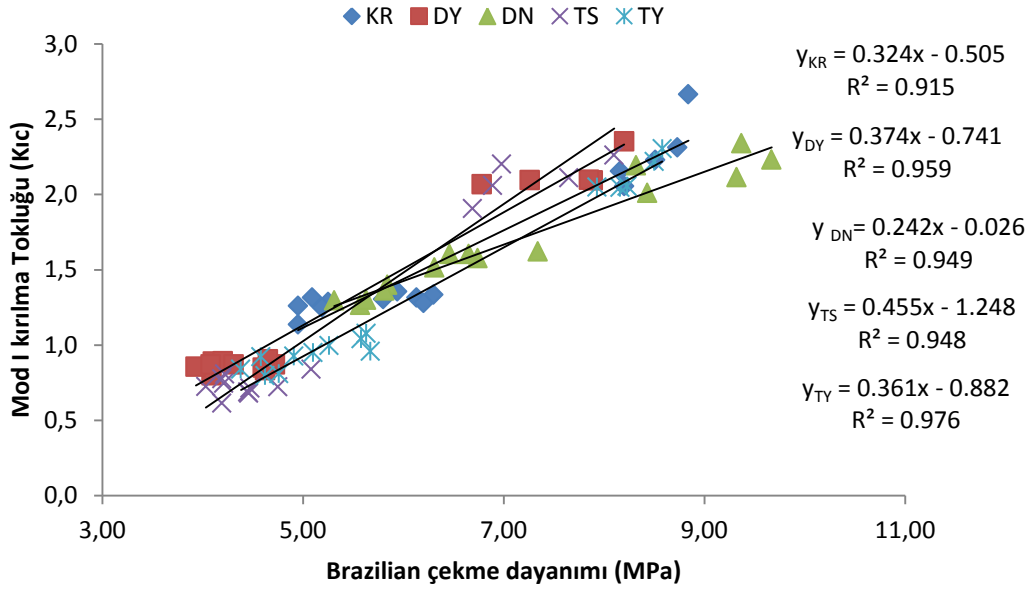
Şekil 4.31. incelendiğinde kayaların tek eksenli basınç dayanımı ile kırılma tokluğu arasındaki ilişkinin belirteci olan R<sup>2</sup> değerinin 0.70'den büyük olduğu görülmektedir. Buda modelden elde edilen ilişkinin güçlü olduğu anlamına gelmektedir. En yüksek ve en güçlü ilişki ise termal şok ve termal yaşlandırma durumlarında elde edilmiştir.



Şekil 4.32. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile nokta yükleme dayanımı değerleri arasındaki ilişki

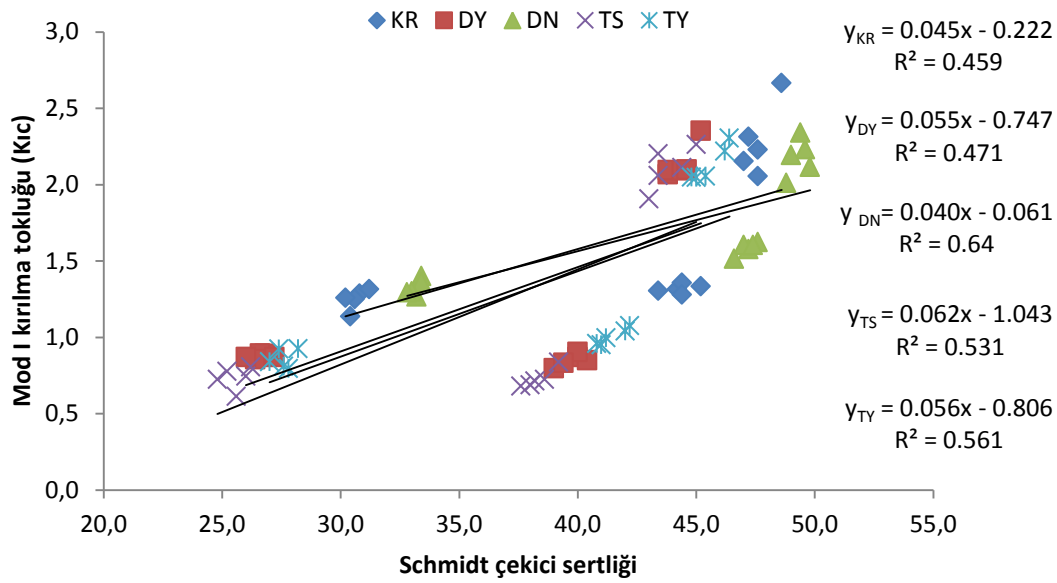


Şekil 4.32. incelendiğinde kayaçların nokta yükleme dayanımı ile kırılma tokluğu arasında tüm çevresel koşullar için  $R^2 > 0.83$ 'den büyük olduğu görülmekte olup ilişkinin oldukça güçlü olduğu anlamına gelmektedir. Tek eksenli basınç dayanımından elde edilen ilişkilere nazaran daha güçlü modeller geliştirilmiştir. Özellikle kuru hal hariç diğer dört koşul için  $R^2 > 0.91$ 'den büyük çıkması ilişkinin güçlü olduğunu göstermektedir.



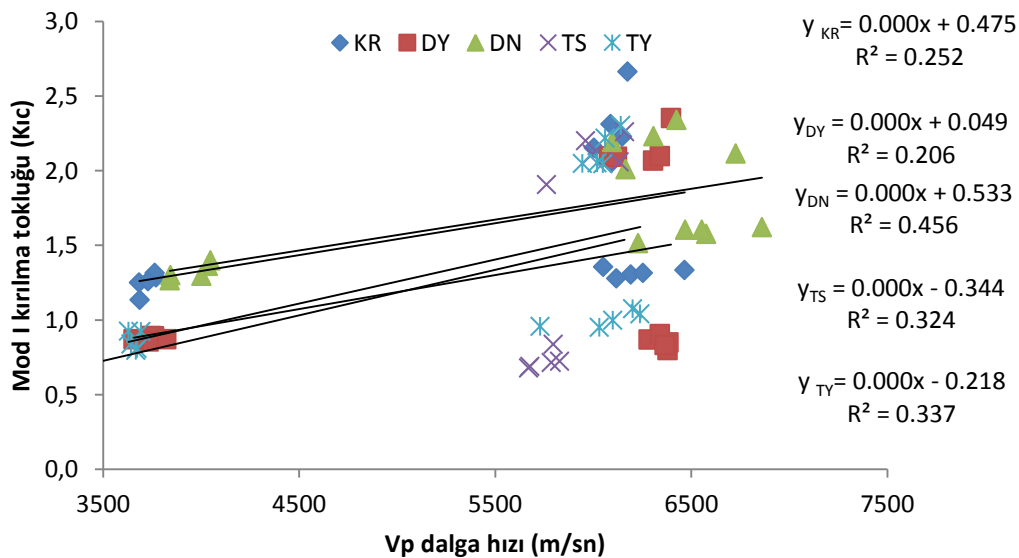
Şekil 4.33. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Brazilian çekme dayanımı değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4.33. incelendiğinde kayaçların Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı ile kırılma tokluğu arasında tüm çevresel etmenler için  $R^2 > 0.91$ 'den büyük olduğu görülmekte olup ilişkinin oldukça güçlü olduğu anlamına gelmektedir. Kayaçların Brazilian çekme dayanımı ile nokta yükleme dayanımlarından elde edilen ilişkilerinin diğer fiziko-mekanik özelliklere nazaran daha güçlü olduğu görülmektedir. Bunun ana nedeninin ise hem Brazilian çekme dayanımı hem de nokta yükleme dayanımı deney sisteminde yükleme her ne kadar düşey yönde olsa da kayacın yatay yöndeki çekmeye maruz kalarak kırılmasından kaynaklanmasıdır. Kırılma tokluğu deney sistemi de bu iki deney sistemine benzer biçimde düşey yönde yük uygulanmasına rağmen numune üzerinde açılmış olan çentikler yatay yönde çekmeye maruz kalarak yenilmektedir.

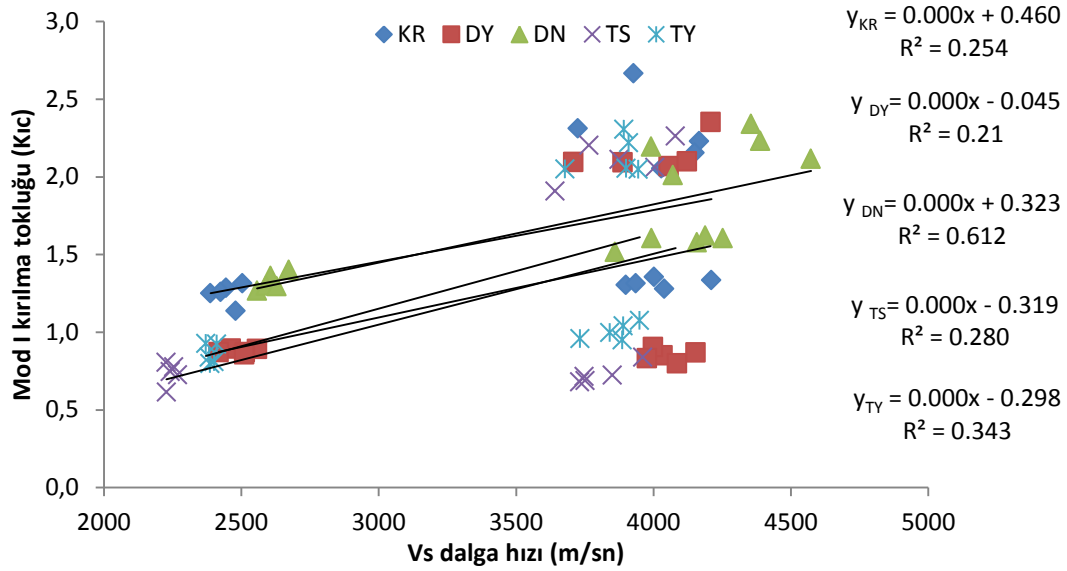


Şekil 4.34. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Schmidt çekici sertlik değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4.34. incelendiğinde farklı çevresel etmenler altında kayaçların Schmidt çekici sertliği ile kırılma tokluğu arasında  $0.45 < R^2 < 0.64$  arasında olduğu görülmektedir. Buda çalışılan kayaçlar için kırılma tokluğu ile Schmidt çekici arasındaki ilişkinin zayıf-orta dereceli olduğu anlamına gelmektedir. En iyi ilişki ise don halindeki değerlerden elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.35. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Vp dalga hızı değerleri arasındaki ilişki



Şekil 4.36. Farklı çevresel koşullarda Mod I kırılma tokluğu ile Vs dalga hız değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4.35-4.36. incelendiğinde farklı çevresel etmenler altında kayaların Vp-Vs dalga hızları ile kırılma tokluğu arasındaki ilişkinin oldukça zayıf olduğu görülmektedir. En iyi ilişki ise Vs dalga hızının don halindeki değerlerden elde edildiği görülmektedir.

#### 4.1.4.2. Çoklu regresyon sonuçları

Kayaçların farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu değerleri ile bazı fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizi ile SPSS 20 paket programı kullanılarak modellenmiştir. Basit regresyon analizleri sonucunda yüksek korelasyon elde edilen ve anlamlı parametreler olan mekanik testler (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı) öncelikli olarak dikkate alınarak diğer tahribatsız test yöntemleri (Vp-Vs dalga hızı ve Schmidt çekici sertliği) ile desteklenerek en az 2 en fazla 3 bağımsız değişkenden oluşan çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir. Çalışmada, stepwise metodu kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler, bağımlı değişkeni tahmin etmek için aşamalı olarak modele eklenmiştir. Elde edilen modellerin geçerliliği t testi ve p değeri (sig.) gözönünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Farklı çevresel koşullar için oluşturulan eşitliklerin model özeti ve ANOVA değerleri Çizelge 4.72’de, modellerin matematiksel gösterimi ise Çizelge 4.73’te verilmiştir. Kırılma tokluğunu tahmini için oluşturulan basit regresyon modellerine ait R<sup>2</sup> değerlerinin, çoklu regresyon

modelleri ile iyileştirilmesi gerçekleştirilmiş ve iyileştirme oranları Çizelge 4.74'te verilmiştir.

Çizelge 4.72. ANOVA ve model özeti

Çevresel ortam	Eşitlik No	F	$\rho$ (Sig.)	R	R <sup>2</sup>
KR	1	174.301	0.000	0.983	0.961
	2	147.596	0.000	0.980	0.954
	3	193.990	0.000	0.985	0.965
DY	4	133.554	0.000	0.978	0.950
	5	591.665	0.000	0.995	0.988
DN	6	181.958	0.000	0.984	0.963
TS	7	174.836	0.000	0.983	0.961
	8	176.304	0.000	0.990	0.974
TY	9	228.531	0.000	0.978	0.970
	10	1705.125	0.000	0.998	0.996

Çizelge 4.73. Farklı çevresel ortamlar için üretilmiş çoklu regresyon modelleri

Eşitlik No	Denklem
1	K <sub>1c</sub> : $-0.271 + 0.398BT - 0.207VS$
2	K <sub>1c</sub> : $1.454 + 0.026UCS - 0.646VS$
3	K <sub>1c</sub> : $1.229 + 0.273PL - 0.392VS$
4	K <sub>1c</sub> : $0.980 + 0.023UCS - 0.456VS$
5	K <sub>1c</sub> : $0.565 + 0.273PL - 0.221VS$
6	K <sub>1c</sub> : $1.253 + 0.019UCS - 0.249VP$
7	K <sub>1c</sub> : $0.448 + 0.026UCS - 0.265VP$
8	K <sub>1c</sub> : $0.081 + 0.313PL - 1.041VP + 1.390VS$
9	K <sub>1c</sub> : $0.706 + 0.023UCS - 0.255VP$
10	K <sub>1c</sub> : $0.422 + 0.316PL - 0.262VS$

Çizelge 4.74. R<sup>2</sup> iyileştirme yüzdeleri

Eşitlik No	Basit Regresyon		Çoklu Regresyon		İyileştirme (%)
	Değişken	R <sup>2</sup>	Değişkenler	R <sup>2</sup>	
1	BT	0.915	BT, VS	0.961	5.03
2	UCS	0.727	UCS, VS	0.954	31.22
3	PL	0.837	PL, VS	0.965	15.29
4	UCS	0.829	UCS, VS	0.950	14.60
5	PL	0.947	PL, VS	0.988	4.33
6	UCS	0.844	UCS, VP	0.963	14.10
7	UCS	0.878	UCS, VP	0.961	9.45
8	PL	0.911	PL, VP, VS	0.974	6.92
9	UCS	0.885	UCS, VP	0.970	9.60
10	PL	0.951	PL, VS	0.996	4.73

#### 4.1.4.3. Yapay sinir ağları sonuçları

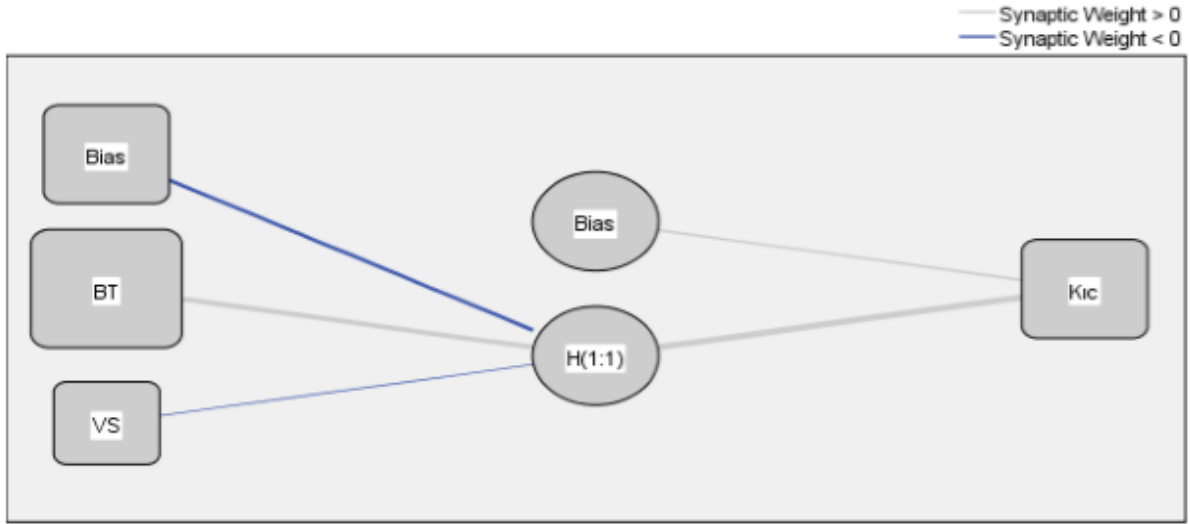
Kayaçların farklı çevresel koşullar altında kırılma tokluğu değerleri ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişki Yapay Sinir Ağları (YSA) metodu ile modellenmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler kullanarak SPSS 20 paket programı kullanılarak YSA testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, günümüzde en çok bilinen ve yaygın biçimde kullanılan yapay sinir ağı türü olan Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) yöntemi kullanılmıştır. ÇKA, girdi katmanı, bir veya birden fazla gizli katman ve çıktı katmanından oluşan ileri beslemeli bir sinir ağıdır. Bir katmandaki her nöron, bir sonraki katmanın bütün nöronları ile bağlantılıdır ve girdi katmanından çıktı katmanına doğru ileri yönlü bir iletişim mevcuttur. Eğitim esnasında yalnız girdiler değil aynı zamanda çıktı değerleri de eğitilmektedir. YSA'da kullanılan öğrenme işlevi algoritmaya göre beklenen çıktı değerine ait hatanın minimum değere ulaşmaya kadar ağırlıklar güncellenmesi ile oluşmaktadır.

Burada, çoklu regresyondan elde edilen 10 modele ait bağımsız (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, P ve S dalga hızları) ve bağımlı değişkenler (kırılma tokluğu) kullanılarak yapay sinir ağları oluşturulmuştur. Model, en az 2 en fazla 3 bağımsız girdi değişkenine sahip olup tek çıktı değişkeni

bulunmaktadır. Kullanılan YSA modelleri için veri seti eğitim ve test veri seti olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Bu ayırım ise SPSS 20 paket programına göre otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonucunda en iyi performansa sahip YSA modellerinin gizli katman aktivasyon fonksiyonu için hiperbolik tanjant ve çıktı katmanı için ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Gizli katmana ait aktivasyon fonksiyonu için tercih edilen hiperbolik tanjant fonksiyonu, sigmoid fonksiyonuna benzer olarak sürekli ve türevi alınabilen bir fonksiyondur. Sigmoid fonksiyonu 0 ile 1 arasında değer üretirken hiperbolik tanjant fonksiyonu -1 ile 1 arasında değerler üretmektedir. Çıktı katmana ait aktivasyon fonksiyonu için tercih edilen lineer (doğrusal) fonksiyonu, belirli bir sabit değer ile toplam fonksiyonundan elde edilen değer çarpılarak hücrenin çıktısını belirler. Çoklu regresyondan elde edilen en anlamlı bağımsız değişkenleri kullanarak elde edilen yapay sinir ağları Şekil 4.37-4.46'da ve hatanın minimum değere ulaşmaya kadar güncellenen ağırlıkları Çizelge 4.75-4.84'te verilmiştir. Modelleri genel olarak incelediğimizde mekanik testlerin (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı) modeli açıklamada yıkıcı olmayan testlere (P-S dalga hızları) nazaran daha büyük katkı sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.75. 1 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağırlıkları

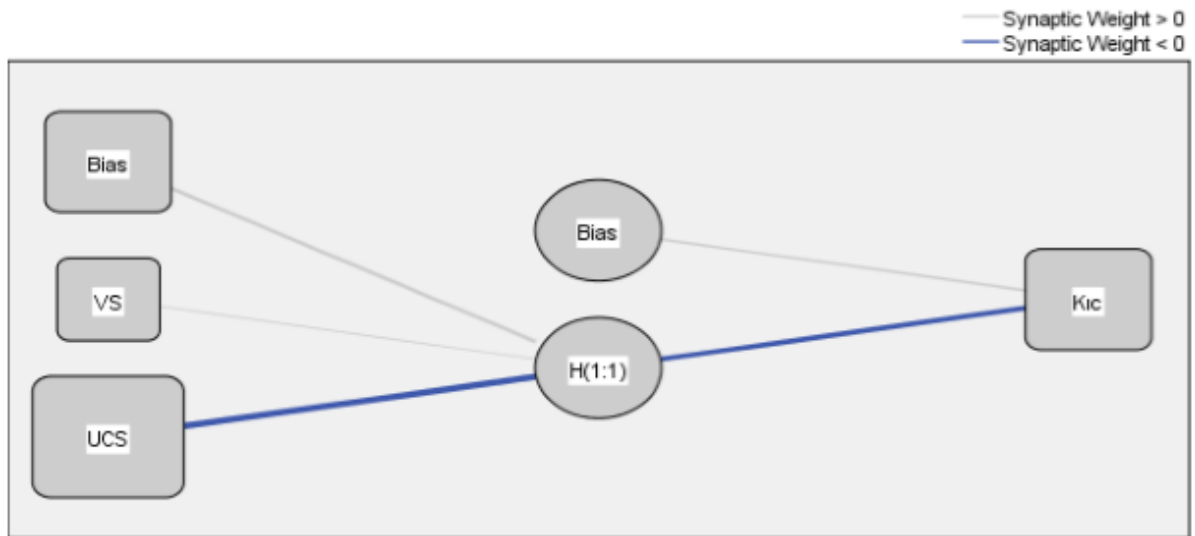
		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	-,794	
	BT	1,082	
	VS	-,197	
Gizli Katman	(Hata)		,694
	H(1:1)		1,444



Şekil 4.37. 1 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.76. 2 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağıın ağırlıkları

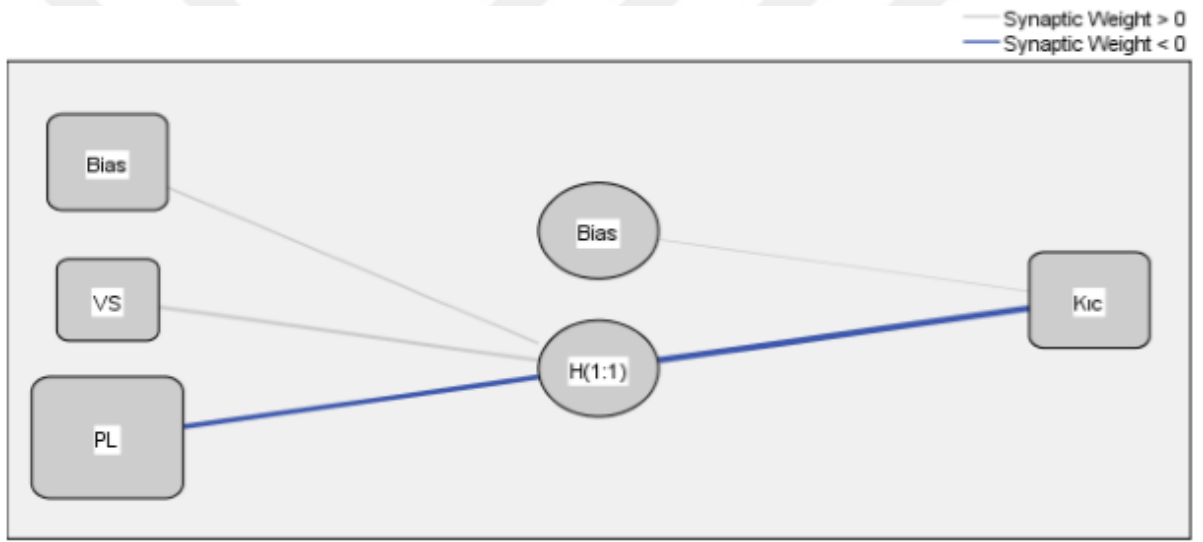
		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	Kic
Girdi Katmanı	(Hata)	1,319	
	VS	,080	
	UCS	-1,596	
Gizli Katman	(Hata)		,689
	H(1:1)		-1,514



Şekil 4.38. 2 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.77. 3 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	,318	
	VS	,361	
	PL	-1,113	
Gizli Katman	(Hata)		,268
	H(1:1)		-1,261

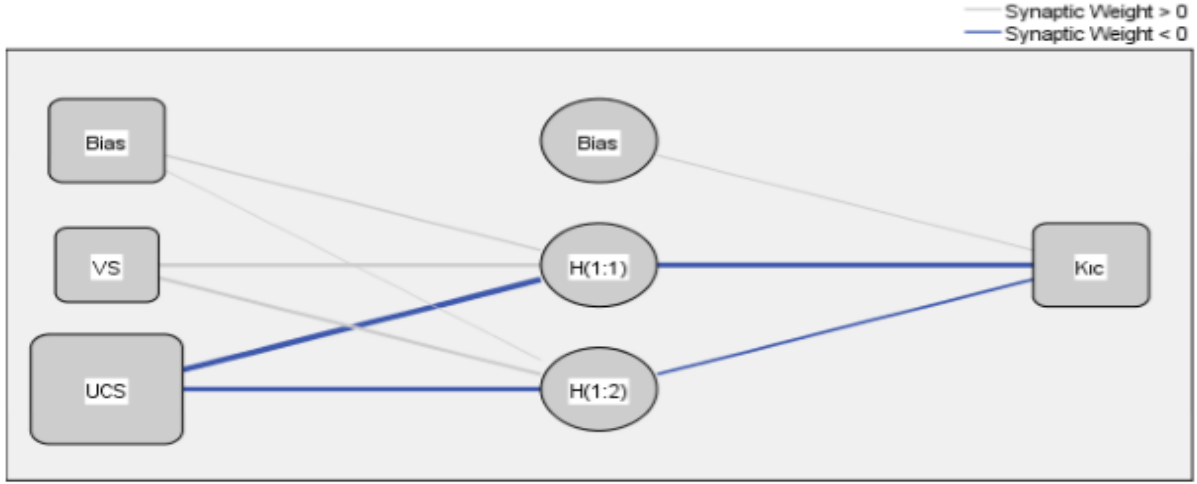


Şekil 4.39. 3 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.78. 4 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

		Gizli Katman		Çıktı Katman
		H(1:1)	H(1:2)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	,423	,028	
	VS	,657	,588	
	UCS	-1,632	-,848	
Gizli Katman	(Hata)			,401
	H(1:1)			-1,023
	H(1:2)			-,547

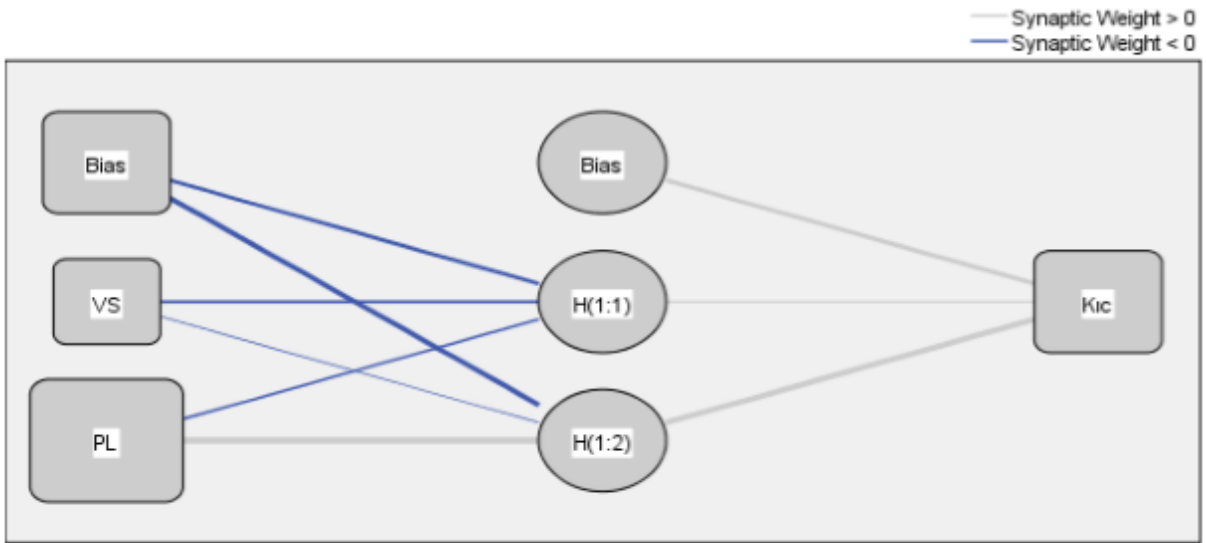




Şekil 4.40. 4 nolu eşitlik model için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.79. 5 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağıın ağırlıkları

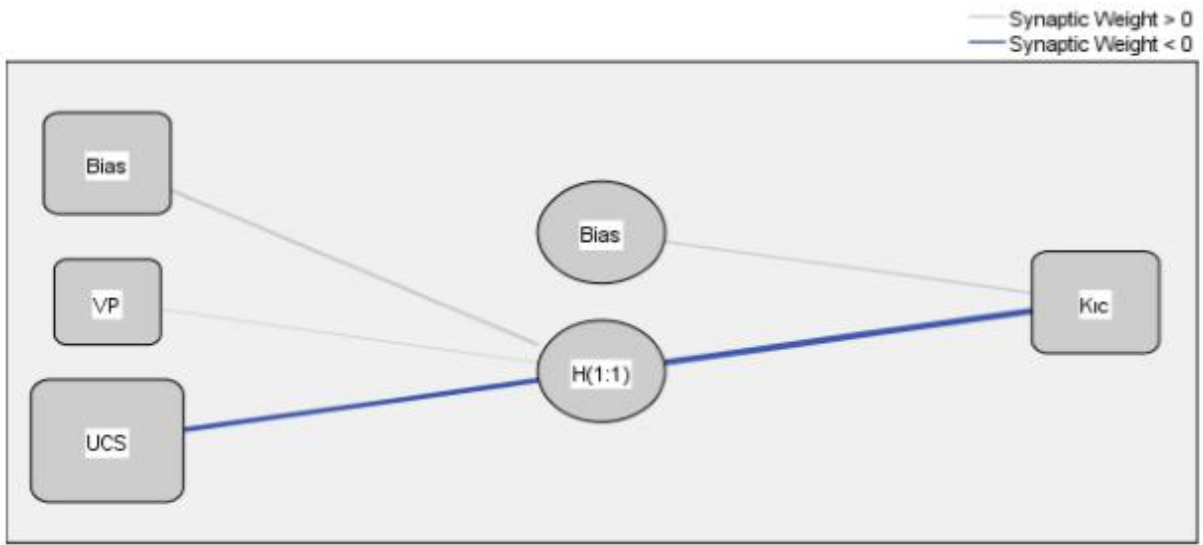
		Gizli Katman		Çıktı Katman
		H(1:1)	H(1:2)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	-,400	-,546	
	VS	-,385	-,101	
	PL	-,291	1,323	
Gizli Katman	(Hata)			,456
	H(1:1)			,158
	H(1:2)			1,271



Şekil 4.41. 5 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.80. 6 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

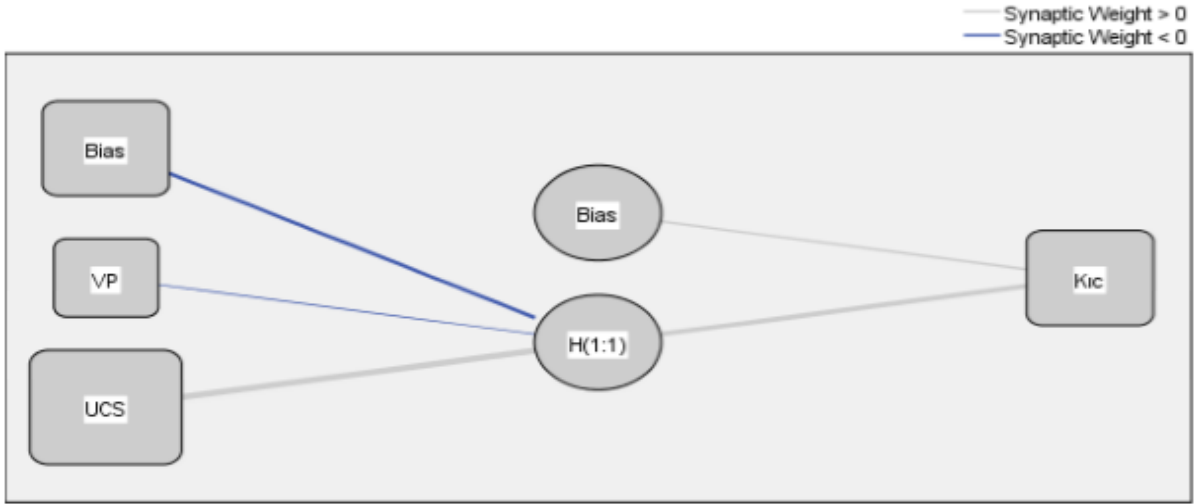
		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	K1c
Girdi Katmanı	(Hata)	,589	
	VP	,146	
	UCS	-1,324	
Gizli Katman	(Hata)		,364
	H(1:1)		-1,380



Şekil 4.42. 6 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.81. 7 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	K1c
Girdi Katmanı	(Hata)	-1,020	
	VP	-,213	
	UCS	1,425	
Gizli Katman	(Hata)		,638
	H(1:1)		1,322



Şekil 4.43. 7 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.82. 8 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

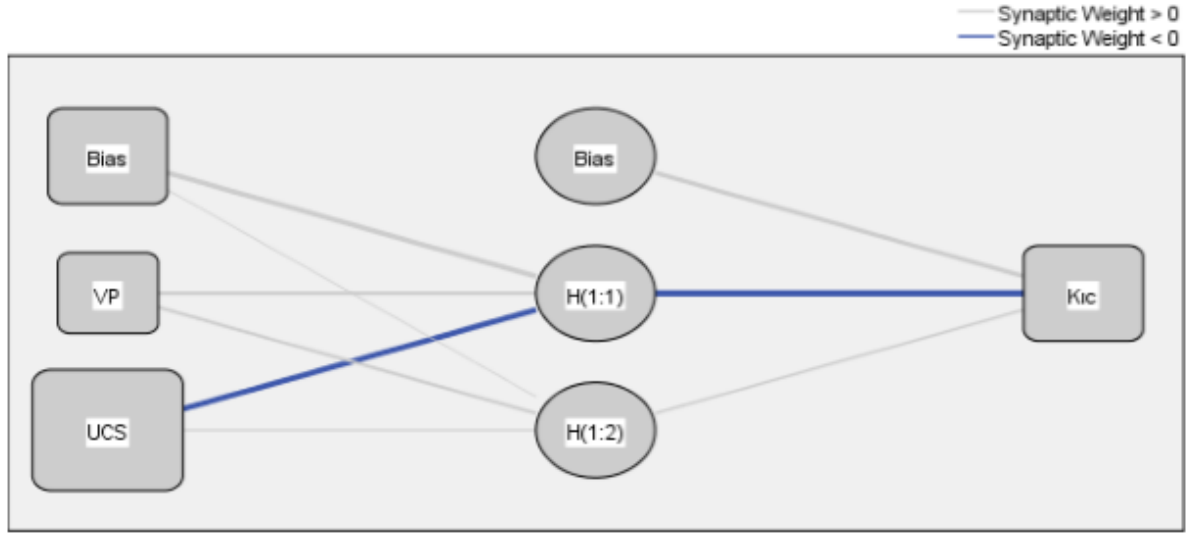
		Gizli Katman	Çıktı Katman
		H(1:1)	Kic
Girdi Katmanı	(Hata)	,755	
	VP	,486	
	PL	-1,724	
	VS	-,321	
Gizli Katman	(Hata)		,509
	H(1:1)		-1,255



Şekil 4.44. 8 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.83. 9 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

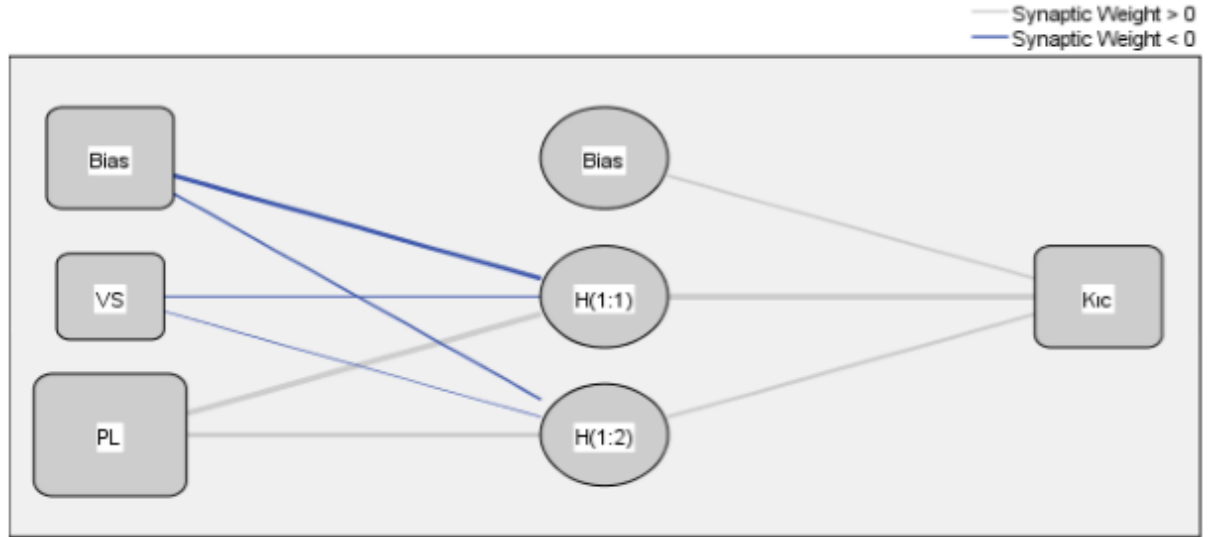
		Gizli Katman		Çıktı Katman
		H(1:1)	H(1:2)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	1,079	,011	
	VP	,694	,369	
	UCS	-1,384	,193	
Gizli Katman	(Hata)			1,007
	H(1:1)			-1,570
	H(1:2)			,307



Şekil 4.45. 9 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

Çizelge 4.84. 10 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı ağırlıkları

		Gizli Katman		Çıktı Katman
		H(1:1)	H(1:2)	Kıc
Girdi Katmanı	(Hata)	-,614	-,268	
	VS	-,237	-,037	
	PL	,992	,728	
Gizli Katman	(Hata)			,528
	H(1:1)			1,044
	H(1:2)			,564



Şekil 4.46. 10 nolu eşitlik için elde edilen sinir ağı

#### 4.1.4.4. Modellerin tahmin performansları

YSA ve çoklu regresyon yöntemleri ile elde edilen modellerin performans sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), ortalama hatanın karekökü (RMSE) ve belirleme (anlamlılık) katsayısı ( $R^2$ ) değerleri hesaplanmıştır. Yöntemlerin tahmin performansları incelendiğinde hem çoklu regresyon modellerinin hem de yapay sinir ağlarının kayaçların kırılma tokluğu değerlerinin tahmin edilmesinde oldukça başarılı olduğu görülmektedir (Çizelge 4.85).

Çizelge 4.85. Modellerin performans sonuçları

Eşitlik No	MAE		MAPE		RMSE		R2	
	REG	YSA	REG	YSA	REG	YSA	REG	YSA
1	0,07	0,07	4,51	3,72	0,09	0,09	0,96	0,97
2	0,08	0,08	4,64	4,69	0,10	0,10	0,95	0,96
3	0,07	0,08	4,23	4,40	0,08	0,12	0,97	0,96
4	0,09	0,05	6,69	4,01	0,13	0,07	0,95	0,99
5	0,04	0,03	3,13	1,99	0,06	0,05	0,99	0,99
6	0,05	0,06	3,11	3,47	0,06	0,07	0,96	0,96
7	0,10	0,07	9,01	7,88	0,12	0,08	0,96	0,98
8	0,08	0,07	7,62	7,88	0,09	0,08	0,97	0,98
9	0,08	0,04	7,23	3,46	0,09	0,05	0,97	0,99
10	0,03	0,03	2,48	3,10	0,03	0,04	0,99	0,99

MAPE değerlerinin %10'un altında hesaplanan modelleri "çok iyi", %10 ile %20 arasında hesaplanan modelleri "iyi", %20 ile %50 arasında hesaplanan modelleri "kabul edilebilir" %50'nin üzerinde hesaplanan modelleri ise "yanlış ve hatalı" olarak sınıflandırılmaktadır. MAE değerlerinin %2-5 arasında olması modelin oldukça anlamlı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde RMSE değerlerinin sıfıra yakın olması modelin çok güçlü olduğu anlamına gelmektedir. Regresyon analizinde ise  $R^2$  değerlerinin 1'e yakınlığı modelin geçerli olduğunu 0'a yakınlığı ise modelin yanlış veya ilişkisiz olduğunu göstermektedir. MAPE, MAE ve  $R^2$  değerleri incelediğinde oluşturulan modellerin çok güçlü olduğu açıkça görölmektedir. Modellerin performans sonuçları genel olarak göz önüne alındığında oluşturulan YSA ve regresyon modellerinin "çok iyi" ve "yüksek doğruluk" derecesine sahip modeller olduğu söylenebilmektedir.



## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Çalışma sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Yazıhan Bazalt örneğinin doğal birim hacim ağırlığı  $27.268 \text{ kN/m}^3$ , Malatya Bej örneğinin doğal birim hacim ağırlığı  $26.326 \text{ kN/m}^3$  ve Afyon Beyaz örneğinin doğal birim hacim ağırlığı  $26.384 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir.
2. Ağırlıkça su emme değeri: Yazıhan Bazalt örneğinde % 0.226, Malatya Bej örneğinde % 0.091, Afyon Beyaz örneğinde % 0.106 iken hacimce su emme değeri Yazıhan Bazalt örneğinde % 0.627, Malatya Bej örneğinde % 0.245, Afyon Beyaz örneğinde % 0.286 olarak belirlenmiştir. Magmatik kökenli kayalar oluşum yerlerine (derinlik, dammar ve yüzey) göre porozite değerlerinde farklılık göstermektedir. Yazıhan Bazalt örneği gibi yüzey magmatik kayalarda magma daha hızlı soğuduğu için yapılarında daha fazla boşluk bulundurmaktadırlar.
3. Özgül ağırlık değerleri: Yazıhan Bazalt örneğinde 2.897, Malatya Bej örneğinde 2.773 ve Afyon Beyaz örneğinde 2.755 olarak saptanmıştır.
4. Doluluk oranı değerleri: Yazıhan Bazalt örneğinde % 99.373, Malatya Bej örneğinde % 99.755 ve Afyon Beyaz örneğinde % 99.714 olarak saptanmıştır.
5. Kılcal su emme (kapilerite) değerleri: Yazıhan Bazalt örneğinde  $3.90 \text{ (gr.}\sqrt{sn})/\text{m}^2$ , Malatya Bej örneğinde  $1.70 \text{ (gr.}\sqrt{sn})/\text{m}^2$  ve Afyon Beyaz örneğinde  $1.49 \text{ (gr.}\sqrt{sn})/\text{m}^2$  olarak saptanmıştır. Kapiler su emme değeri yüksek olan bazaltın ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin de yüksek olduğu görülmüştür.
6. Görünür porozite değerleri: Yazıhan Bazalt örneğinde % 0.627, Malatya Bej örneğinde % 0.245, Afyon Beyaz örneğinde % 0.286 olarak elde edilmiştir.

7. XRD analizi sonucunda Afyon Beyaz ve Malatya Bej örneğinin ana bileşen olarak kalsit minerali, Yazihan Bazalt örneğinin ise Labradorit, Biyotit, Kuvars, Olivin ve montmorillonit içerdiği belirlenmiştir.

8. XRF elementel içeriği analizi sonucunda Yazihan Bazalt örneğinin bünyesinde % 45.41 oranında SiO<sub>2</sub> ve % 17.46 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Malatya Bej örneğinde ise % 58.77 CaO ve Afyon Beyaz örneğinin ise % 56.89 CaO bulunmuştur.

9. İnce kesit analizi sonucunda Yazihan Bazalt örneğinin başlıca plajiyoklas, biyotit ve olivinlerden, Malatya Bej ve Afyon Beyaz örneğinin ise kalsit mineralinden oluştuğu belirlenmiştir.

10. Kayaçların yarı dairesel eğilme deneyi sonucunda kırılma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntülerinde kırılmanın tane içi ve taneler arasında geliştiği ve bunun gevrek kırılma türünü işaret ettiği anlaşılmıştır. Tane içi kırılmanın belirteci olan klivaj düzlemleri, traşlanmış görüntüler ve nehir izleri Afyon Beyaz örneğinde net olarak görüntülenmiştir. Malatya Bej örneğinde ise taneler arası kopmalardan meydana gelen tane boşlukları görülmüştür. Yazihan Bazalt örneğinin oluşum itibarı ile bünyesinde yer alan gözenekler SEM görüntülerinde izlenmektedir.

11. Kayaçların doğal haldeki Schmidt çekici değerleri incelendiğinde, magmatik kökene sahip olan Yazihan Bazalt örneğinin Schmidt çekici sertliği 47.5 değeriyle en yüksek iken metamorfik kökene sahip olan Afyon Beyaz örneğinin 30.6 değeriyle en düşük olduğu tespit edilmiştir. ISRM 1978 sınıflamasına göre tüm çevresel koşullarda Yazihan Bazalt örneği “Sert (40-60)” kayaç grubunda yer aldığı görülmüştür. Afyon Beyaz örneğinin ise tüm çevre koşullarında “Az Sert (20-40)” kayaç grubunda olduğu tespit edilmiştir. Malatya Bej örneği kuru, don ve termal yaşlandırma koşullarında “Sert (40-60)” kayaç grubunda yer alırken doymuş ve termal şok koşullarında ise “Az Sert (20-40)” kayaç grubunda olduğu belirlenmiştir. Genel olarak bakıldığında Yazihan Bazalt örneğinin sertlik değerinin değişik çevresel koşullar altındaki değişiminin diğer iki kaya türüne nazaran daha düşük olduğu görülmüştür. Malatya Bej ve Afyon Beyaz örneğinde ise termal şok uygulaması sonrası ve doymuş halde ölçülen Schmidt çekici sertliğindeki azalmanın % 10’un üzerinde olduğu tespit edilmiştir.



12. Yapılan mekanik deneyler (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian çekme dayanımı ve yarı dairesel eğilme dayanımı) sonucunda üç kaya türünde de doygun koşullarda, termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonrası dayanımlarında azalma görülmüştür. Fakat doygun halde dondurulmuş kayacın dayanımında artış olduğu tespit edilmiştir.

13. Deere ve Miller 1966 tek eksenli basınç dayanımı sınıflamasına göre Yazıhan Bazalt örneği tüm çevresel koşullarda “Yüksek Dayanımlı (110-220 MPa)” kayaç sınıfında iken Malatya Bej örneği “Orta Dayanımlı (55-110 MPa)” kayaç sınıfında, Afyon Beyaz örneği ise donmuş halde “Orta Dayanımlı (55-110 MPa)” kayaç sınıfında yer alırken diğer çevresel etmenler altında “Düşük Dayanımlı kayaç (27-55 MPa)” sınıfında yer almıştır.

14. Magmatik kökene sahip olan Yazıhan Bazalt örneğinin çevresel koşullar altındaki tek eksenli basınç dayanımındaki değişim diğer iki kaya türüne nazaran daha düşüktür. Sedimanter kökenli kayaç olan Malatya Bej örneğinin termal şok uygulaması sonrası ve doygun haldeki tek eksenli basınç dayanımında meydana gelen azalmanın %20'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

15. Kayaçların çevresel koşullar altında tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımları kullanılarak dolaylı yoldan elde edilen makaslama parametresi olan kohezyondaki değişimler diğer fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler ile benzerlik göstermiştir. En yüksek kohezyon değeri Yazıhan Bazalt örneğinde elde edilmiştir.

16. Kayaçların nokta yükü dayanım indeksleri Bieniawski 1975'e göre sınıflandırıldığında Yazıhan Bazalt örneği tüm çevre koşulları için “Çok Yüksek Dirençli kayaç (>8 MPa)”, Malatya Bej örneği “Yüksek Dirençli kayaç (4-8 MPa)” ve Afyon Beyaz örneği ise “Orta Dirençli kayaç (2-4 MPa)” sınıfında yer almıştır.

17. Yazıhan Bazalt örneğinin çevresel koşullar altındaki nokta yükleme dayanımındaki değişiminin diğer iki kaya türüne nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir. Kayaçların en yüksek nokta yükleme dayanım kaybı termal şok uygulaması sonucunda meydana gelmiştir. Malatya Bej örneğinin termal şok uygulaması sonrası ve doygun haldeki nokta yükleme dayanımındaki değişimin %25'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

18. Örneklerin Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımları değerlendirildiğinde Yazıhan Bazalt örneğinin dayanımı en yüksek iken metamorfik kökenli Afyon Beyaz örneğinin en düşük olduğu tespit edilmiştir. Afyon Beyaz ve Malatya Bej örneğinin termal şok uygulaması sonrası ve doymuş haldeki Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımındaki değişimin %17'nin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

19. Kayaçların don halindeki Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımlarında meydana gelen yüzdesel artışın diğer mekanik dayanımlarına nazaran daha fazla olduğu görülmüştür. Buna göre kayaçların don halinde çekme dayanımlarındaki yüzdesel artış basma dayanımlarına göre daha yüksek değerlerde olduğunu göstermiştir.

20. Kayaçların Vp-Vs dalga hızlarının doymuş ve donmuş hallerde arttığı ve donmuş kayacın dalgayı daha hızlı ilettiği görülmüştür. Bu artışın ana sebebinin boşlukların içerisinde oluşan buzun ultrasonik dalganın boşlukta yayılıp geç iletmesini engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayaçların dalga iletim hızları bünyesinde bulunan gözeneklilik ile ters orantılı değiştiğinden ve termal şok ve termal yaşlandırmaya uğrayan kayaçların gözenekliliği arttığından dalga hızlarında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

21. Yarı dairesel eğilme deneyinden elde edilen yük-deformasyon grafikleri incelendiğinde kayaçların doymuş, termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonrası deformasyon miktarı ve maksimum kırılma yüklerinde düşme, don halinde ise bu değerlerde artma olduğu tespit edilmiştir. Farklı çevresel ortamlarda Yazıhan Bazalt örneğinin diğer iki kaya türüne nazaran kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi daha az oranda değişim göstermiştir.

22. Afyon Beyaz ile Malatya Bej örneklerinin termal şok ve termal yaşlandırma uygulaması sonunda kırılma tokluğundaki yüzdesel azalmanın neredeyse eşit olduğu görülmüştür. Malatya Bej örneğinin kırılma enerjisindeki yüzdesel azalma diğer iki kaya türüne nazaran daha yüksektir.

23. Tüm çevresel koşullar altında kayacın kırılması için yapılan iş (Wf) ve harcanan enerji (Gf) en yüksek Yazıhan Bazalt örneğinde elde edilmiştir. Yazıhan Bazalt örneğinin

farklı çevresel etmenler altında kırabilmesi için yapılan iş ve harcanan enerji diğer kayalara nazaran daha az farklılık göstermiştir.

24. Yapılan basit regresyon analizleri sonucunda, kayaçların farklı çevresel koşullar için kırılma tokluğu değerinin tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki belirteci ile  $R^2 > 0.70$ , nokta yükleme dayanımı ile  $R^2 > 0.83$  ve Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı ile  $R^2 > 0.91$  olarak tespit edilmiştir. Schmidt çekici sertliği ve ultrasonik dalga hızları ile daha zayıf ilişkiler elde edilmiştir.

25. Kayaçların kırılma tokluğu ile tüm fiziko-mekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme dayanımı, Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı, Schmidt çekici ve  $V_p$ - $V_s$  dalga hızı) kullanılarak geliştirilen çoklu regresyon modellerinin gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki ilişki belirteci olan  $R^2$  değerlerinin 0.97'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Buda oluşturulan modelin oldukça güçlü ve anlamlı olduğunu ifade etmektedir.

26. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı (BT), nokta yükleme dayanımı (PL), P dalga hızı (VP), S dalga hızı (VS) ve Schmidt çekici sertlik (SH) olmak üzere 6 girdi değişken ile kırılma tokluğu ( $K_{1c}$ ) tahmini için oluşturulan YSA modellerinin ilişki belirteci olan  $R^2$  değerlerinin 0.97'den büyük olduğu tespit edilmiştir.

27. Hem çoklu regresyon analizi hem de YSA ile oluşturulan modellerin performanslarını değerlendirmek için yapılan RMSE, MAE ve MAPE analizleri sonucunda elde edilen değerler %10'un altındadır. Buda modellerinin "yüksek doğruluk" derecesine sahip olduğunu göstermektedir.

28. Kayaçların tüm çevresel koşullar altındaki kırılma tokluğu değerleri ile diğer fiziko-mekanik özellikler arasında en iyi ilişki, kayaçların dayanım özelliklerinden biri olan Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı arasında elde edilmiştir. Kırılma tokluğu deneyinde çatlak ilerlemesinin kayaca uygulanan çekme gerilmeleri altında meydana gelmesinden kaynaklı olarak en güçlü ilişki benzer deney sistemi olan Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımında elde edilmiştir. Bu noktadan yola çıkarak Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımının kolay, ucuz ve pratik olması nedeniyle kayaçların kırılma

tokluklarının dolaylı olarak güvenilir ve basit bir şekilde tahmin edilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

29. Brazilian (dolaylı yoldan çekme) dayanımı deneyinden sonra en iyi ilişki nokta yükleme dayanımı değerleri arasında kurulmuştur. Nokta yükleme dayanımı deneyinde de konik uçlar arasına yerleştirilen numuneye uygulanan yük düşey yönde olsa da numune kırılması yatay yöndeki çekme gerilmelerinden kaynaklı yenilmektedir. Bu nedenle nokta yükleme dayanımı deneyinde kırılma tokluğunun dolaylı yoldan tahmin edilmesinde güvenle kullanılabilir.

## 5.2. Öneriler

Yer bilimleri ile ilgili çalışmalarda kayaçların mühendislik özelliklerinin saptanması yer altı ve yerüstü yapılarının duraylılığının sağlanmasında doğrudan etkilidir. Mühendislik yapılarının inşa edildiği kaya ortamlarının ilk olarak jeolojik yapı unsurlarının ortaya konması, ikinci adım olarak da kayaçların indeks ve dayanım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kayaçların indeks ve dayanım parametrelerini hem laboratuvar hem de arazi ortamında saptamak mümkündür. Fakat laboratuvar ortamında elde edilen bu parametreler kayaçların arazide maruz kaldığı çevresel koşullardaki değişimleri kapsamamaktadır. Dolayısıyla çevresel etmenlerin kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine olan etkisi göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışmada, Doygun ve don koşullarının, termal şok ve termal yaşlandırma uygulamalarının kayacın fiziko-mekanik özelliklerine ve kırılma mekaniğine etkileri incelenmiştir. Termal şok, termal yaşlandırma uygulamalarının ve doyunluğun kayacın dayanımı üzerinde negatif etki yarattığı tespit edilmiştir. Çevre sıcaklığının hızla değiştiği yerlerde, kayaçların termal şok ve termal yaşlandırma etkisi altındaki dayanım değerlerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi ve kaya mühendisliği ile ilgili çalışmalarda en düşük kırılma tokluğu değerine ait tasarım yapılması oldukça önemlidir. Ayrıca, ülkemizin doğu bölgelerinde kış ayları 5-6 ay sürmekte ve kış aylarının büyük bir kısmı sıfırın altındaki sıcaklıklarda geçmektedir. Yerbilimleri ile ilgili proje çalışmalarında sıcaklıktaki bu azalmadan kaynaklı don etkisinin kayaçların davranışlarına ve duraylılıklarına olan etkisini anlamak oldukça önemlidir. Donmuş kayacın dayanım değerinin tespiti kazı çalışmaları için ekipman-donanım seçiminde göz ardı edilmemesi

gereken bir parametredir. Aksi takdirde ekipmanlarda erken yıpranma ve iş tamamlama sürelerinde gecikmeler kaçınılmaz olacaktır. Yapılan bu çalışmadan faydalanarak; yol, baraj, tünel, şev stabilize analizleri, galeri açma, kazı ekipman seçimi, yer altı atık ve doğalgaz depolama, jeotermal enerji çıkarımı, patlatma tasarımı, deprem analizi gibi birçok yerbilimleri ile ilgili mühendislik çalışmalarında kayaçların çevresel etmenlere karşın nasıl bir dayanım özelliği gösterdiğini belirleme imkanı doğmaktadır. Katı malzemeler farklı kırılma mod türlerine sahiptir. Fakat bunların en tehlikelisi, aniden gerçekleşmesinden dolayı mod I kırılma türüdür. Özellikle madencilik çalışmalarında meydana gelen galeri çökmeleri, kaya kopmaları mod I kırılma türüne girmektedir. Dolayısıyla bu kırılma modundaki dayanımın belirlenmesi iş sağlığı ve güvenliği açısından da oldukça önemlidir. Bu çalışmada belirli çevresel faktörler ile belirli sayıda kayaçlar ele alınmıştır.

Çalışmada kırılma tokluğu değerleri ile en iyi ilişki olan Brazilian çekme dayanımı ve nokta yükleme dayanımı değerleri arasında kurulmuştur. Bu iki deney yöntemi ile daha fazla kayaç grubu çalışarak kırılma tokluğunu tahminleyecek daha güvenilir modeller geliştirilebilir. Bu çalışmanın daha fazla sayıda kayaç ve çevresel ortamlarla genişletilmesi önerilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Agah, U.** (1991). *Kırılma Mekaniğine Giriş*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, 21 s.
- Agustawijaya, D.S.** (2007). The uniaxial compressive strength of soft rock, *Civil Engineering Dimension*, 9, 9-14.
- Ahmadi, M. and Taleghani, A.D.** (2016). Impact of thermally reactivated micro-natural fractures on well productivity in shale reservoirs, a numerical study, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 583-592.
- Ajalloian R. and Karimzadeh L.** (2003). Geotechnical rock mass evaluation of Givi dam site (pp:7-10), *10<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics*. September 8-12, South Africa.
- Akram M. and Bakar M.Z.A.** (2007). Correlation between uniaxial compressive strength and point load index for salt-range rocks, *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1, 1-8.
- Aliha, M.R.M. and Ayatollahi, M.R.** (2013). Two-parameter fracture analysis of SCB rock specimen under mixed mode loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 103, 115–123.
- Aliha, M.R.M. and Ayatollahi, M.R.** (2014). Rock fracture toughness study using cracked chevron notched Brazilian disc specimen under pure modes I and II loading – A statistical approach, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 69, 17–25.
- Aliha, M.R.M., Linul, E., Bahmani, A. and Marsavina, L.** (2018). Experimental and theoretical fracture toughness investigation of PUR foams under mixed mode I+III loading, *Polymer Testing*, 67, 75–83.
- Altındağ, R. ve Güney, A.** (2006). ISRM Suggested Method for determining the Shore Hardness value for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 19–22.
- Amrollahi, H., Baghbanan, A. and Hashemolhosseini, H.** (2011). Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I–II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 1123–1134.
- Anderson, T.Y.** (1991). *Fracture mechanics*. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc
- Aran, A.** (1981). *Kırılma Mekaniğine Giriş*, Tubitak Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, 1-27 s.

- ASTM** (2001). *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*, ASTM Stand, 04.09 (D 5873- 00).
- Atkinson, B.K.** (1987). *Fracture Mechanics of Rock*, Academic Press, London.
- Atkinson, R.H.** (1993). Hardness tests for rock characterization, *Comprehensive Rock Engineering* (pp:105-117), {edt. J.A. Hudson), Vol. 3, Chapter 5.
- Ayatollahi, M.R. and Akbardoost, J.** (2012). Size effects on fracture toughness of quasi-brittle materials – A new approach, *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 89–100.
- Backers, T.** (2004). *Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading*, PhD. Doctoral Thesis, University of Potsdam, Germany.
- Backers, T., Fardin, N., Dresen, G. and Stephansson O.J.** (2003). Effect of loading rate on Mode I fracture toughness, roughness and micromechanics of sandstone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Technical Note*, 40, 425–433.
- Barefield, E. and Shakoor, A.** (2006). The effect of degree of saturation on the unconfined compressive strength of selected sandstones (pp:606), *10<sup>th</sup> IAEG International Congress*, September 6-10, United Kingdom.
- Bearman, R.A., Pine, R.J., and Wills, B.A.** (1989). Use of Fracture Toughness Testing in Characterizing the Comminution Potential of Rock (pp:161-170). *Proceedings of MMIJ/IMM Joint Symposium*, August 20-25, Kyoto.
- Berčáková, A., Melichar, R., Obara, Y., Ptáček, J. and Souček, K.** (2017). Evaluation of Anisotropy of Fracture Toughness in Brittle Rock, *Migmatized Gneiss, Procedia Engineering*, 191, 900–907.
- Bertin, E.P.** (1975). Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis, *New York Handbook of Synchrotron Radiation*, 730, 45-100.
- Bhvani, S. and Goel R.K.** (2011). Engineering rock mass classification, *Tunelling Foundations and Landslide*, 3, 13-19.
- Bieniawski, Z.T.** (1975). The Point-Load Test in Geotechnical Practice, *Engineering Geology*, 9 (1), 1-11.
- Bilgin, N., Phillips, H.R. ve Yavuz, N.** (1989). Kömür Damarlarının Kazılabilirlik yönünden Sınırlandırılması ve ELİ Darkalc Ocağında Sabanlı Ayak Uygulaması Örneği (s. 31-53), *Türkiye 8. Kömür Kongresi*, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, Zonguldak.

- Brouwer, P.** (2003). Theory of XRF. Panalytical B.V., Edition Ten Product Catalog. Canberra Endustries. *Inc. Connecticut*, USA, Netherlands.
- Büyüksağış, I.S. and Gökten, R.M.** (2007). The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock, *International Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 299-307.
- Carneiro F. and Barcellos A.** (1953). Resistance a la traction des betons, *Bull RILEM*. 13, 97–108.
- Chang, S. H., Lee, C. I., & Jeon, S.** (2002). Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens, *Engineering Geology*, 66(1-2), 79-97.
- Chen, C.H., Chen, C.S. and Wu, J.H.** (2008). Fracture toughness analysis on cracked ring disks of anisotropic rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(4), 539–62.
- Chong, K.P. and Kuruppu, M.D.** (1984). New Specimen for Fracture Toughness Determination of Rock and Other Material, *International Journal of Fracture*, 26, 59–62.
- Claessona, J. and Bohloli, B.** (2002). Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39, 991–1004.
- D’Orazio, M.** (2014). Stefano Lenci, Lorenzo Graziani, Relationship between fracture toughness and porosity of clay brick panels used in ventilated façades: Initial investigation, *Engineering Fracture Mechanics*, 116, 108–121.
- Dai, F., Wei, M.D., Xu, N.W., Zhao, T. and Xu, Y.** (2015). Numerical investigation of the progressive fracture mechanisms of four ISRM-suggested specimens for determining the mode I fracture toughness of rocks, *Computers and Geotechnics*, 69, 424–441.
- Dai, F., Xia, K., Zheng, H. and Wang, Y.X.** (2011). Determination of dynamic rock Mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 2633–2644.
- Deere, D.U. and Miller, R.P.** (1966). Classification and index properties of intact rock, Technical Report AFWL-TR-65-116, AF Special Weapons Center, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- Deere, D.U. and Miller, R.P.** (1966). Engineering classifications and index properties of intact rock, Tech. Report No. AFWL-TR 65-116, University of Illinois.



- Dehghan, S, Sattari, G. Chehreh, Chelgani, S. and Alliabadi, M.A.** (2009). Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural Networks, *Mining Science and Technology*, 20, 41–46.
- Dong, W., Wu, Z., Zhou, X. and Wang, N.** (2017). Gediminas Kastiukas, An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique, *Engineering Fracture Mechanics*, 171, 50–63.
- Durmuş, B., Yurtkoru, E.S. ve Çinko, M.** (2011). *Sosyal Bilimlerde SPSS'le Veri Analizi*. Beta Yayıncılık, 4. Baskı, İstanbul. 154 s.
- Erarslan, N.** (2016). Microstructural investigation of subcritical crack propagation and Fracture Process Zone (FPZ) by the reduction of rock fracture toughness under cyclic loading, *Engineering Geology*, 208, 181–190.
- Erarslan, N. and Williams, D.J.** (2012). The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 56, 15–26.
- Ergüler, Z.A.** (2007). *Su içeriğinin kil içeren kayaların mühendislik davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Eryürek, B.** (1993). *Hasar Analizi*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 171 s.
- Fahy, M.P. and Guccione, M.J.** (1979). Estimating strength of sandstone using petrography thin-section data, *Bulletin of Association of Engineering Geology*, 16, 467-485.
- Fausett, L.** (1994). *Fundamentals of Neural Networks: Architecture, Algoritma and Applications*. New Jersey: Printice Hall.
- Felekoğlu, B. ve Türkel, S.** (2004). Yükleme hızının beton basınç dayanıma ve elastisite modülüne etkisi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (1), 65-75.
- Feng, G., Kang, Y., Chen, F., Liu, Y.W. and Wang, X.C.** (2018). The influence of temperatures on mixed-mode (I + II) and mode-II fracture toughness of sandstone, *Engineering Fracture Mechanics*, 189, 51–63.
- Folk, R.L.** (1959). Practical petrographic classification of limestone, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*. 43, 1-38.

- Fowell, R.J. and McFeat-Smith, I.** (1976). Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine, *Proceedings, symposium on tunnelling 76*, London.
- Gao, G., Yao, W., Xia, K. and Li, Z.** (2015). Investigation of the rate dependence of fracture propagation in rocks using digital image correlation (DIC) method, *Engineering Fracture Mechanics*, 138, 146–155.
- Göktan, R.M. Ayday, C.** (1993). A suggested improvement to the schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanics Abstract*, 30(3), 321- 322.
- Griffith, A.A.** (1920). The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 221, 163-197.
- Haeri, H., Sarfarazi, V., Yazdani, M., Shemirani, A.B. and Hedayat, A.** (2018). Experimental and numerical investigation of the center-cracked horseshoe disk method for determining the mode I fracture toughness of rock-like material, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 173–185.
- Hale, P.A. and Shakoor, A.** (2003). A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones, *Environmental & Engineering Geoscience*, 9, 117–130.
- Hall, K. and Thorn, C.E.** (2014). Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products, *Geomorphology*, 206, 1–13.
- Heidari, M., Momeni, A.A. and Naseri, F.** (2013). New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters, *Engineering Geology*, 166, 65–73.
- Hoek E. and Brown E.T.** (1997). Practical estimates of rock mass strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Hosseini, M. and Khodayari, A.R.** (2018). Effects of temperature and confining pressure on mode II fracture toughness of rocks (Case study: Lushan Sandstone), *Journal of Mining & Environmet*, 9(2), 379-391.
- Howarth, D.F. and Rowlands J.C.** (1986). Development of an index to quantify rock texture for assesment of intact rock properties, *Geotechnical Testing Journal*, 9(4), 169-179.

- Hua, W., Dong, S. and Li, Y., Wang, Q.** (2016). Effect of cyclic wetting and drying on the pure mode II fracture toughness of sandstone, *Engineering Fracture Mechanics*, 153, 143–150.
- Hua, W., Dong, S. Peng, F., Li, K. and Wang, Q.** (2017). Experimental investigation on the effect of wetting-drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 93, 242–249.
- Huang, B., Shu, X. and Tang, Y.** (2005). Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures, Geo-Frontiers 2005. *Advances in Pavement Engineering*, 130, 155-169.
- Hucka, V.** (1965). A rapid method for determining the strength of rocks in situ, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 127-134.
- Inada, Y. and Yagi, N.** (1980). Mechanical characteristics of rocks at low temperature, *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 29, 1221–1227.
- ISRM** (1978a). Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstract*, 15, 89-97.
- ISRM** (1978b). Suggested Methods For Determining The Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract*, 16, 135-140.
- ISRM** (1978c). Suggested methods for determining sound velocity, *International Journal Of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstract*, 15, 53-58.
- ISRM** (1981). *ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring*. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, pp:211.
- ISRM** (1985). Suggested methods for determining the point load strength, *International Journal Of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstract*, 22, 51-60.
- Jabbar, M.A.** (2011). Correlations of point load index and pulse velocity with the uniaxial compressive strength for rocks, *Journal of Engineering*, 4, 992-1006.
- James, G.** (2003). Fracture toughness based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers, dissertation

submitted to the faculty of the virginia polytechnic institute and state University, PhD. Doctoral Thesis, Blacksburg.

- Jeong, S.S., Nakamura, K., Yoshioka, S., Obara, Y. and Kataoka, M.** (2017). Fracture toughness of granite measured using micro to macro scale specimens, *Procedia Engineering*, 191, 761–767.
- Kahraman, S.** (2001a). A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 729–733.
- Kahraman, S.** (2001b). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, 981–994.
- Karakul, H. and Ulusay R.** (2012). Kayaların dayanım özelliklerinin farklı doygunluk koşullarında P-dalga hızından kestirimi ve P-dalga hızının fiziksel özelliklere olan duyarlılığı, *Yer Bilimleri*, 33(3), 239-268.
- Karaman E. ve Kibici, Y.** (2013). *Temel Jeoloji Prensipleri*, (3. Baskı), Ankara.
- Karaman K. and Kesimal A.** (2012). Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi, *Madencilik*, 51(4), 3-14.
- Karaman, K. and Kesimal, A.,** (2013). Evaluation of the relationship between uniaxial compressive strength and ultrasonic pulse velocity of rocks, *Journal of Underground Resources*, 4(2), 9-17.
- Karpuz C., Hindistan M.A.** (2008). *Kaya Mekaniği İlkeleri Uygulamaları*, Ankara. 346s.
- Kataokaa, M., Mahdavi, E., Funatsu, T., Takehara, T., Obara, Y., Fukui, K. and Hashiba, K.** (2017). Estimation of mode I fracture toughness of rock by semi-circular bend test under confining pressure condition, *Procedia Engineering*, 191, 886 – 893.
- Katz, O., Reches, Z. and Roegiers, J.C.** (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 723-728.
- Kazi, A. and Al-Mansour, L.R.** (1980). Empirical relationship between los angeles abrasion and Schmidt mammer strength tests with application to aggregate around Jeddah, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 13, 45-52.

- Khandelwal, M. and Ranjith, P.G.** (2010). Correlating index properties of rocks with P-wave measurements, *Journal of Applied Geophysics*, 71, 1–5.
- Kızılkaya, O.** (2017). Para krizlerinin tahmininde logit-probit modelleri ve yapay sinir ağları: Türkiye örneği, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. Malatya.
- Kodama, J., Goto, T., Fujii, Y. and Hagan, P.** (2013). The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 62, 1–13.
- Kodama, N., Fujii, Y., Akagawa, S. and Ishijima, Y.** (2007). Changes in mechanical properties and deformation behaviors of rocks due to freezing of pore water, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 63, 24–33.
- Köse H.** (2009). *Kaya Mekaniği*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları (4. Baskı), İzmir.
- Küçük, Ö.F.** (2006). Ultrasonik yüzey dalgaları- Schmidt yöntemi yardımıyla beton dayanımının bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Kuruppu, M.D. and Chong, K.P.** (2012). Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 91, 133–150.
- Kuruppu, M.D., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P. and Funatsu, T.** (2014). ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semicircular bend specimen, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 267–274.
- Lam dos Santos JP., Rosa LG. and Amaral PM.** (2011). Temperature effects on mechanical behavior of engineered Stones, *Construction and Building Materials*, 25,171-174.
- Liliana, T.A. Napitupulu, T.A.** (2012). Artificial neural network application in gross domestic product forecasting an Indonesia case, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 45(2), 410-415.
- Liu, X.Z. and Liu, P.** (2011). Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil, *Cold Regions Science and Technology*, 65, 421–428.

- Ma, L., Qi, J., Yu, F. and Yao, X.** (2016). Experimental study on variability in mechanical properties of a frozen sand as determined in triaxial compression tests, *Acta Geotechnica*, 11(1), 61–70.
- Ma, W. and Chang, X.** (2002). Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground Engineering, *Cold Regions Science and Technology*, 34, 11-17.
- Mahanta B., Singh, T.N. and Ranjith, P.G.** (2016). Influence of thermal treatment on mode I fracture toughness of certain Indian rocks, *Engineering Geology*, 210, 103–114.
- Mahanta, B., Tripathy, A., Vishal, V., Singh, T.N. and Ranjith, P.G.** (2017), Effects of strain rate on fracture toughness and energy release rate of gas shales, *Engineering Geology*, 218, 39–49.
- Marasteanu, M.O., Li, X., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H. and Newcomb, D.E.** (2004). Low Temperature cracking of asphalt concrete pavements, minnesota department of transportation, MN/RC – 2004-23, 229 p. Minnesota.
- Marina M.A. and Blanco Lopez M.C.** (2001). Determination of phosphorus in raw materials for ceramics: comparison between X-ray fluorescence spectrometry and inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, *Analytica Chimica Acta*, 432, 157–163.
- Matsunaga, I., Kuriyagawa, M. and Kinoshita, N.** (1981). Mechanical properties of rock at cryogenic temperature, *Journal of the Society of Materials Science Japan*, 97, 431–436.
- Matthews, J.A. and Shakesby, R.A.** (1984). The status of the ‘Little Ice Age’ in southern Norway: Relative-age dating of neoglacial moraines with Schmidt hammer and lichenometry, *Boreas*, 13: 333–346.
- Mcfear-Smith, I. and Fowell, R.J.** (1977). Correlation of rock properties and the cutting performance of tunneling machine (pp:582-602), *Proceeding of a Conference on Rock Engineering*, Newcastle Upon Tyne, UK.
- Muskhelishvili, N.I.** (1963). Some basic problems of the mathematical theory of elasticity; fundamental equations, plane theory of elasticity, torsion, and bending, Groningen P. Noordhoff.
- Nabiyev, V.** (2005). *Yapay Zeka*, Seçkin Yayıncılık, Ankara. 183s.

- Nara, Y., Morimoto, K., Hiroyoshi, N., Yoneda, T., Kaneko, K.P. and Benson, M.** (2012). Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: Implications for subcritical crack growth, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 2471–2481.
- Nasseri, M.H.B. and Mohanty, B.** (2008). Fracture toughness anisotropy in granitic rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 167–193.
- Nasseri, M.H.B., Schubnel, A. and Young, R.P.** (2007). Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 601–616.
- Özdemir, E. and Eren Sarıcı, D.** (2017). The effect of different environmental conditions on some natural stones (s:1129-1135), *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 19-22 October, Elazığ, Turkey.
- Özdemir, R.** (2010). Elektrodepolama yöntemi ile elde edilen Zn-Fe ince filmlerinin elektriksel özdirenç özelliklerinin sezgisel yöntemler yardımıyla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Kilis.
- Öztemel, E.** (2003). *Yapay Sinir Ağları*, İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Öztürk, A.** (2006). Kayaç dokusal özelliklerinin sınıflandırılması ve kaya mühendisliği uygulamaları, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği, İstanbul.
- Perez, N.** (2004). *Fracture Mechanics*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M.R.** (2014). Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions, *Construction and Building Materials*, 53, 235–242.
- Poole, R.W. and Farmer, I.W.** (1980). Consistency and Repeatability of Schmidt Hammer Rebound Data During Field Testing, *International Journal Rock Mechanics Mining Science, Geomechanics Abstracts*, 17, 167-171.
- Quadhi, T.M.** (2008). Testing Jabal Farasan marble deposit for multiple industrial applications, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(1), 79-97.
- Romana, M. and Vasarhelyi B.** (2007). A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples (pp:3), *10<sup>th</sup>*

*Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisszabon, Portugália.

- Roy, D.G., Singh, T.N., Kodikara, J. and Talukdar, M.** (2017). Correlating the Mechanical and Physical Properties with Mode-I Fracture Toughness of Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 1941–1946.
- Sabri, M., Ghazvinian, A. and Nejati, H.R.** (2016). Effect of particle size heterogeneity on fracture toughness and failure mechanism of rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 81, 79–85.
- Sachpazis, C.I.** (1990). Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's Modulus of carbonate rocks, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 42, pp:75–84.
- Sachpazis, C.I.** (2004). Monitoring and correlating geotechnical engineering properties and degree of metamorphosis in a four-stage alteration process passing from pure limestone to pure marble, *Elektronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1-36.
- Saha, G. and Biligiri, K.P.** (2016). Homothetic behaviour investigation on fracture toughness of asphalt mixtures using semicircular bending test, *Construction and Building Materials*, 114, 423–433.
- Schmidt, E.** (1951). A non-destructive concrete tester, *Concrete*, 59, 34–35.
- Schmidt, R.A. and Rossmantihm H.P.** (1983). Basics of rock fracture mechanics, *Rock Fracture Mechanics*, 1, 2-29.
- Şen, Z.** (2004). *Yapay Sinir Ağları*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 143s.
- Şener, S.** (2002). Fracture toughness tests on brazilian discs of Ankara andesite. M.Sc.Thesis, METU, Ankara.
- Shakoor, A. and Bonelli, R.E.** (1991). Relationship between petrography characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones, *Bulletin of Association of Engineering Geology*, 28, 55-71.
- Sharma, P.K. and Singh, T.N.** (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 17–22.
- Sierra, R., Tran, M.H., Abousleiman, Y.N. and Slatt, R.M.** (2010). Woodford shale mechanical properties and the impacts of lithofacies (pp:461-467), *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*, 23-27 June. Canada.



- Singh, T.N., Sharma P.K. and Khandelwal M.** (2007). Effect of the pH on the physico-mechanical properties of marble. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 66(1), 81-87.
- Soiltest Inc.** (1976). *Operating instructions- concrete test hammer*, Evanston, IL.
- Somogyi, A., Braun, M. and Posta, J.,** (1997). Comparison between X-ray fluorescence and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry in the analysis of sediment samples, *Spectrochimica Acta Part B*, 52, 2011-2017.
- Sousa, C. A.** (2016). An overview on weight initialization methods for feedforward neural networks (pp:52-59), *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, July 24-29, Canada.
- Sumner, P. and Nel, W.** (2002). The effect of moisture on schmidt hammer rebound: Tests on rock samples from Marion Island and South Africa, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1137-1142.
- Sun, Z. and Ouchterlony, F.** (1986). Fracture toughness of Stripa granite cores, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 23, 399-409.
- Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R.** (2000). *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, ASME Press, New York.
- Talukdar, M., Roy, D.G. and Singh, T.N.** (2018). Correlating mode-I fracture toughness and mechanical properties of heat-treated crystalline rocks, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 91-101.
- Tang, S.B.** (2017). Stress intensity factors for a Brazilian disc with a central crack subjected to compression, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 93, 38–45.
- Tarhan, F.** (1989). *Mühendislik Jeolojisi Prensipleri*, KTÜ Basımevi yayınları, Trabzon, 384s.
- Tarun R. Naik, T.R., Malhotra, V.M., Popovics, J.S.,** (2004). The ultrasonic pulse velocity method, In: V.M. Malhotra and N.J. Carino, Edited 2004, Handbook on nondestructive testing of concrete, Crc Press.
- Topçu, M. ve Taşgetiren, S.** (1998). *Mühendisler için Sonlu Elemanlar Methodu*, PAÜ Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli.
- Török, A. and Vasarhelyi B.** (2010). The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary, *Engineering Geology*, 115, 237–245.

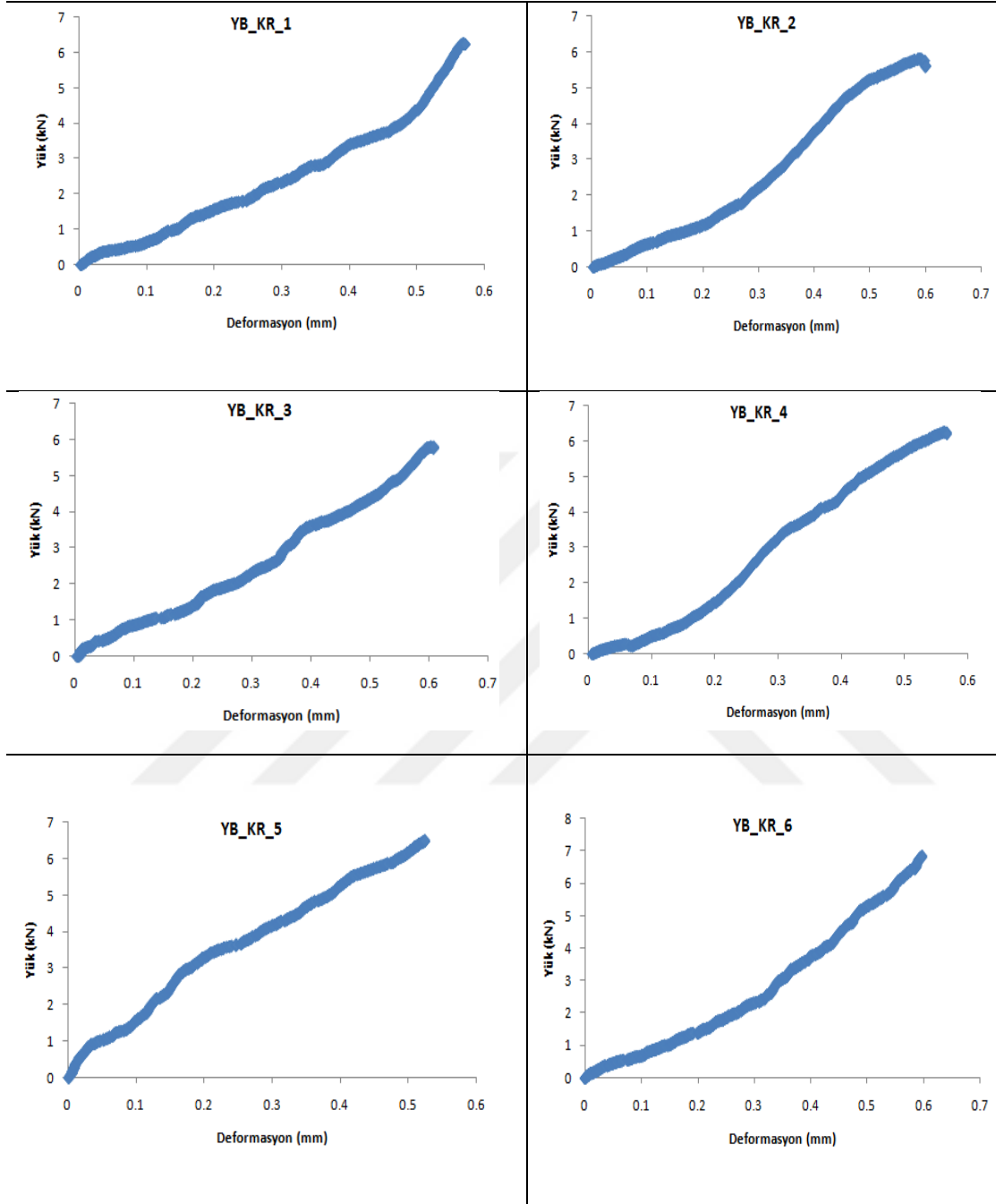
- TS 2513** (1997). *Doğal yapı taşları*, TSE, Ankara.
- TS 699** (2009) *Tabii yapı taşları- muayene ve deney metodları*. Ankara.
- TS 7654** (1989). *Kayaçların çekme mukavemetinin dolaylı (indirekt) metotla tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 14066** (2004). *Doğal taşlar-deney metodları termal şok etkisiyle yıpranmaya direncin tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 1925** (2000). *Doğal taşlar deney metodları kılcal etkiye bağlı su emme katsayılarının tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 1939** (2010). Doğal taşlar- Deney metodları- gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini, TSE, Ankara.
- Tugrul, A. and Zarif, I.H.** (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *Engineering Geology*, 51, 303-317.
- Tutluoglu, L. and Keles, Ç.** (2011). Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 1248–1261.
- Ulusay, R. Gökçeoğlu, C. ve Binal, A.** (2011). *Kaya mekaniği laboratuvar deneyleri*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları 3. Baskı, Ankara.
- Ündül, Ö., Aysal, N., Amann, A. and Plötze, M.** (2014). Effect of micro texture on the strength properties of andesitic rocks (pp:1-5), *ROCKMEC'2014-XIth Regional Rock Mechanics Symposium*, May 07-09, Afyonkarahisar, Turkey.
- USBR**, (1998). Engineering geology field manual, *Field index tests*, 1, 111–120.
- Van Grieken, R.E and Markowicz, A.A.** (1992). *Handbook of X-ray spectrometry*. marcell decker, Inc., New York, pp:1-9.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S. and Pamplona J.** (2008). Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites, *Ultrasonic*, 48, 453-466.
- Wang, C.H.** (1996). *Introduction to Fracture Mechanics, Lecture Notes*, Public Release Melbourne.
- Wang, D., Ma, W., Chang, X. and Wang, A.** (2005). Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium, *Cold Regions Science and Technology*, 42, 194-200.

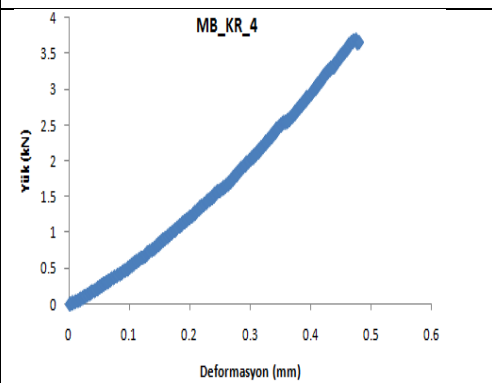
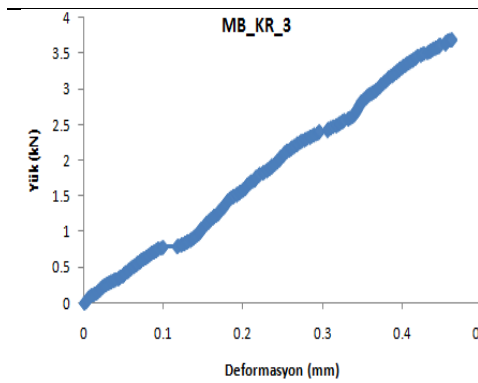
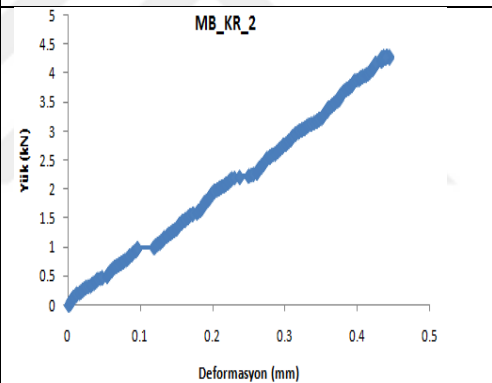
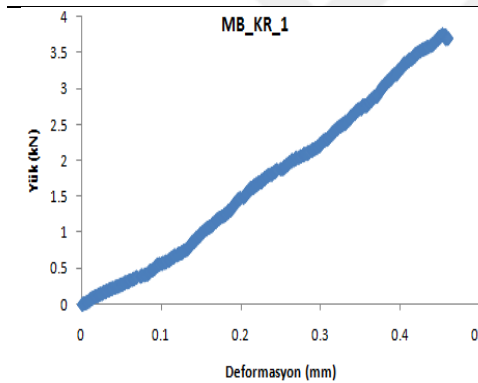
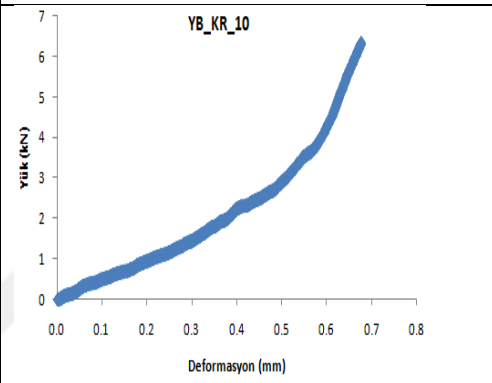
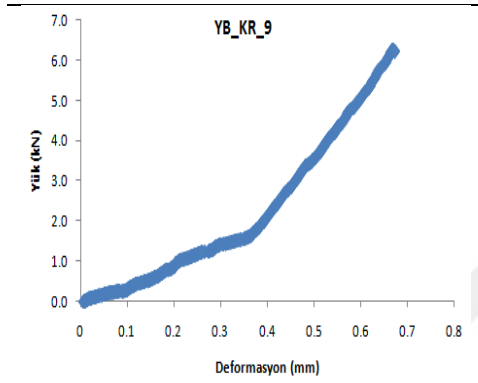
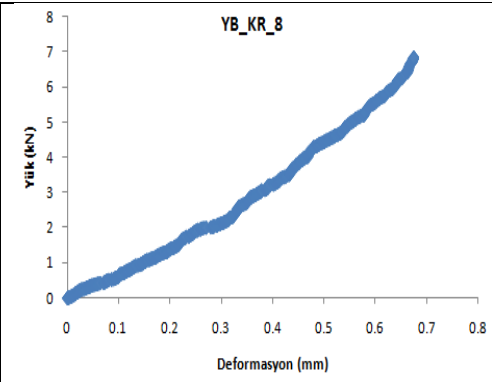
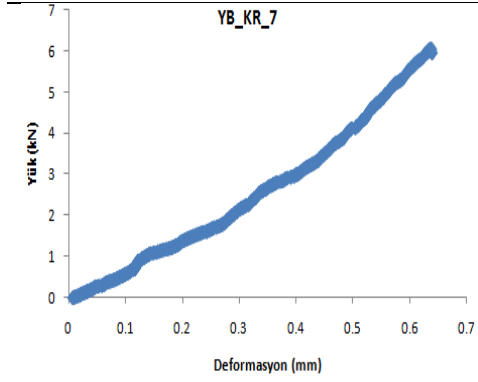
- Wang, H., Zhao, F., Huang, Z., Yao, Y. and Yuan, G.** (2017). Experimental study of mode-I fracture toughness for layered shale based on two ISRM-suggested methods, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 1933–1939.
- Wang, P., Xu, J., Fang, X. and Wen, M.** (2017). Dynamic splitting tensile behaviors of red-sandstone subjected to repeated thermal shocks: Deterioration and micro-mechanism, *Engineering Geology*, 223, 1–10.
- Wei, M.D., Dai, F., Xu, N.W., Liu, Y. and Zhao, T.** (2018). A novel chevron notched short rod bend method for measuring the mode I fracture toughness of rocks, *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 1–15.
- Wei, M.D., Dai, F., Xu, N.W., Zhao, T. and Xia, K.W.** (2016). Experimental and numerical study on the fracture process zone and fracture toughness determination for ISRM-suggested semi-circular bend rock specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 154, 43–56.
- Wei, S., Xie, Z., Xue, W., Yi, Z., Chen, J. and Cheng, L.** (2014). Fracture toughness of aluminum nitride ceramics at cryogenic temperatures, *Ceramics International*, 40, 13715–13718.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N. and Sun, G.** (1992). *Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications*, Elsevier, 570, Amsterdam.
- Xiao-Dong, Z., Guo-qing, Z., Wei, C. and Xiao-jun, L.** (2009). Effects of temperature gradients on elastic modulus and compression strength of the saturated frozen clay, *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 420-4.
- Yao, W., Xu, Y., Liu, H.W. and Xia, K.** (2017). Quantification of thermally induced damage and its effect on dynamic fracture toughness of two mortars, *Engineering Fracture Mechanics*, 169, 74–88.
- Yavuz, H.** (2011). Effect of freeze–thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 187–192.
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I. and Sengun, N.** (2006). Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze–thaw and thermal shock weathering, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 767-775.
- Yilmaz, B.** (2005). The Comparative Methods Powder And Glass Done By XRF Determine Of Main Oxide Components In Cement Clinker, *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, 9, 157-163.

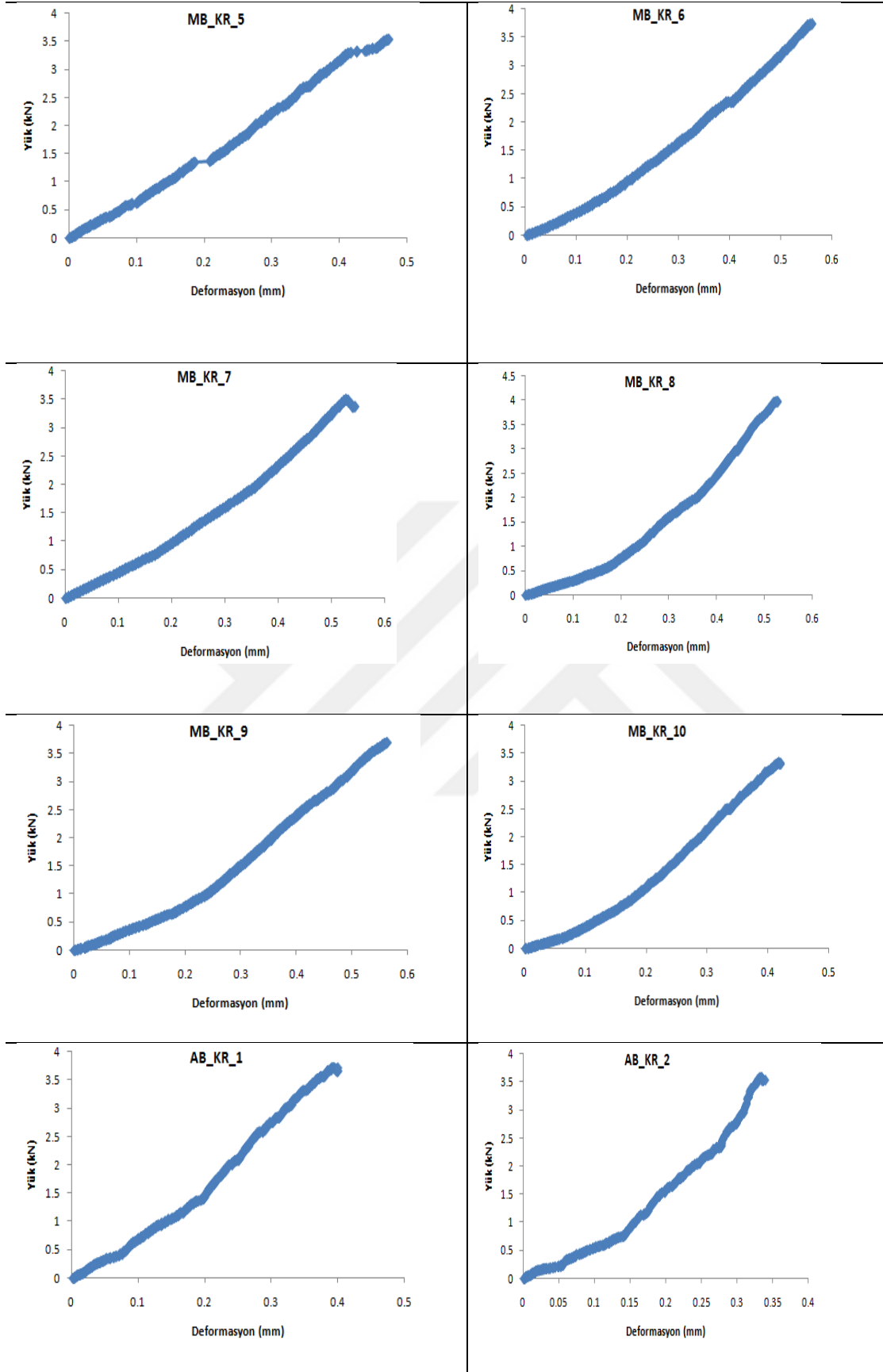
- Young, R.P. and Fowell, R.J.** (1978). Assessing rock discontinuities, *Tunnels and Tunneling*, 6, 45-48.
- Zhang, Q.B. and Zhao, J.** (2013). Effect of loading rate on fracture toughness and failure micromechanisms in marble, *Engineering Fracture Mechanics*, 102, 288–309.
- Zhang, Q.B. and Zhao, J.** (2014). A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1411–1478.
- Zhou Y.X., Xia K., Li X.B., Li H.B., Ma G.W. and Zhao J.** (2012). Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 105–112.
- Zhou, Z.L., Cai, X., Chen, L., Cao, W.Z., Zhao, Y. and Xiong, C.** (2017). Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone, *Engineering Geology*, 220, 1–12.

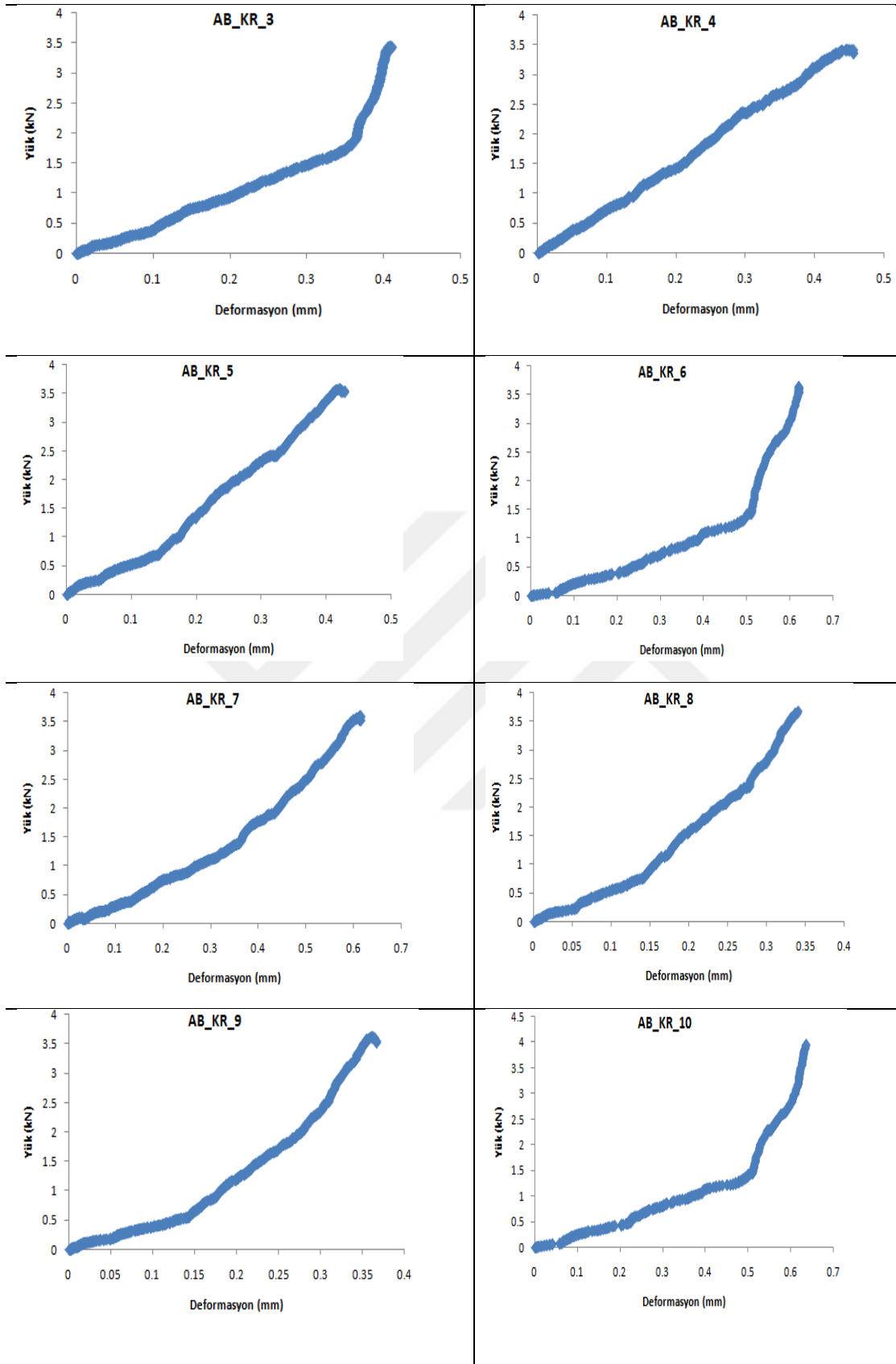
## EKLER

### Ek 1. SCB deney numunelerinin yük-deformasyon grafikleri

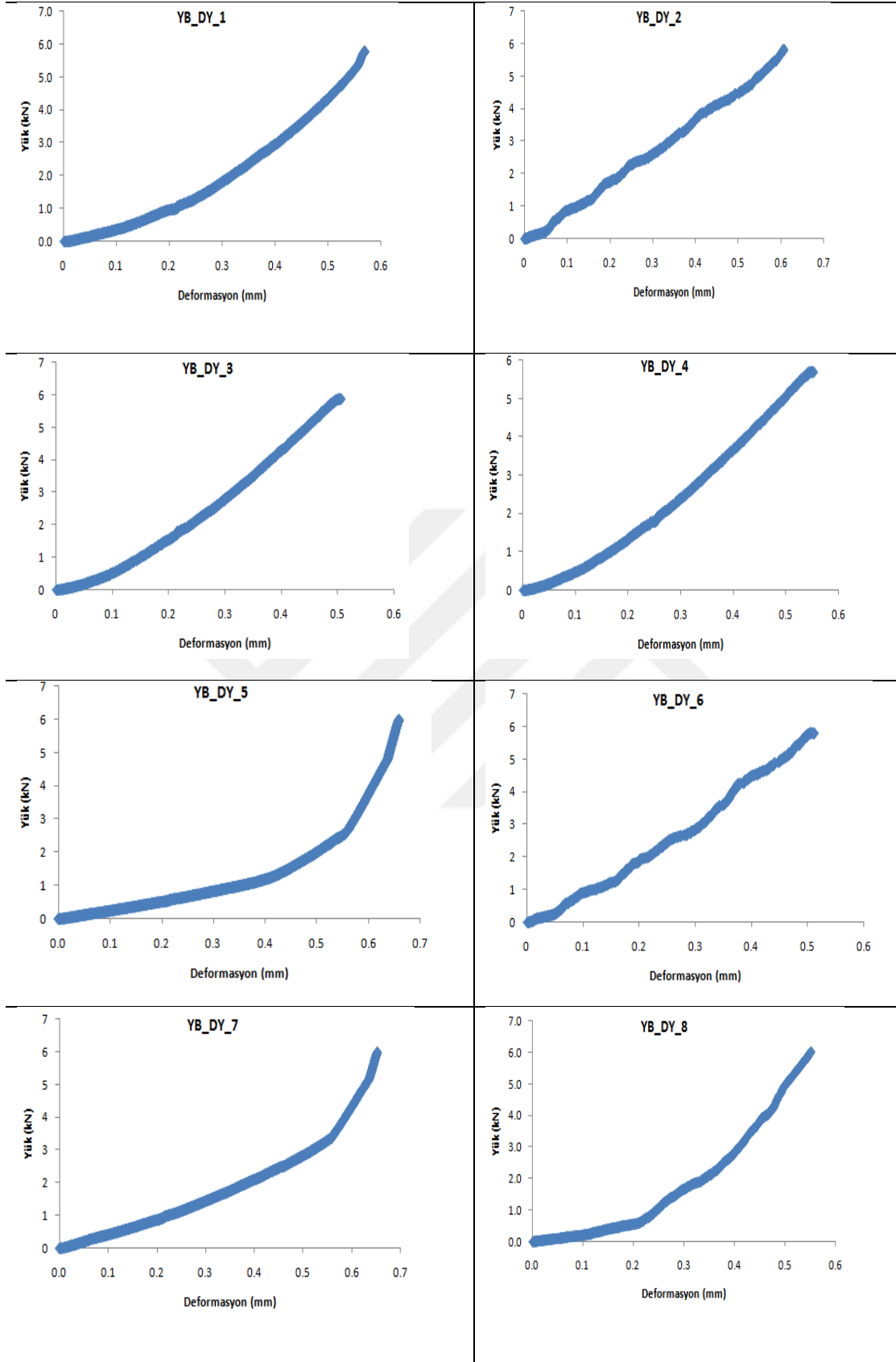


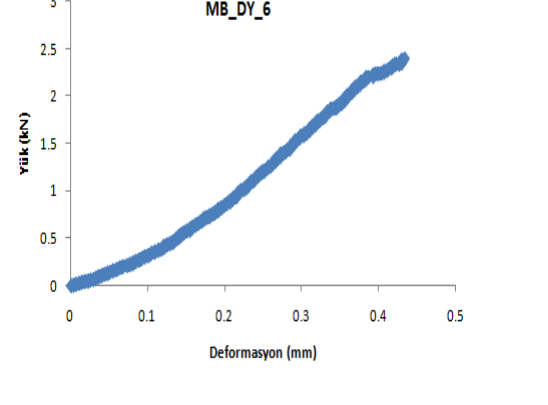
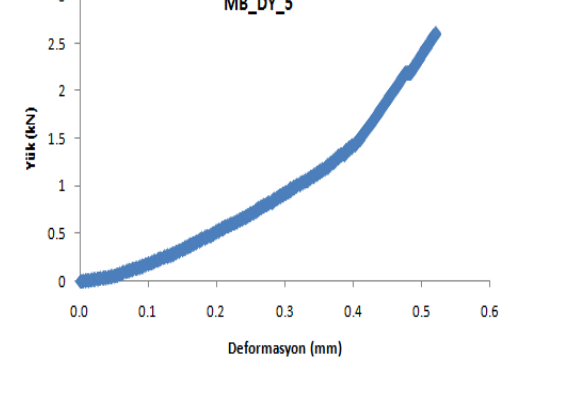
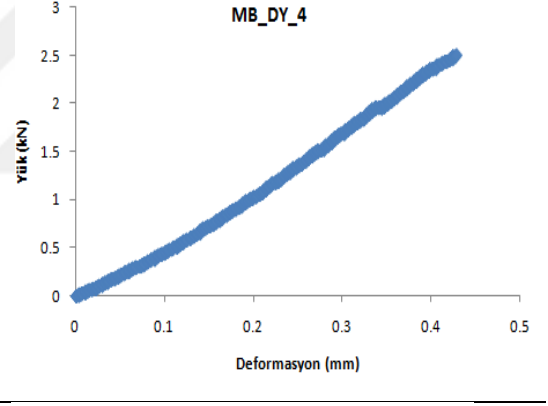
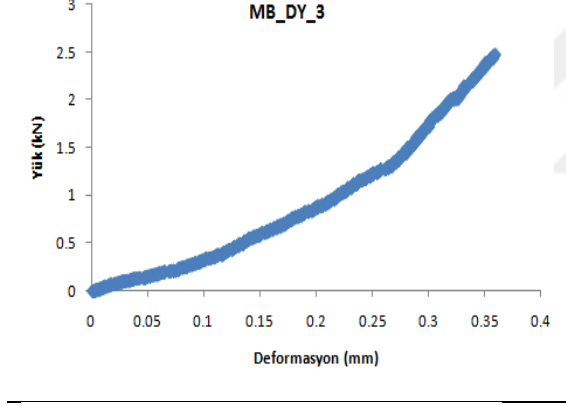
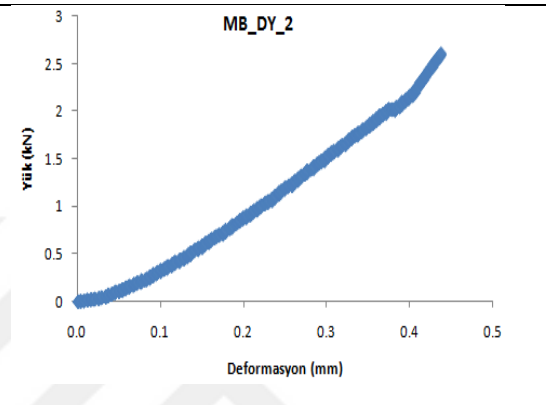
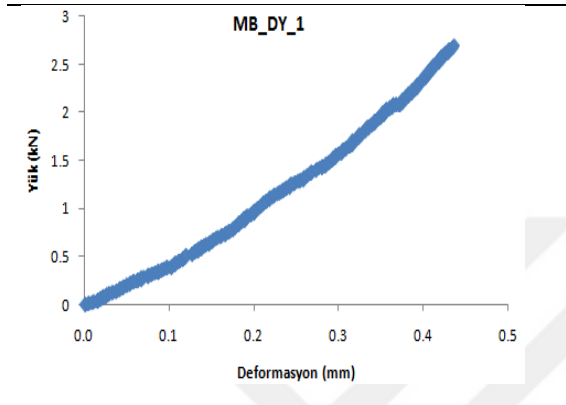
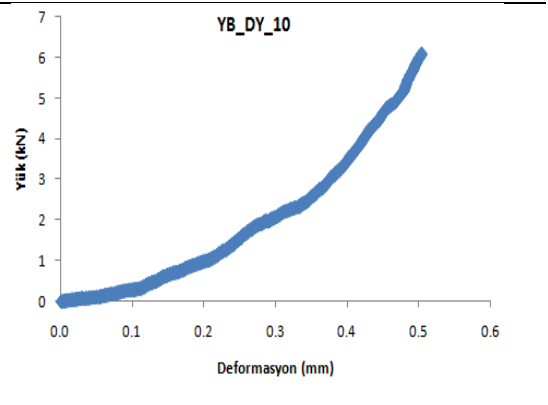
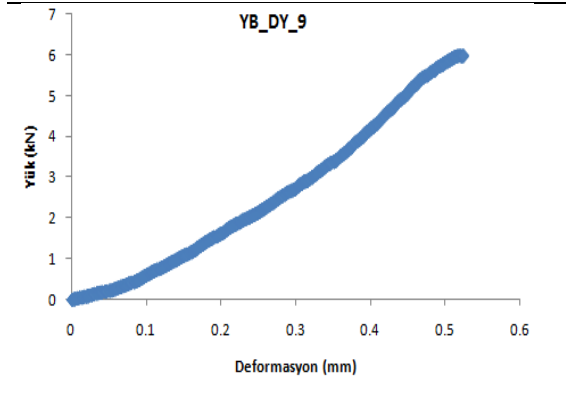


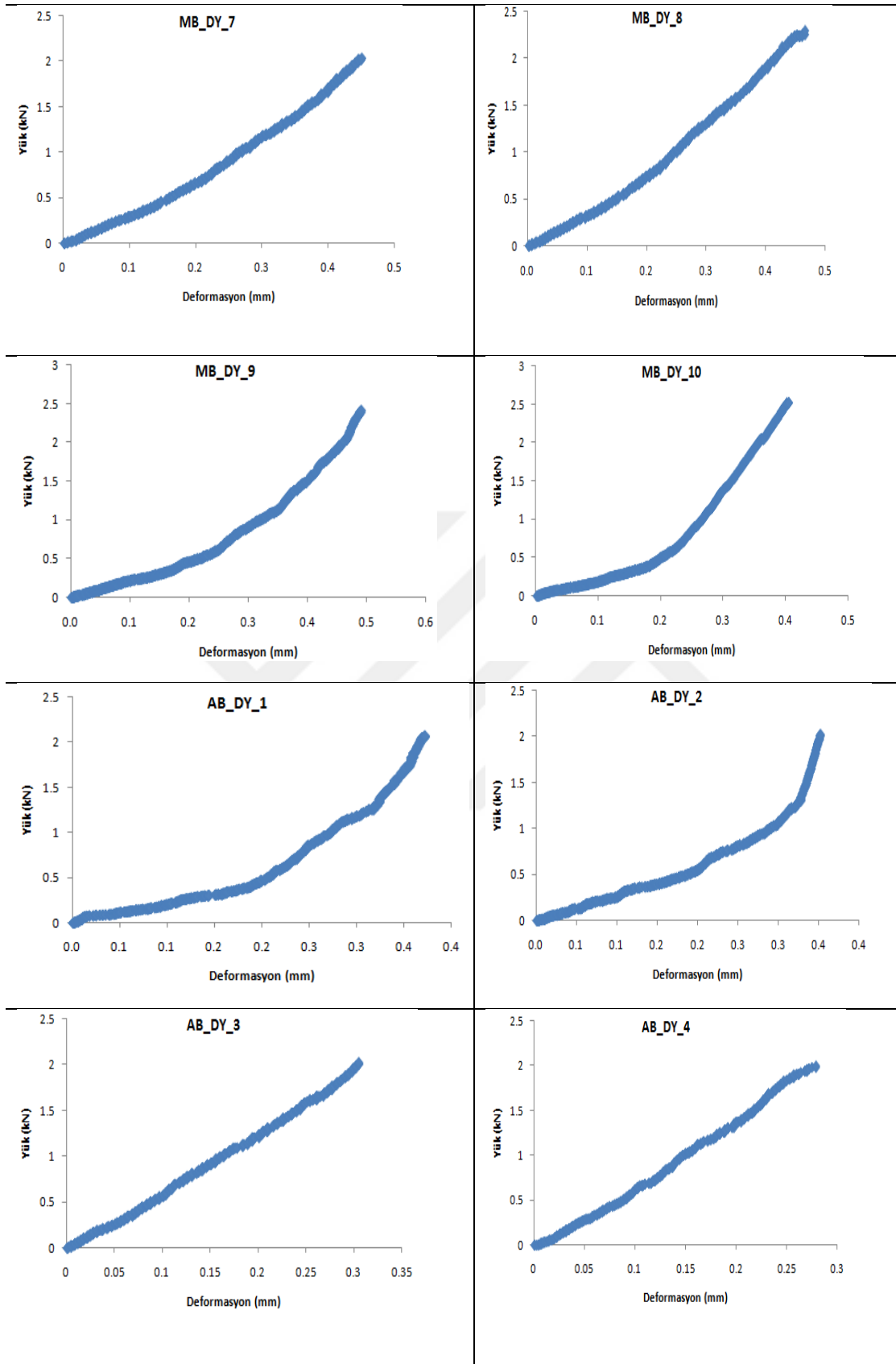


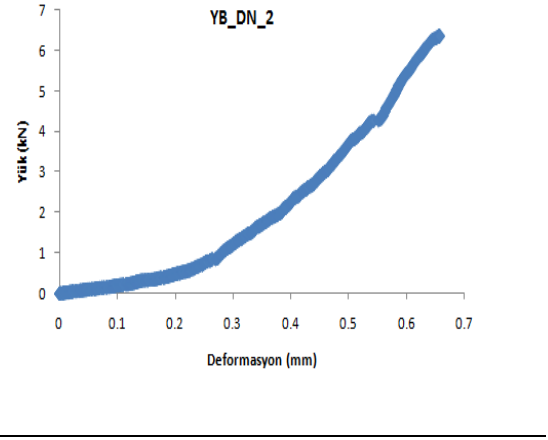
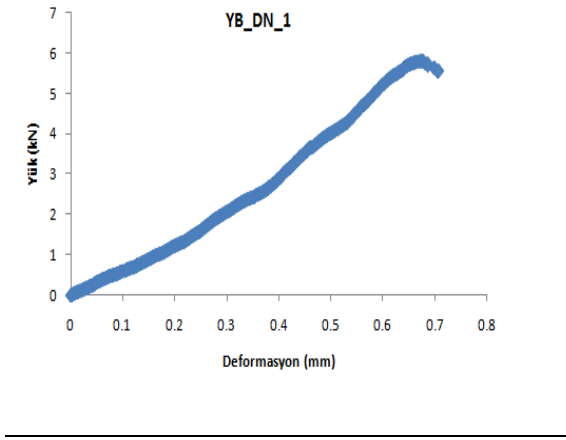
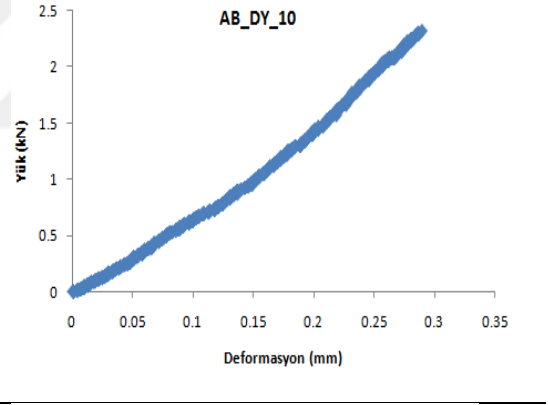
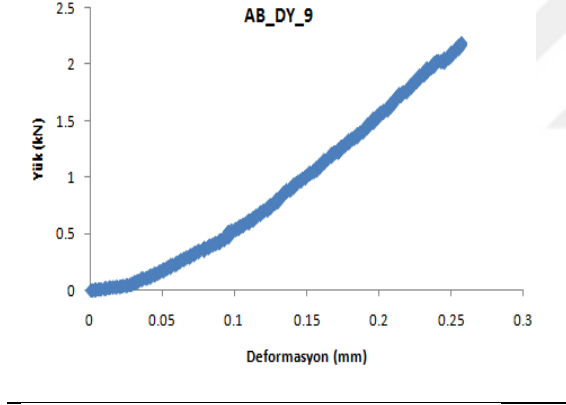
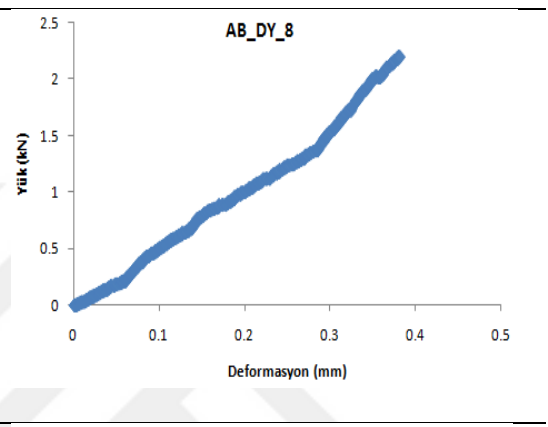
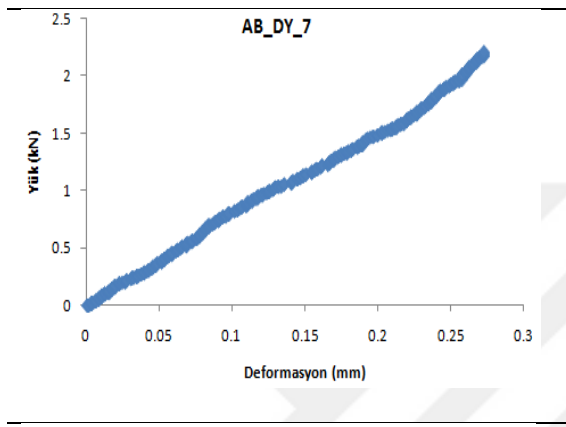
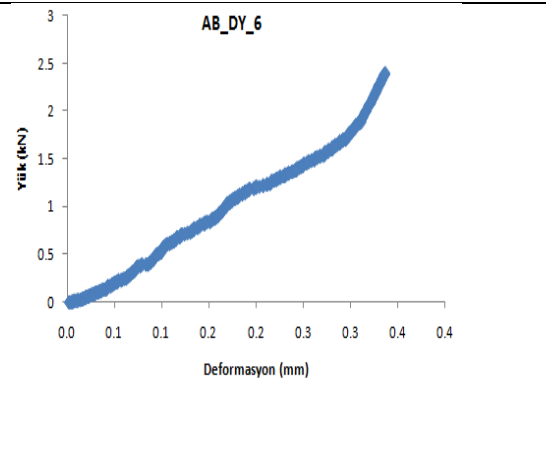
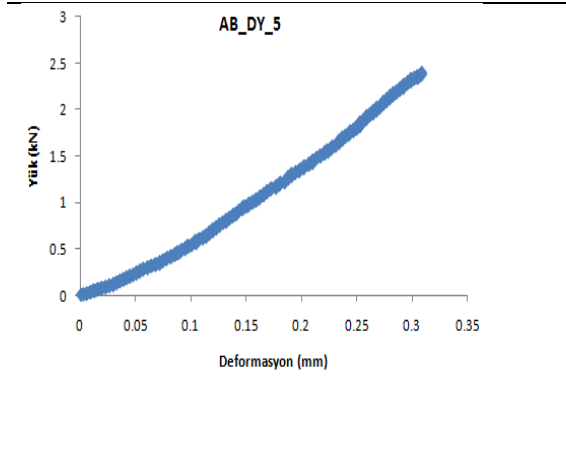


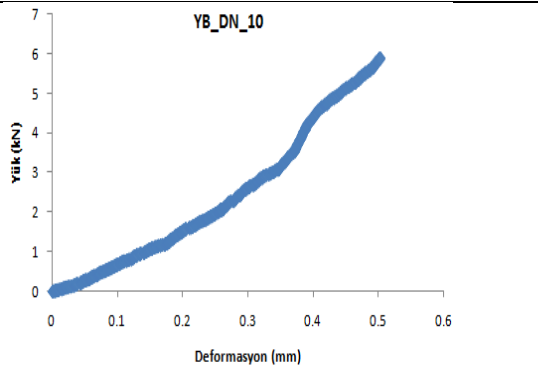
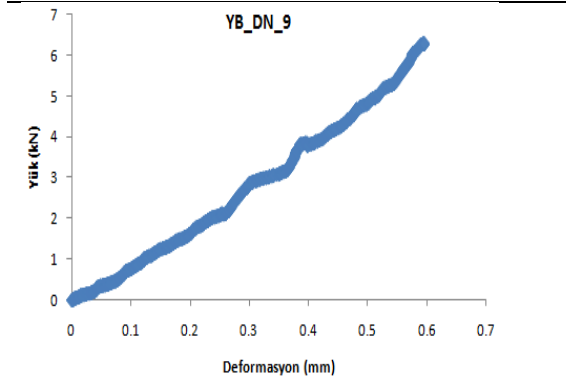
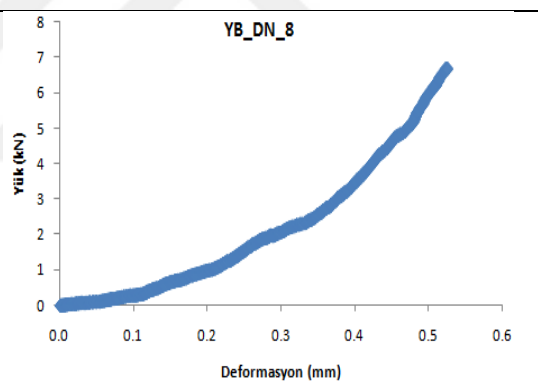
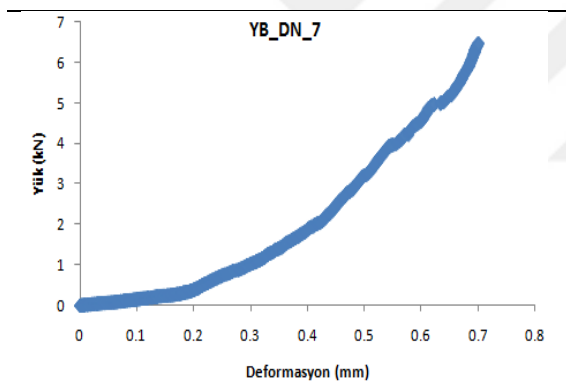
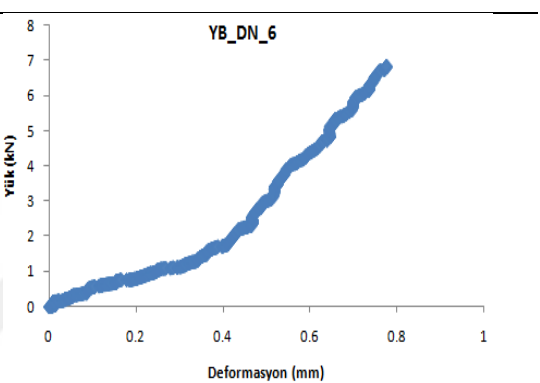
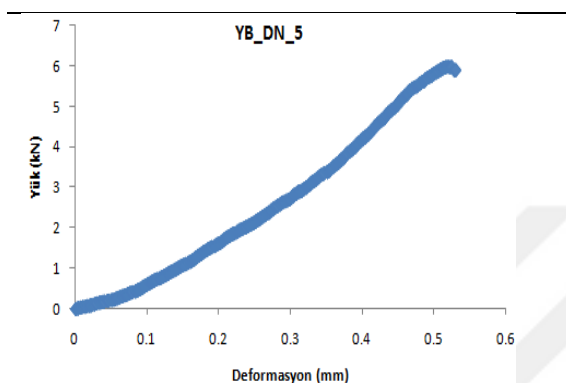
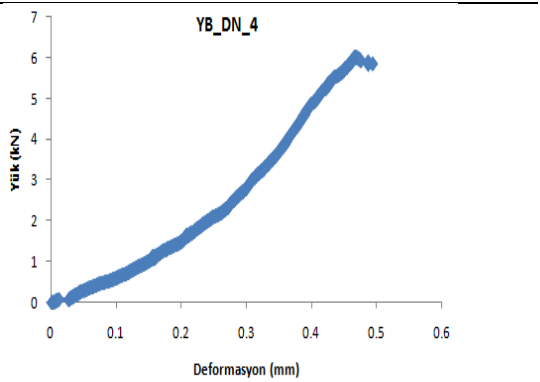
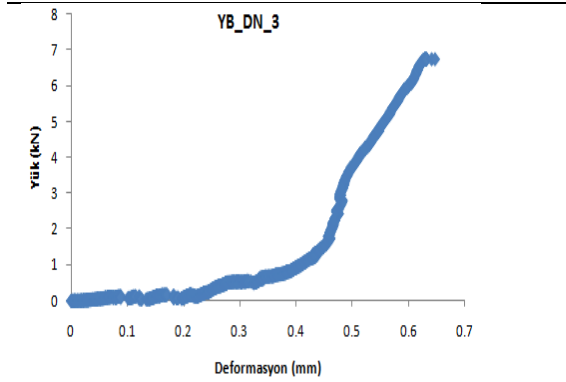


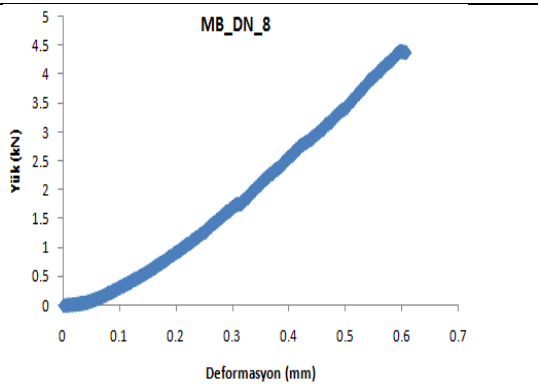
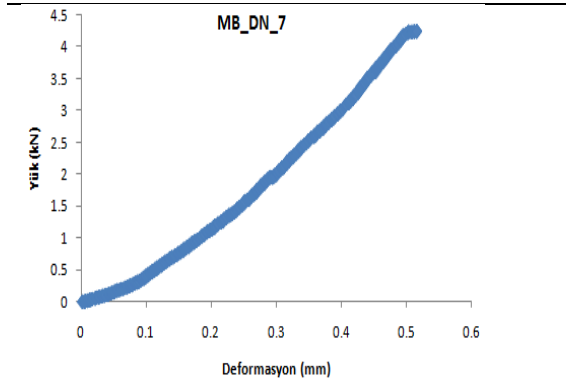
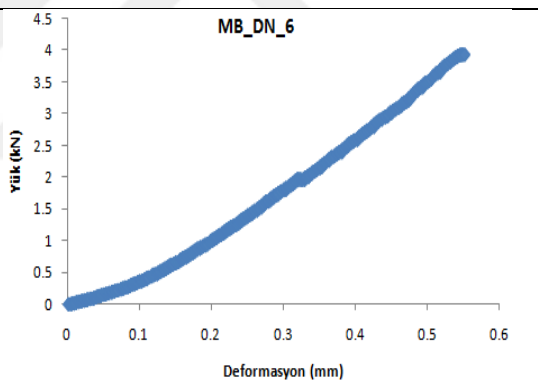
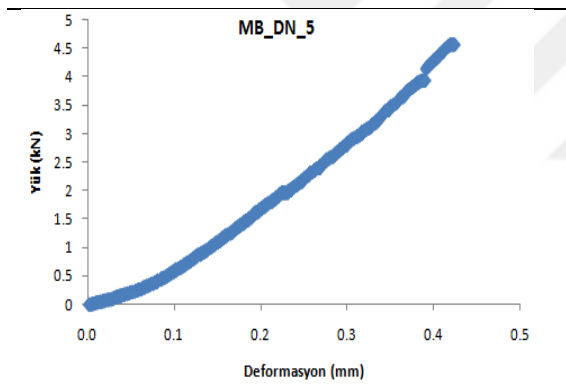
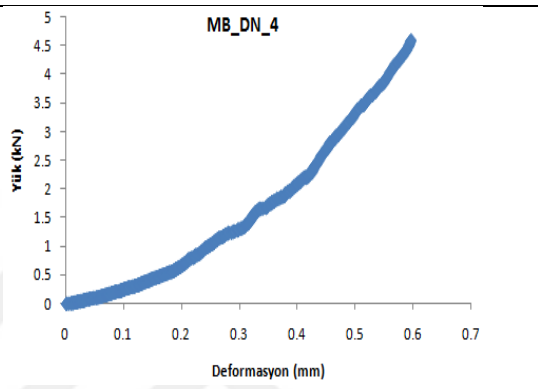
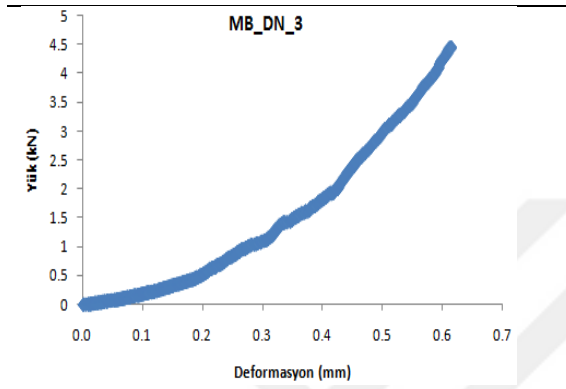
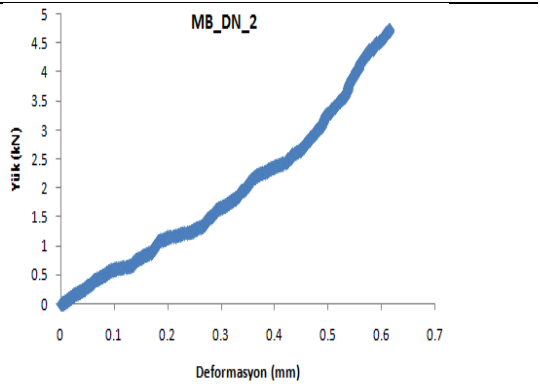
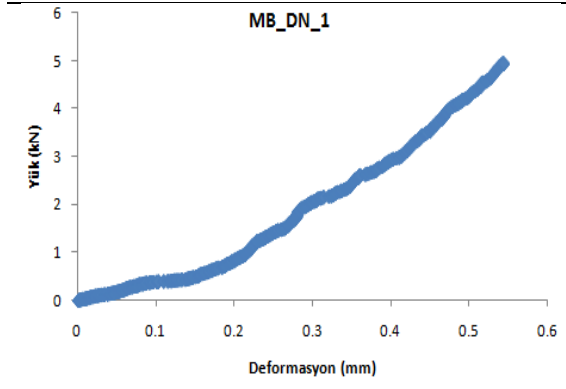


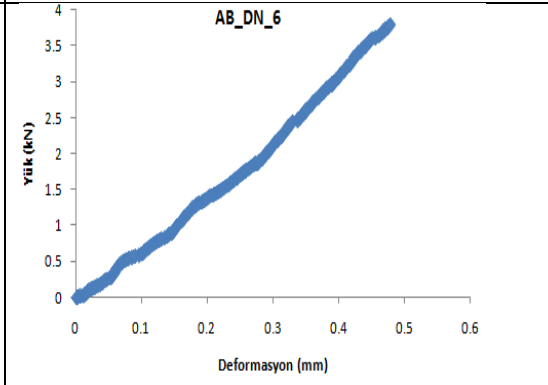
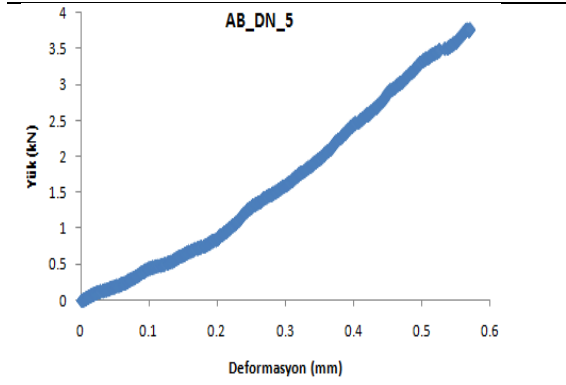
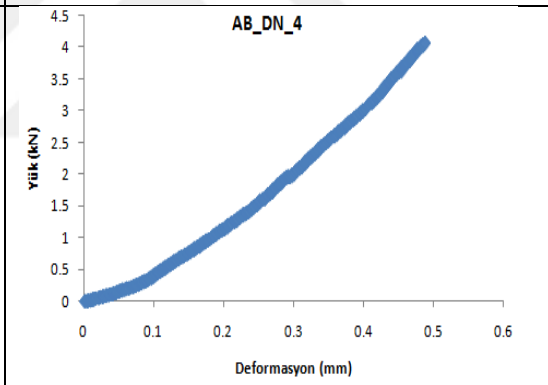
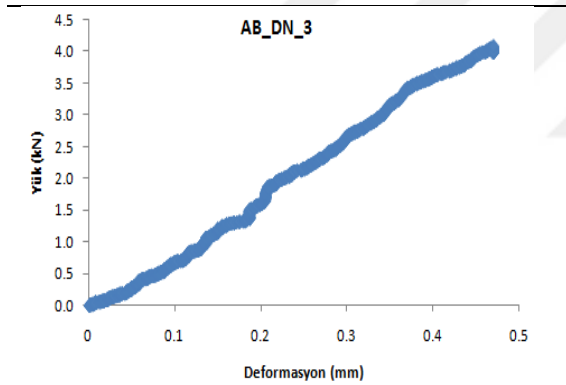
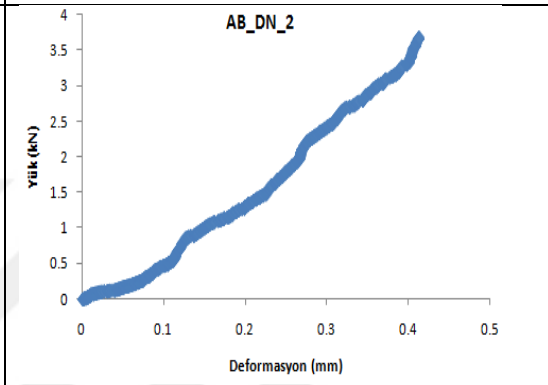
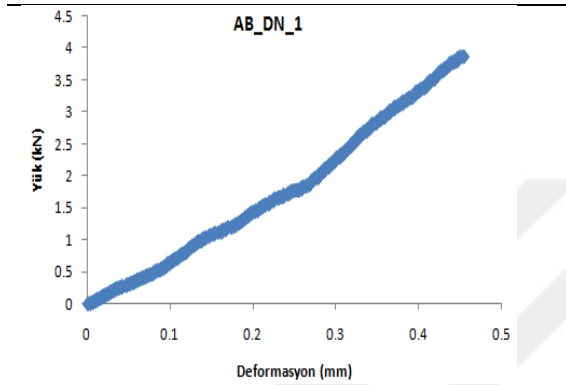
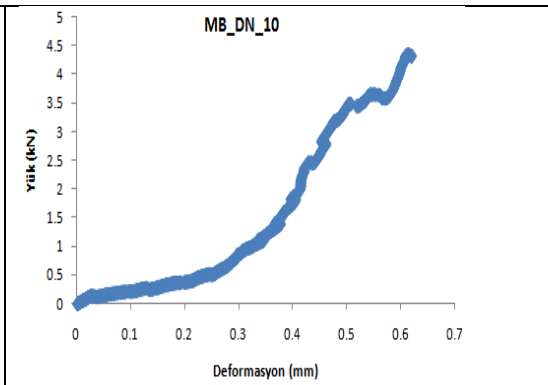
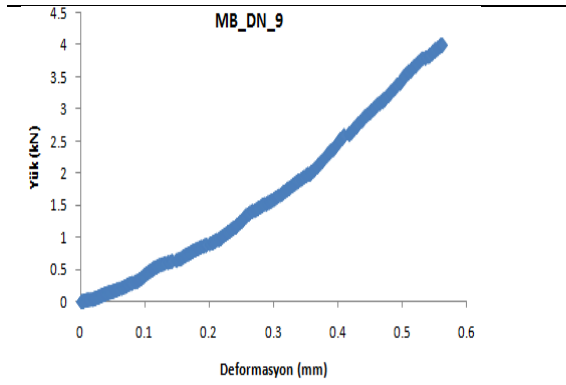


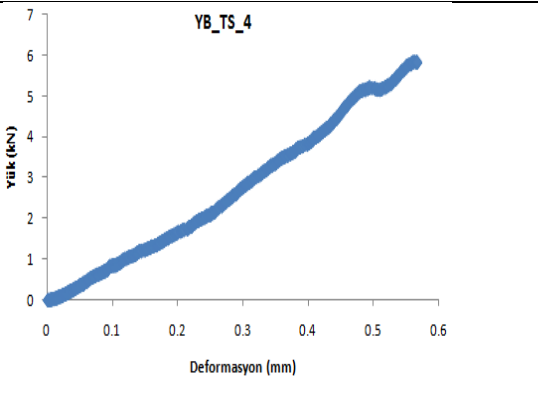
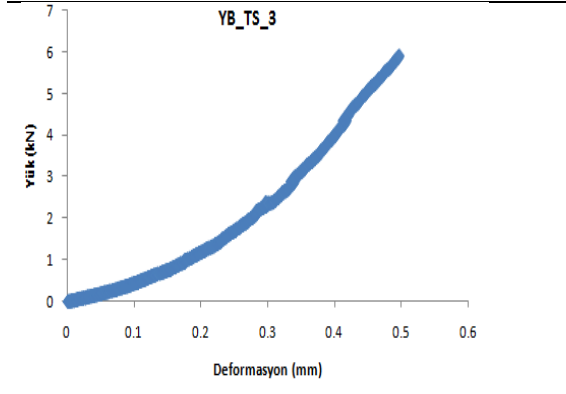
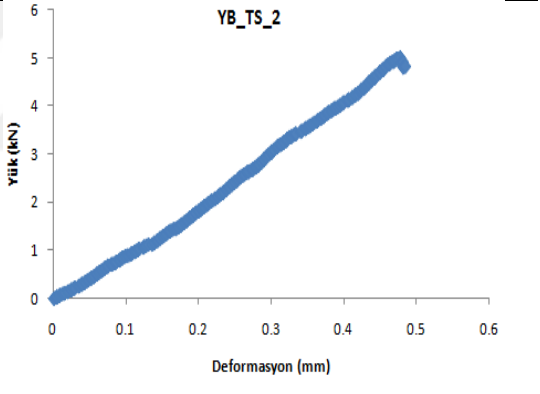
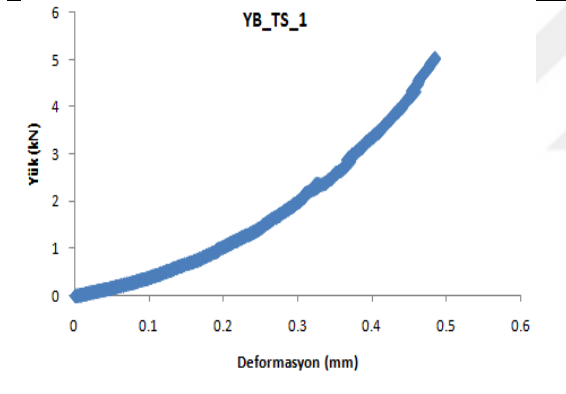
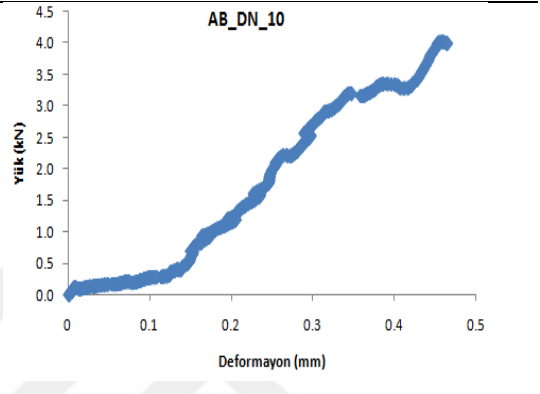
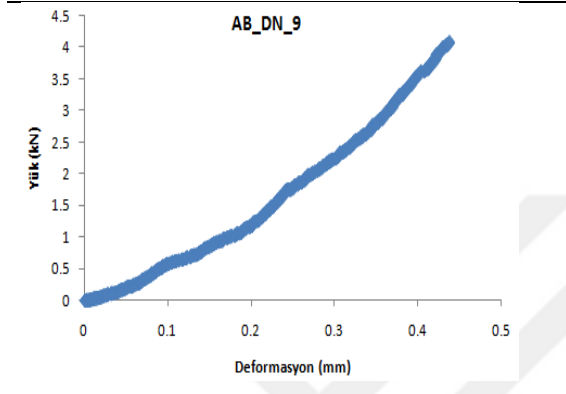
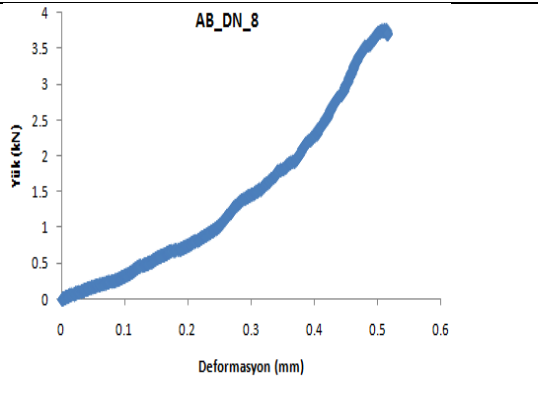
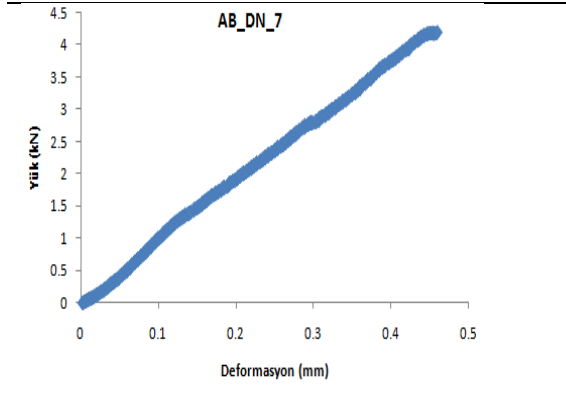




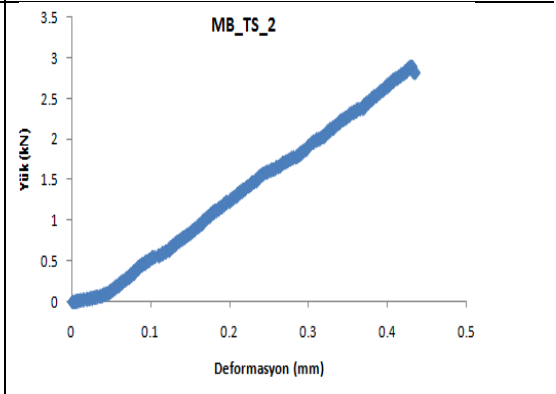
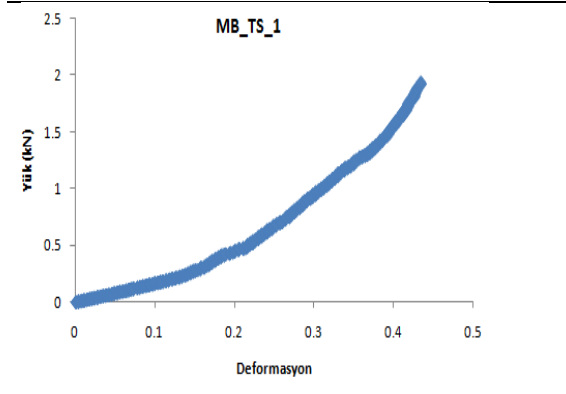
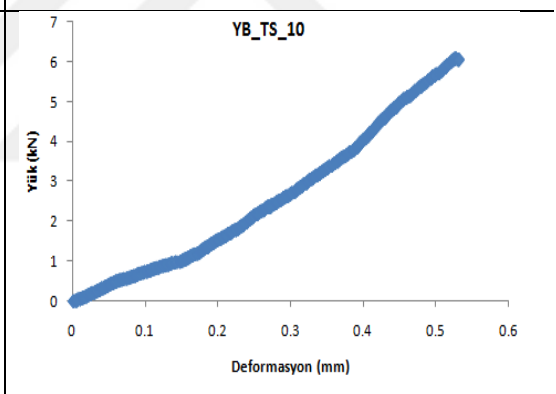
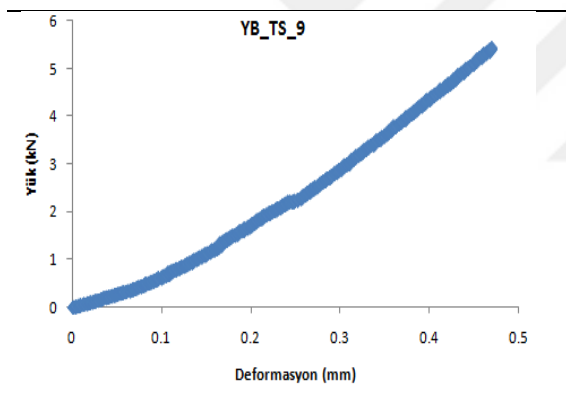
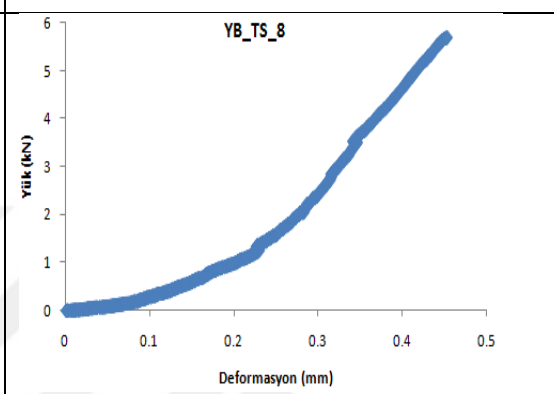
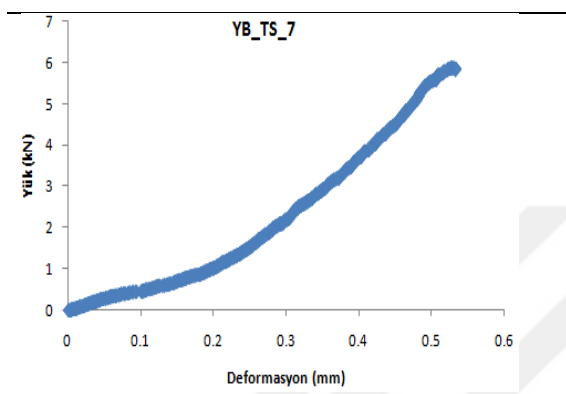
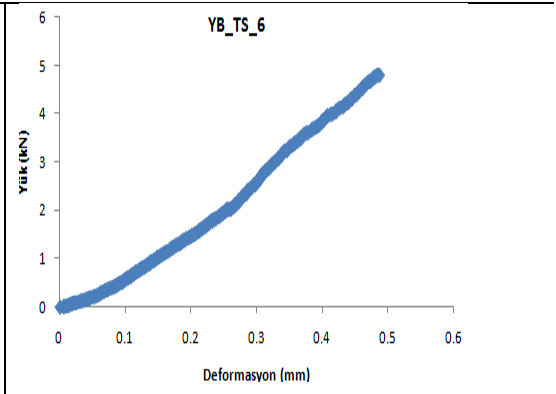
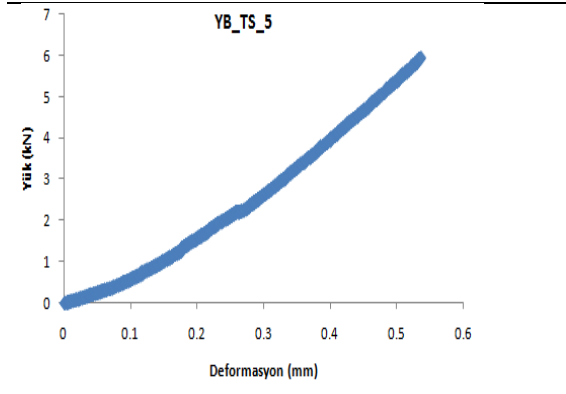


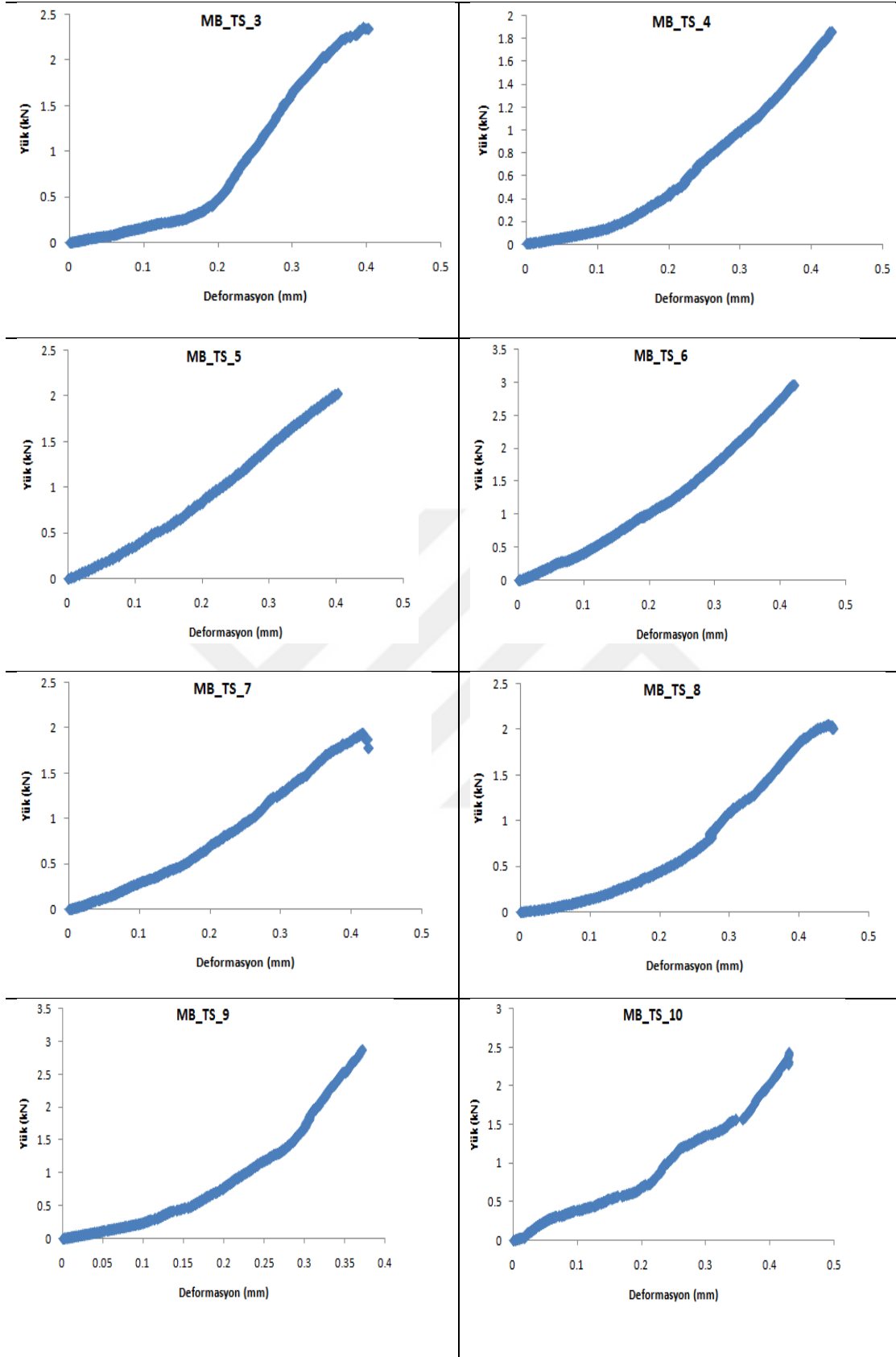


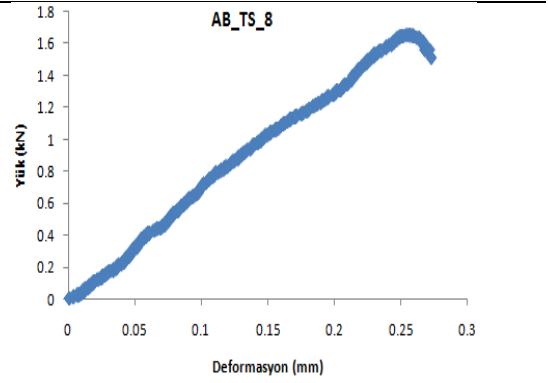
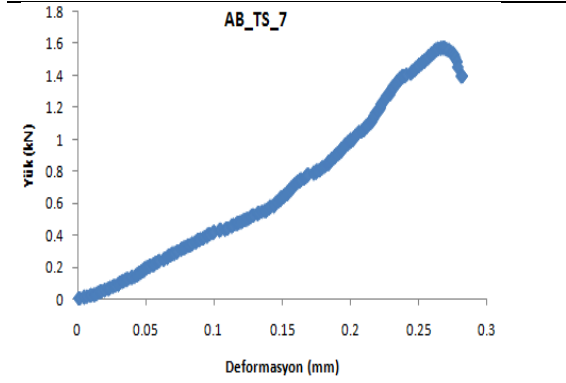
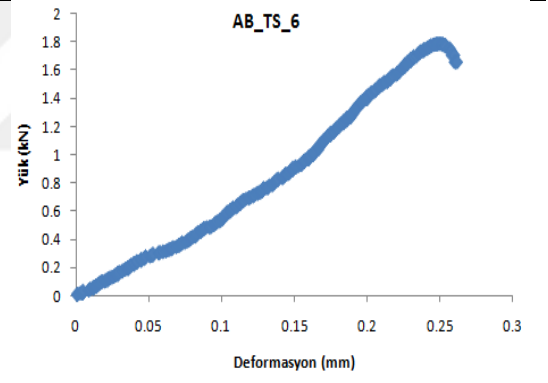
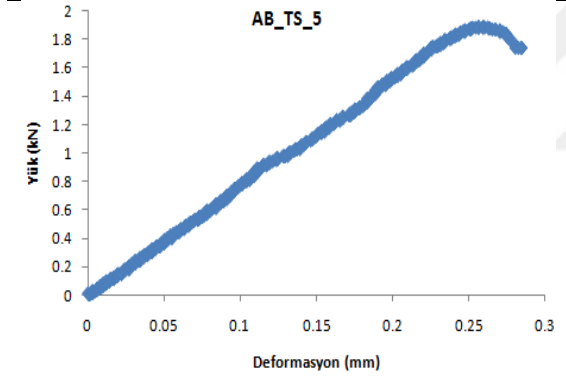
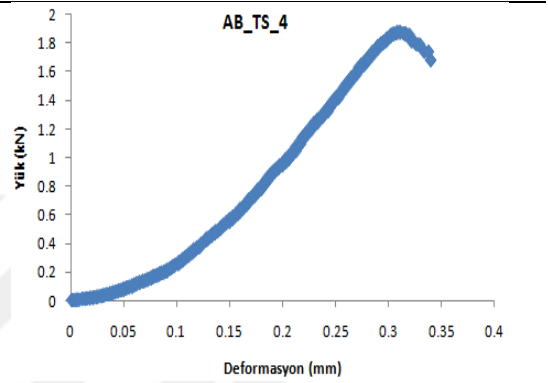
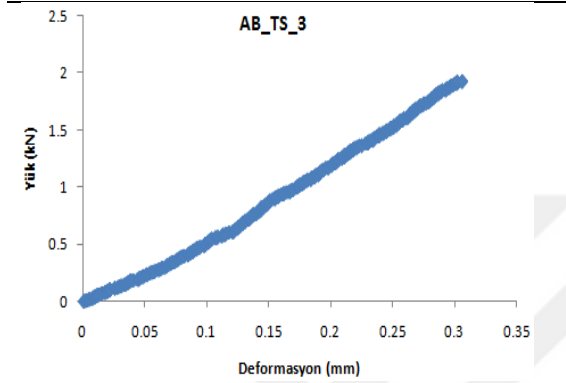
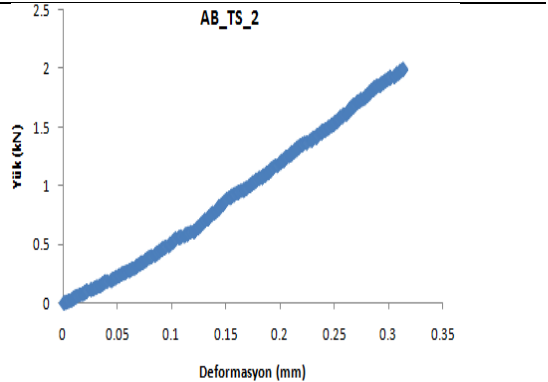
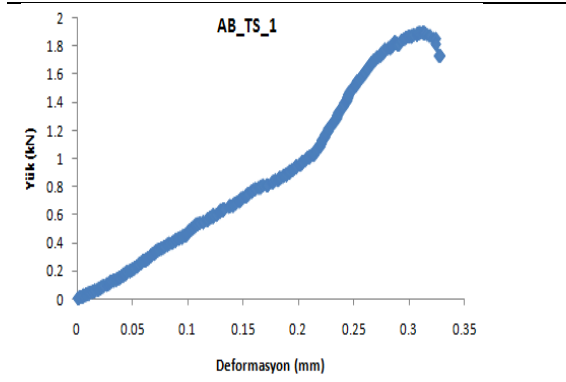


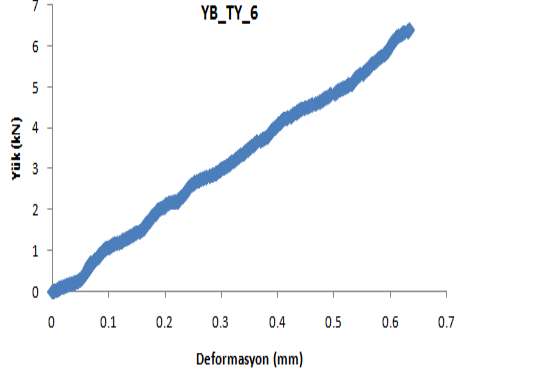
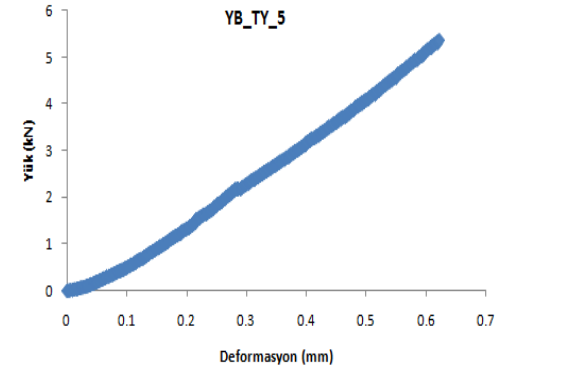
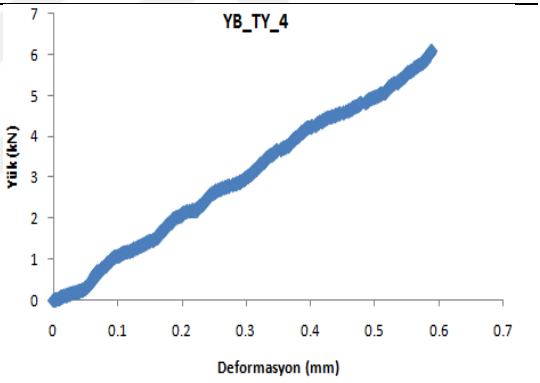
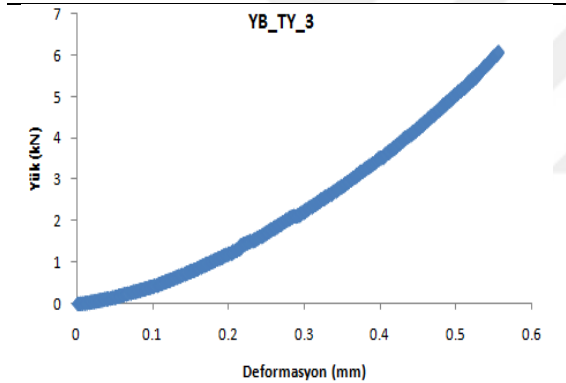
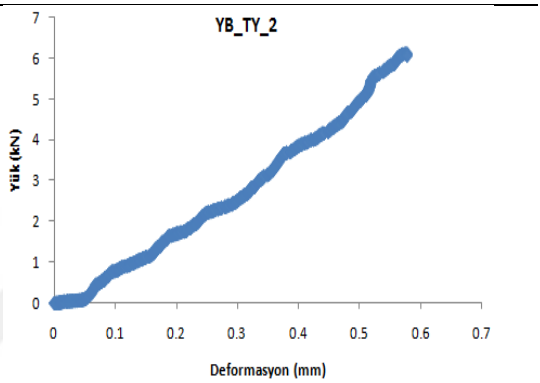
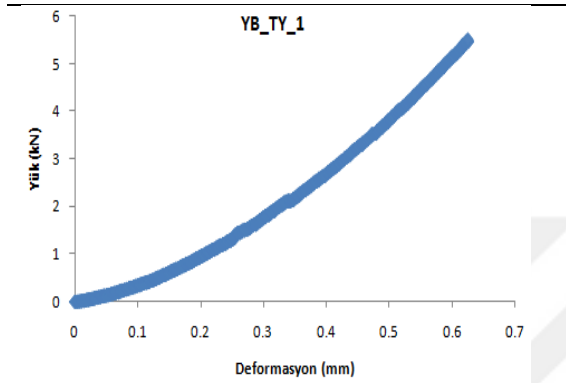
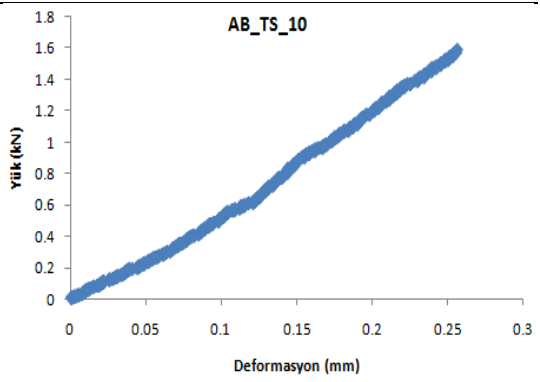
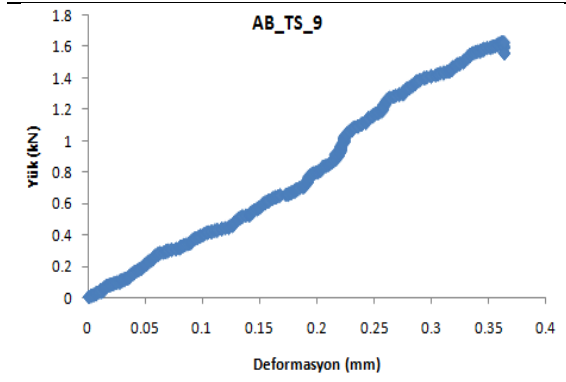


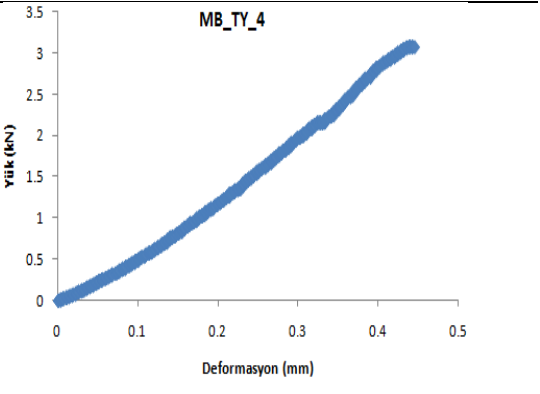
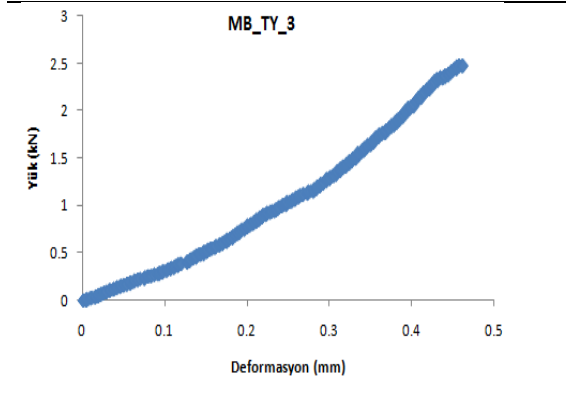
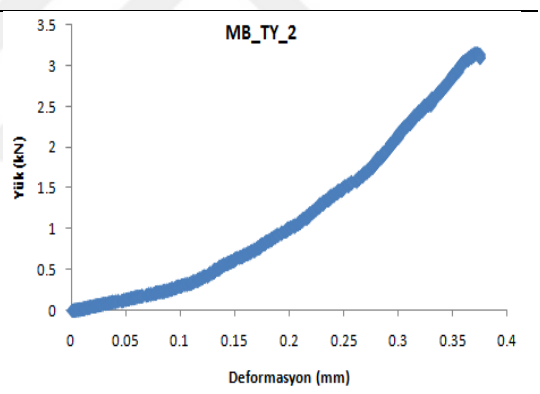
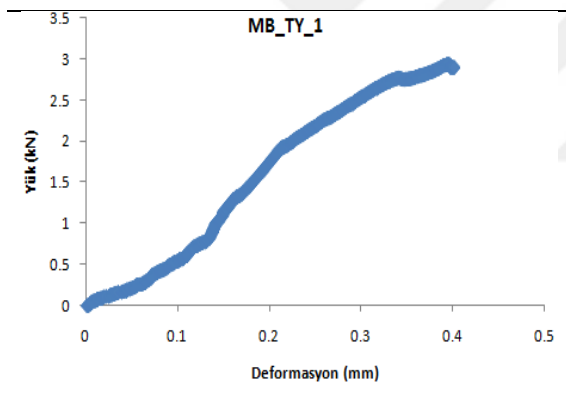
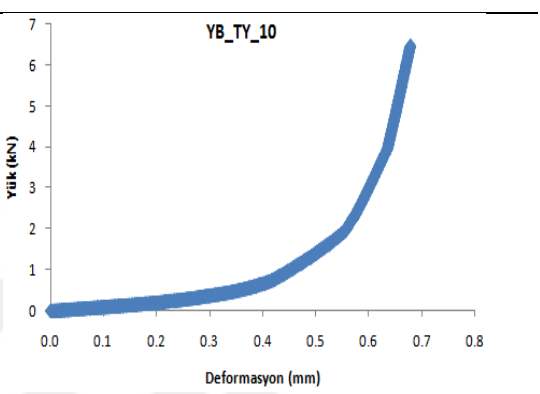
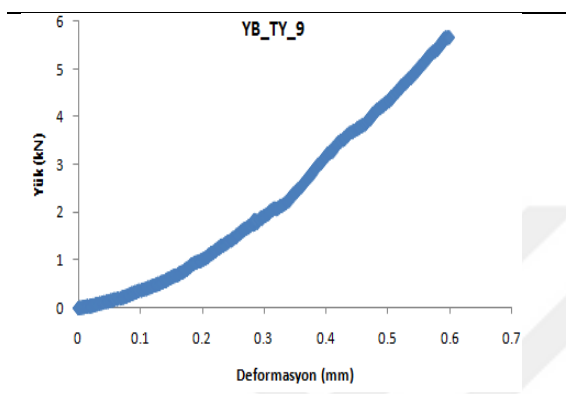
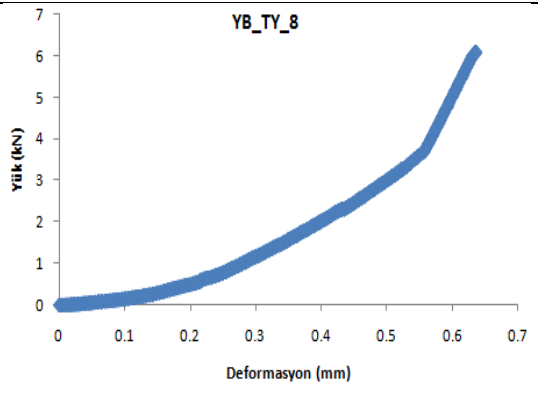
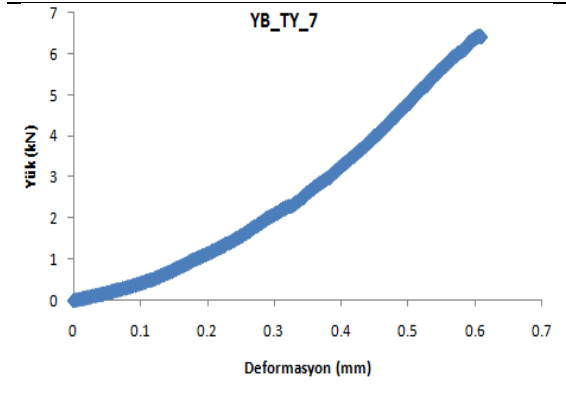


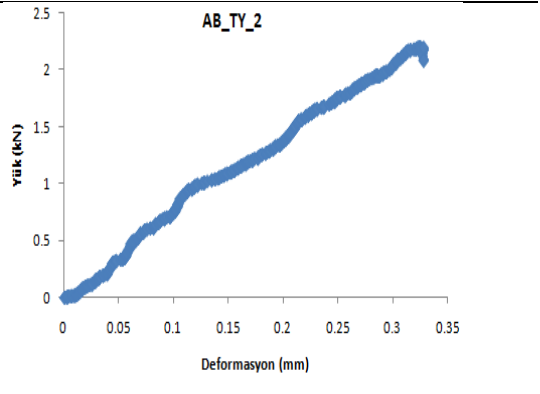
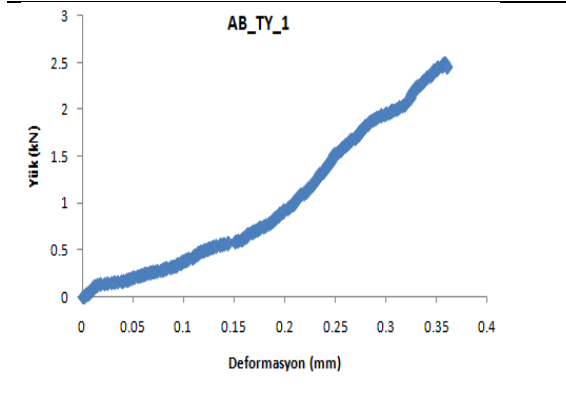
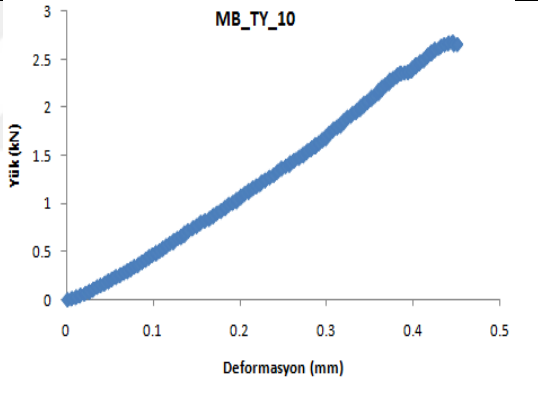
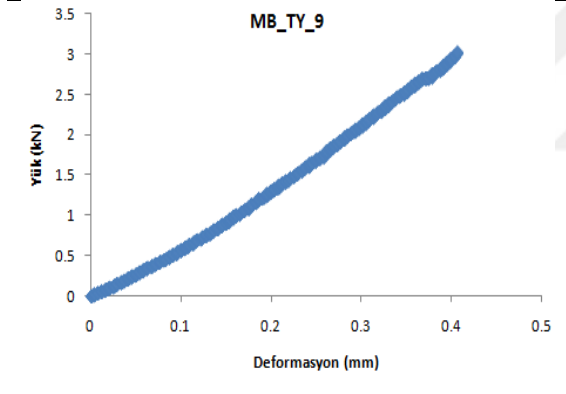
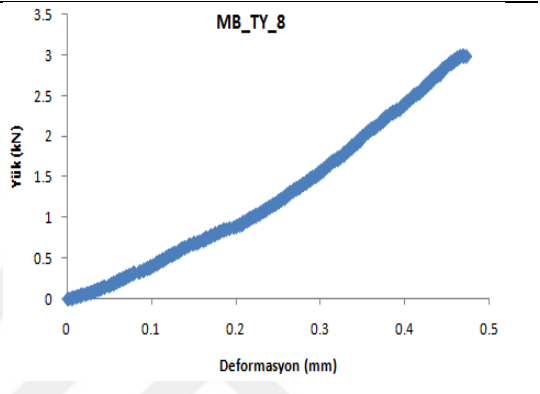
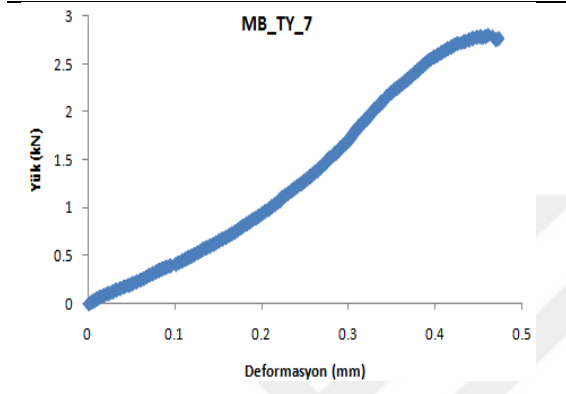
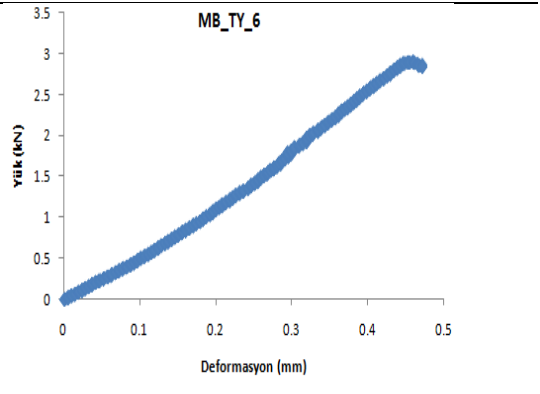
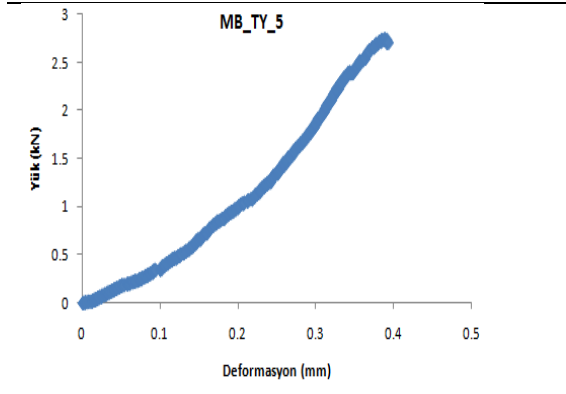


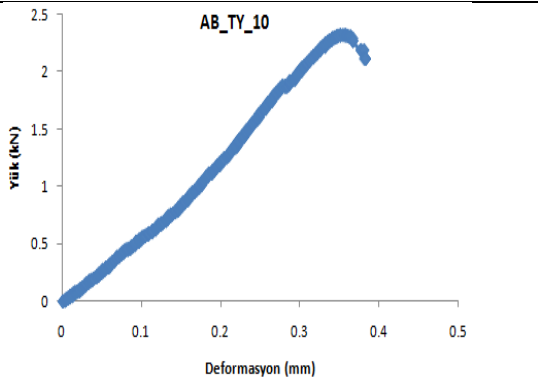
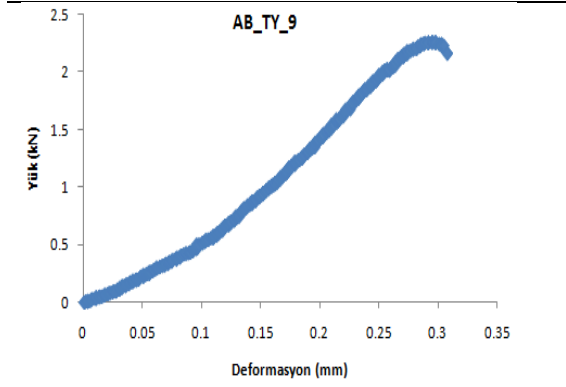
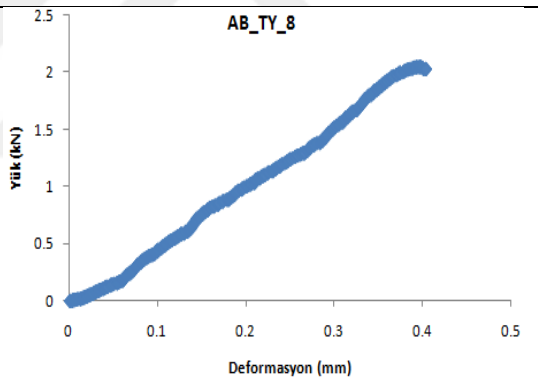
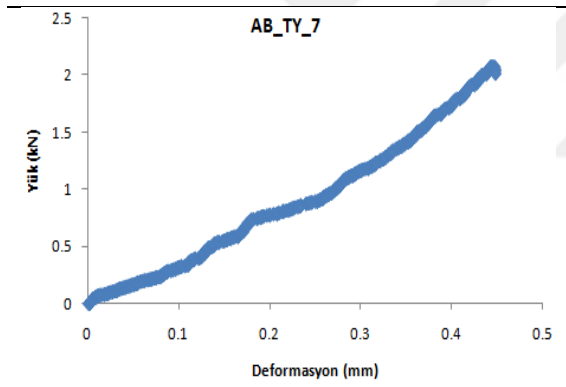
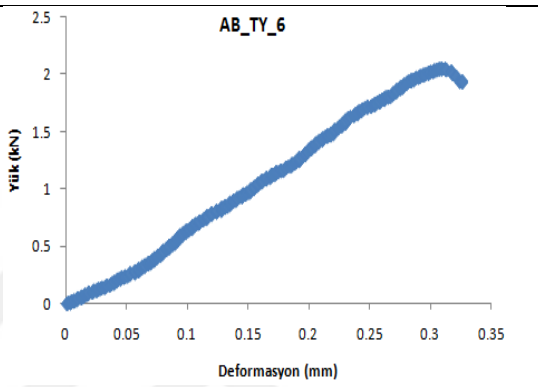
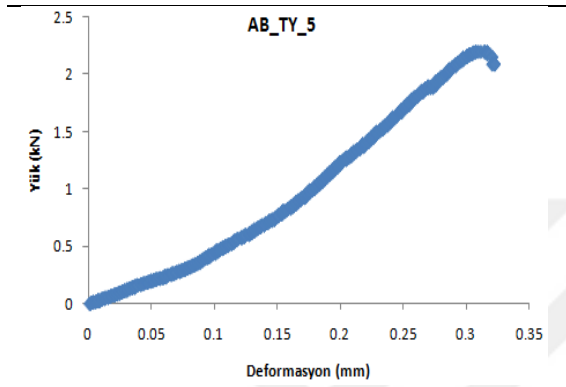
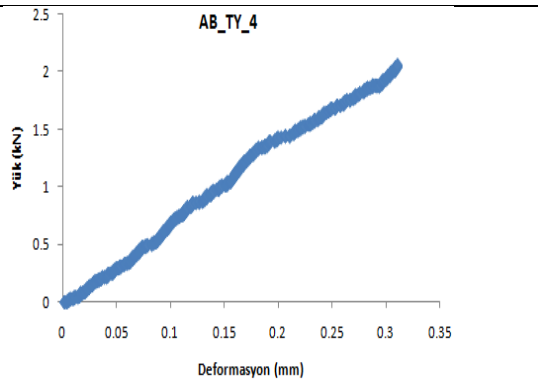
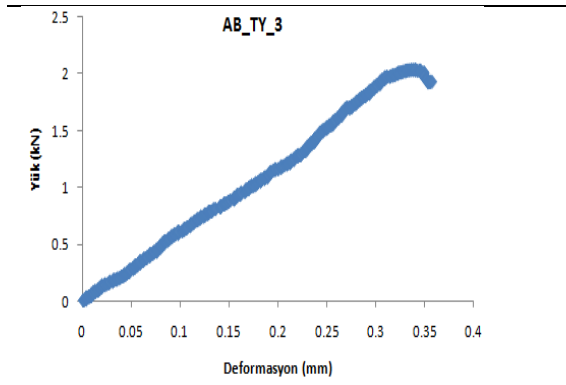












## EK 2. İstatistiksel çalışmalarda kullanılan veriler

### Kuru haldeki istatistiksel çalışmada kullanılan veriler

Numune	UCS	BT	PL	VP	VS	SH	Kıc
YB_KR_1	134,35	8,51	10,25	6,149	4,166	47,6	2,229
YB_KR_2	130,00	8,20	9,21	6,092	4,028	47,6	2,054
YB_KR_3	137,34	8,84	10,67	6,175	3,928	48,6	2,665
YB_KR_4	132,25	8,73	8,94	6,089	3,724	47,2	2,312
YB_KR_5	125,68	8,16	8,76	6,005	4,150	47,0	2,154
MB_KR_1	89,52	5,80	5,74	6,191	3,899	43,4	1,304
MB_KR_2	95,58	6,13	6,36	6,254	3,936	44,2	1,315
MB_KR_3	103,29	6,30	6,61	6,467	4,211	45,2	1,334
MB_KR_4	93,92	5,94	6,08	6,051	4,002	44,4	1,356
MB_KR_5	96,80	6,20	5,82	6,118	4,039	44,4	1,279
AB_KR_1	49,62	4,95	3,43	3,687	2,480	30,4	1,136
AB_KR_2	55,72	5,25	3,83	3,770	2,444	30,8	1,286
AB_KR_3	54,67	5,19	3,60	3,684	2,387	30,6	1,250
AB_KR_4	56,15	5,09	3,86	3,764	2,504	31,2	1,315
AB_KR_5	49,90	4,95	3,35	3,729	2,425	30,2	1,259

### Doymun haldeki istatistiksel çalışmada kullanılan veriler

Numune	UCS	BT	PL	VP	VS	SH	Kıc
YB_DY_1	142,1	8,20	9,85	6,397	4,208	45,2	2,353
YB_DY_2	112,8	6,78	8,60	6,307	4,055	43,8	2,068
YB_DY_3	110,6	7,26	8,54	6,081	3,709	43,8	2,095
YB_DY_4	130,2	7,89	8,34	6,121	3,888	44,4	2,093
YB_DY_5	135,6	7,85	9,58	6,340	4,122	44,6	2,098
MB_DY_1	77,3	4,72	4,65	6,284	4,154	40,0	0,870
MB_DY_2	78,5	4,60	4,42	6,385	4,034	40,4	0,850
MB_DY_3	77,3	4,65	4,54	6,341	3,999	40,0	0,905
MB_DY_4	67,9	4,09	3,91	6,379	4,086	39,0	0,798
MB_DY_5	74,9	4,62	4,21	6,365	3,976	39,4	0,832
AB_DY_1	45,5	4,10	3,15	3,760	2,558	26,8	0,891
AB_DY_2	44,4	4,20	3,20	3,745	2,462	26,6	0,893
AB_DY_3	47,9	4,31	3,21	3,823	2,513	27,2	0,871
AB_DY_4	43,1	3,93	3,18	3,732	2,511	26,4	0,856
AB_DY_5	42,3	4,08	3,13	3,656	2,418	26,0	0,871



Donmuş haldeki istatistiksel çalışmada kullanılan veriler

Numune	UCS	BT	PL	VP	VS	SH	Kıc
YB_DN_1	137,6	9,67	10,65	6,308	4,389	49,6	2,231
YB_DN_2	138,2	9,32	10,22	6,728	4,573	49,8	2,115
YB_DN_3	125,1	8,43	8,58	6,166	4,071	48,8	2,010
YB_DN_4	128,6	8,32	9,62	6,097	3,992	49,0	2,193
YB_DN_5	134,0	9,37	9,93	6,426	4,355	49,4	2,340
MB_DN_1	104,7	6,74	5,92	6,578	4,158	47,2	1,577
MB_DN_2	100,1	6,46	5,92	6,470	3,993	47,0	1,605
MB_DN_3	112,5	7,34	6,26	6,861	4,188	47,6	1,622
MB_DN_4	108,1	6,65	6,20	6,555	4,253	47,4	1,605
MB_DN_5	95,7	6,31	5,84	6,229	3,860	46,6	1,515
AB_DN_1	56,5	5,57	3,78	3,840	2,557	33,2	1,266
AB_DN_2	58,7	5,84	3,80	4,048	2,673	33,4	1,400
AB_DN_3	58,0	5,81	3,81	4,035	2,606	33,4	1,362
AB_DN_4	54,6	5,63	3,84	3,844	2,590	33,0	1,300
AB_DN_5	52,6	5,31	3,71	4,002	2,629	32,8	1,295

Termal şok haldeki istatistiksel çalışmada kullanılan veriler

Numune	UCS	BT	PL	VP	VS	SH	Kıc
YB_TS_1	134,16	8,10	8,79	6,160	4,080	45,0	2,262
YB_TS_2	114,96	6,89	8,49	6,133	4,005	43,4	2,060
YB_TS_3	128,80	7,65	8,88	5,996	3,874	44,4	2,111
YB_TS_4	110,34	6,69	9,23	5,763	3,641	43,0	1,907
YB_TS_5	114,40	6,98	8,25	5,962	3,765	43,4	2,202
MB_TS_1	60,01	4,46	4,28	5,672	3,732	37,6	0,679
MB_TS_2	69,36	4,47	4,67	5,786	3,748	38,2	0,714
MB_TS_3	70,27	4,75	4,54	5,829	3,850	38,6	0,723
MB_TS_4	66,57	4,45	4,04	5,678	3,752	38,0	0,688
MB_TS_5	74,07	5,08	4,11	5,797	3,962	39,2	0,838
AB_TS_1	44,32	4,22	3,02	3,362	2,227	26,2	0,806
AB_TS_2	42,19	4,19	3,13	3,234	2,227	25,6	0,613
AB_TS_3	43,98	4,21	3,01	3,339	2,242	26,0	0,745
AB_TS_4	41,05	4,19	2,89	3,301	2,255	25,2	0,776
AB_TS_5	40,48	4,03	2,97	3,289	2,269	24,8	0,724

Termal yaşlandırma haldeki istatistiksel çalışmada kullanılan veriler

Numune	UCS	BT	PL	VP	VS	SH	Kıc
YB_TY_1	125,36	8,23	8,48	6,021	3,900	45,4	2,054
YB_TY_2	121,86	8,16	8,52	6,050	3,945	45,0	2,047
YB_TY_3	133,74	8,50	8,89	6,061	3,910	46,2	2,219
YB_TY_4	135,21	8,58	9,04	6,141	3,892	46,4	2,304
YB_TY_5	116,67	7,93	8,20	5,945	3,679	44,8	2,049
MB_TY_1	76,31	5,26	4,95	6,100	3,841	41,2	0,997
MB_TY_2	90,93	5,63	5,31	6,201	3,950	42,2	1,076
MB_TY_3	89,53	5,58	5,15	6,240	3,890	42,0	1,040
MB_TY_4	72,94	5,10	4,92	6,032	3,887	41,0	0,950
MB_TY_5	71,46	5,67	4,83	5,730	3,733	40,8	0,958
AB_TY_1	46,89	4,76	3,38	3,673	2,401	27,6	0,810
AB_TY_2	52,97	4,91	3,44	3,629	2,371	28,2	0,926
AB_TY_3	47,06	4,62	3,33	3,667	2,386	27,8	0,796
AB_TY_4	44,33	4,58	3,34	3,694	2,411	27,4	0,922
AB_TY_5	43,84	4,38	3,31	3,643	2,384	27,0	0,839

### EK 3. Çoklu regresyon analiz çıktıları

#### 1 nolu eşitlik için

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3,280	1	3,280	141,330	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,302	13	,023		
	Total	3,582	14			
2	Regression	3,463	2	1,731	174,301	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,119	12	,010		
	Total	3,582	14			

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,506	,183		-2,766	,016
	BT	,324	,027	,957	11,888	,000
2	(Constant)	-,271	,131		-2,065	,061
	BT	,398	,025	1,176	16,023	,000
	VS	-,207	,048	-,315	-4,287	,001

a. Dependent Variable: Kır

#### 2 nolu eşitlik için

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2,604	1	2,604	34,629	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,978	13	,075		
	Total	3,582	14			
2	Regression	3,442	2	1,721	147,596	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,140	12	,012		
	Total	3,582	14			

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,412	,217		1,902	,080
	UCS	,013	,002	,853	5,885	,000
2	(Constant)	1,454	,150		9,718	,000
	UCS	,026	,002	1,709	14,728	,000
	VS	-,646	,076	-,984	-8,476	,000

a. Dependent Variable: Kic

**3 nolu eşitlik için****ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3,001	1	3,001	67,166	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,581	13	,045		
	Total	3,582	14			
2	Regression	3,474	2	1,737	193,990	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,107	12	,009		
	Total	3,582	14			

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,460	,151		3,041	,009
	PL	,180	,022	,915	8,195	,000
2	(Constant)	1,229	,126		9,787	,000
	PL	,273	,016	1,389	16,913	,000
	VS	-,392	,054	-,597	-7,271	,000

a. Dependent Variable: Kic

**4 nolu eşitlik için****ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4,565	1	4,565	63,002	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,942	13	,072		
	Total	5,507	14			
2	Regression	5,270	2	2,635	133,514	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,237	12	,020		
	Total	5,507	14			

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,021	,179		-,118	,908
	UCS	,016	,002	,910	7,937	,000
2	(Constant)	,980	,192		5,108	,000
	UCS	,023	,002	1,328	14,438	,000
	VS	-,456	,076	-,550	-5,977	,000

a. Dependent Variable: Kic

**5 nolu eşitlik için**ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5,218	1	5,218	234,667	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,289	13	,022		
	Total	5,507	14			
2	Regression	5,452	2	2,726	591,665	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,055	12	,005		
	Total	5,507	14			

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,011	,092		,117	,909
	PL	,232	,015	,973	15,319	,000
2	(Constant)	,565	,088		6,396	,000
	PL	,273	,009	1,142	30,535	,000
	VS	-,221	,031	-,267	-7,123	,000

a. Dependent Variable: Kic

**6 nolu eşitlik için**ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1,683	1	1,683	70,532	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,310	13	,024		
	Total	1,993	14			
2	Regression	1,929	2	,965	181,958	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,064	12	,005		
	Total	1,993	14			

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,672	,128		5,245	,000
	UCS	,010	,001	,919	8,398	,000
2	(Constant)	1,253	,104		11,999	,000
	UCS	,019	,001	1,650	13,869	,000
	VP	-,249	,036	-,811	-6,819	,000

a. Dependent Variable: Kic

**7 nolu eşitlik için**ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5,659	1	5,659	94,083	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,782	13	,060		
	Total	6,441	14			
2	Regression	6,227	2	3,114	174,836	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,214	12	,018		
	Total	6,441	14			

Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,240	,160		-1,497	,158
	UCS	,019	,002	,937	9,700	,000
2	(Constant)	,488	,156		3,135	,009
	UCS	,026	,002	1,331	15,248	,000
	VP	-,265	,047	-,493	-5,649	,000

a. Dependent Variable: Kic

**8 nolu eşitlik için**

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5,871	1	5,871	133,944	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,570	13	,044		
	Total	6,441	14			
2	Regression	6,099	2	3,049	106,777	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,343	12	,029		
	Total	6,441	14			
3	Regression	6,310	3	2,103	176,304	,000 <sup>d</sup>
	Residual	,131	11	,012		
	Total	6,441	14			

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,172	,130		-1,330	,206
	PL	,254	,022	,955	11,573	,000
2	(Constant)	,282	,192		1,469	,168
	PL	,308	,026	1,156	11,852	,000
	VP	-,148	,052	-,275	-2,820	,015
3	(Constant)	,081	,133		,608	,555
	PL	,313	,017	1,176	18,604	,000
	VP	-1,041	,215	-1,938	-4,845	,001
	VS	1,390	,330	1,659	4,210	,001

a. Dependent Variable: Kic

**9 nolu eşitlik için**

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4,395	1	4,395	100,567	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,568	13	,044		
	Total	4,963	14			
2	Regression	4,836	2	2,418	228,531	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,127	12	,011		
	Total	4,963	14			

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,044	,147		-,296	,772
	UCS	,016	,002	,941	10,028	,000
2	(Constant)	,706	,137		5,157	,000
	UCS	,023	,001	1,346	17,285	,000
	VP	-,255	,040	-,503	-6,457	,000

a. Dependent Variable: Kic

**10 nolu eşitlik için****ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4,723	1	4,723	256,636	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,239	13	,018		
	Total	4,963	14			
2	Regression	4,945	2	2,473	1705,125	,000 <sup>c</sup>
	Residual	,017	12	,001		
	Total	4,963	14			

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,110	,097		-1,141	,274
	PL	,254	,016	,976	16,020	,000
2	(Constant)	,422	,051		8,298	,000
	PL	,316	,007	1,212	47,260	,000
	VS	-,262	,021	-,317	-12,369	,000

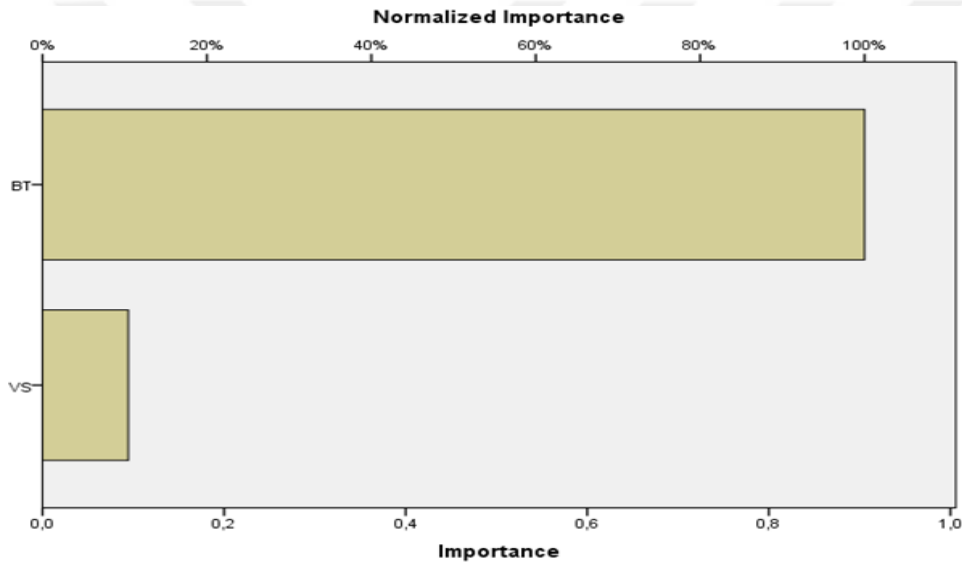
a. Dependent Variable: Kic



## EK 4. Yapay sinir ağı çıktıları

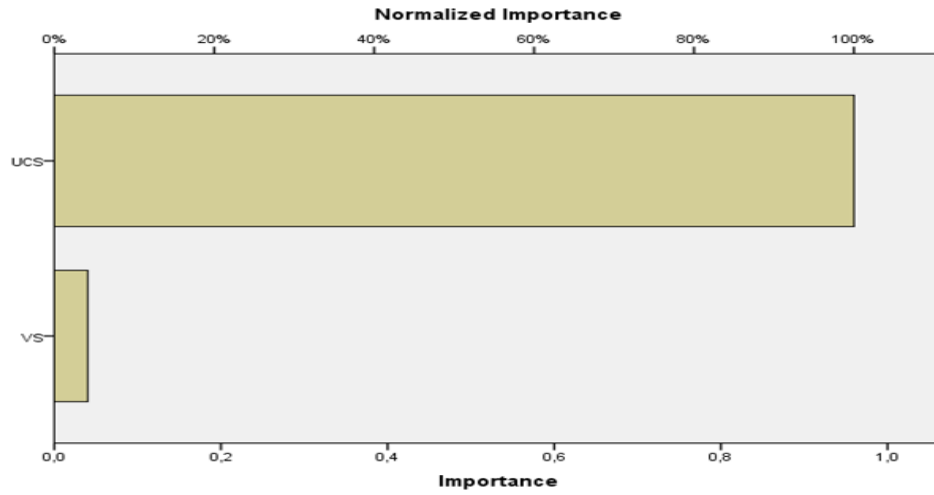
### 1 nolu eşitlik için

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
		2	BT
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



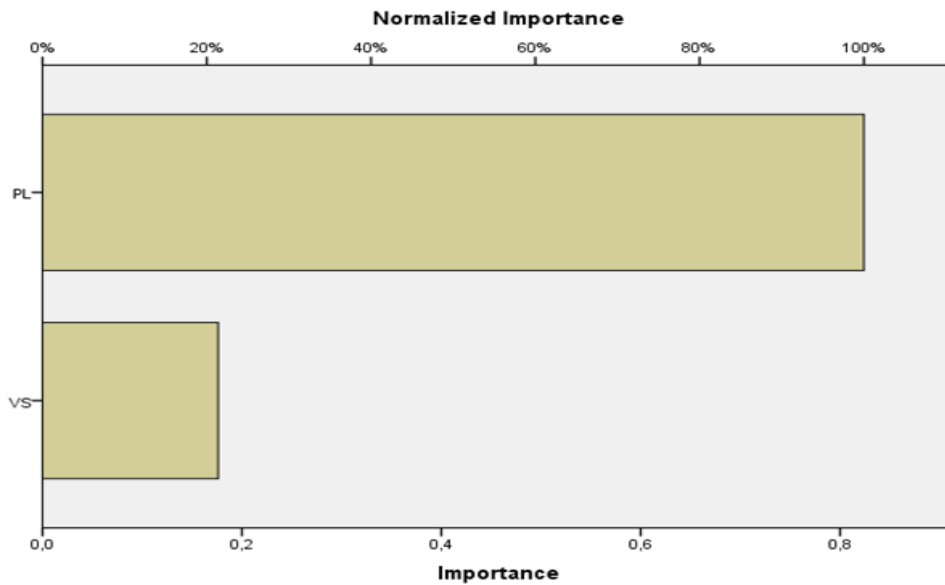
### 2 nolu eşitlik için

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
		2	UCS
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



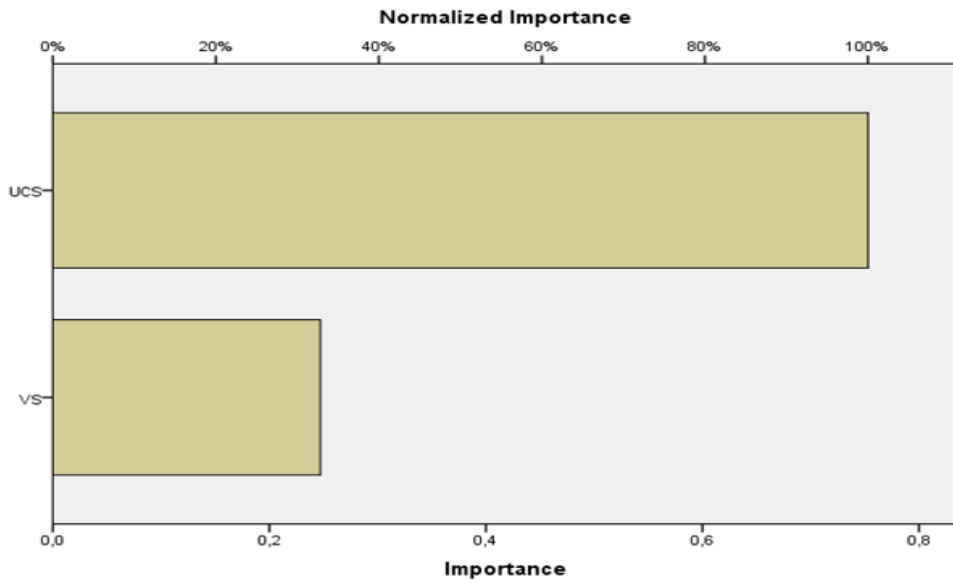
**3 nolu eşitlik için**

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
	Number of Units <sup>a</sup>	2	PL
	Rescaling Method for Covariates		Standardized
Hidden Layer(s)	Number of Hidden Layers		2
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



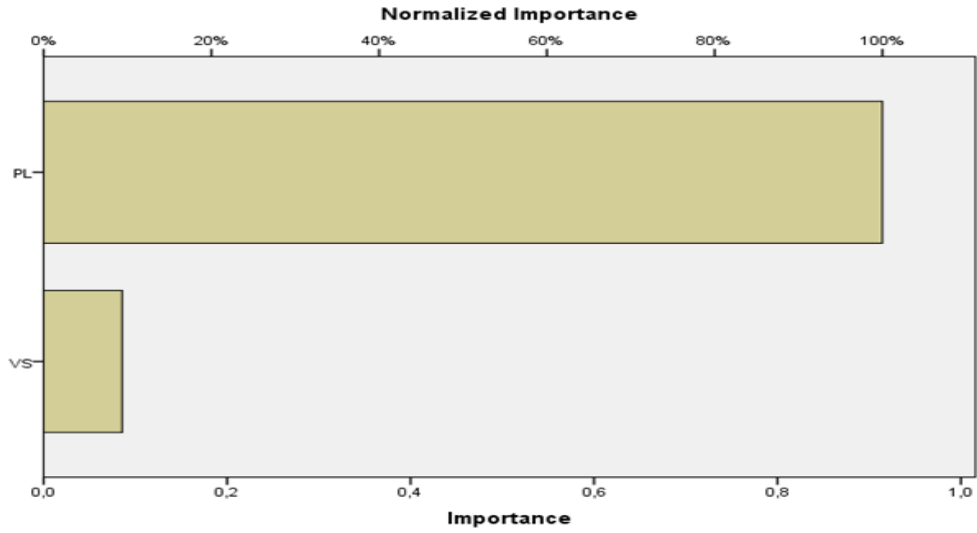
**4 nolu eşitlik için**

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
		2	UCS
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		2
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



**5 nolu eşitlik için**

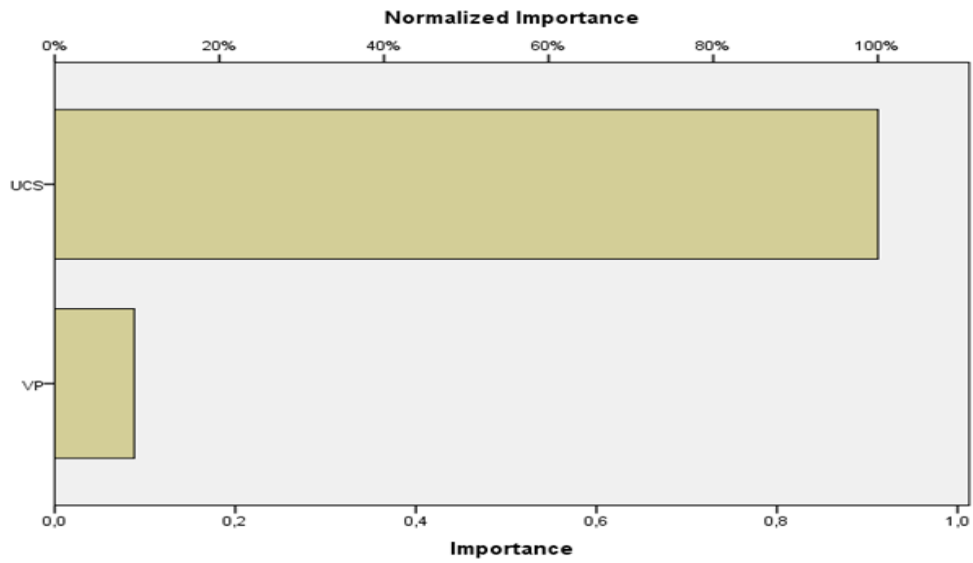
Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
		2	PL
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		2
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



**6 nolu eşitlik için**

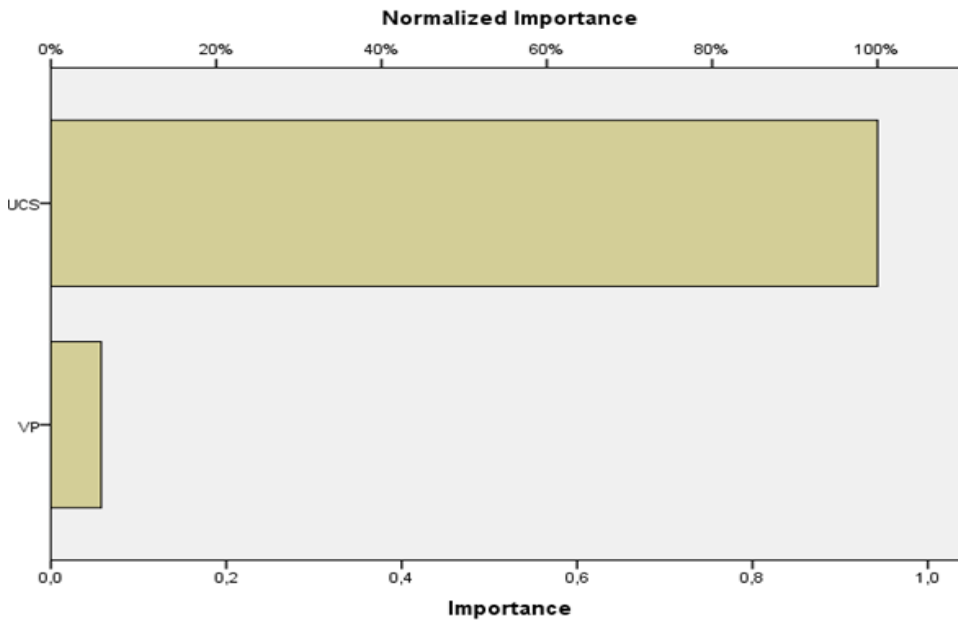
**Network Information**

Input Layer	Covariates	1	VP
		2	UCS
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kıc
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



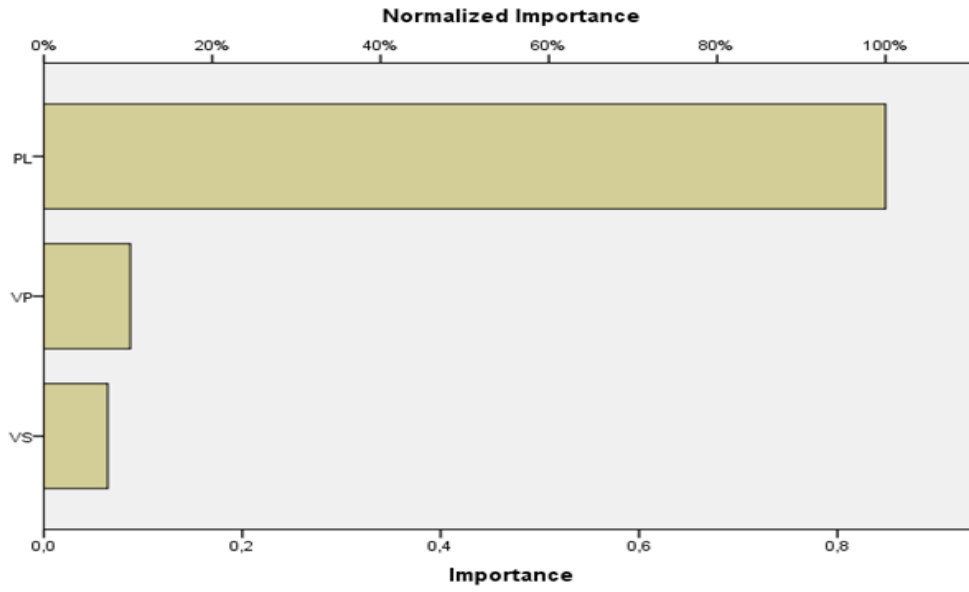
**7 nolu eşitlik için**

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VP
		2	UCS
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



**8 nolu eşitlik için**

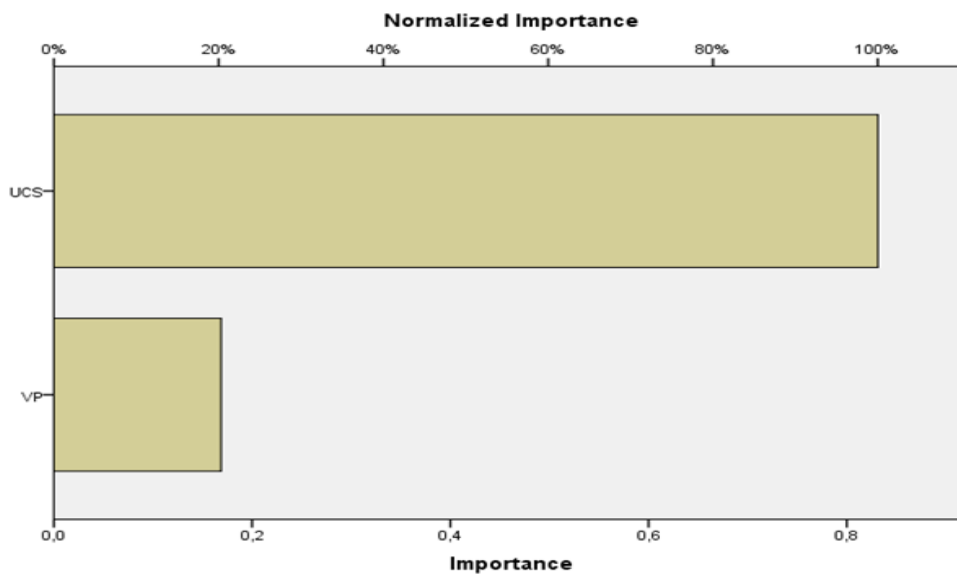
Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VP
		2	PL
	Number of Units <sup>a</sup>	3	VS
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



*9 nolu eşitlik için*

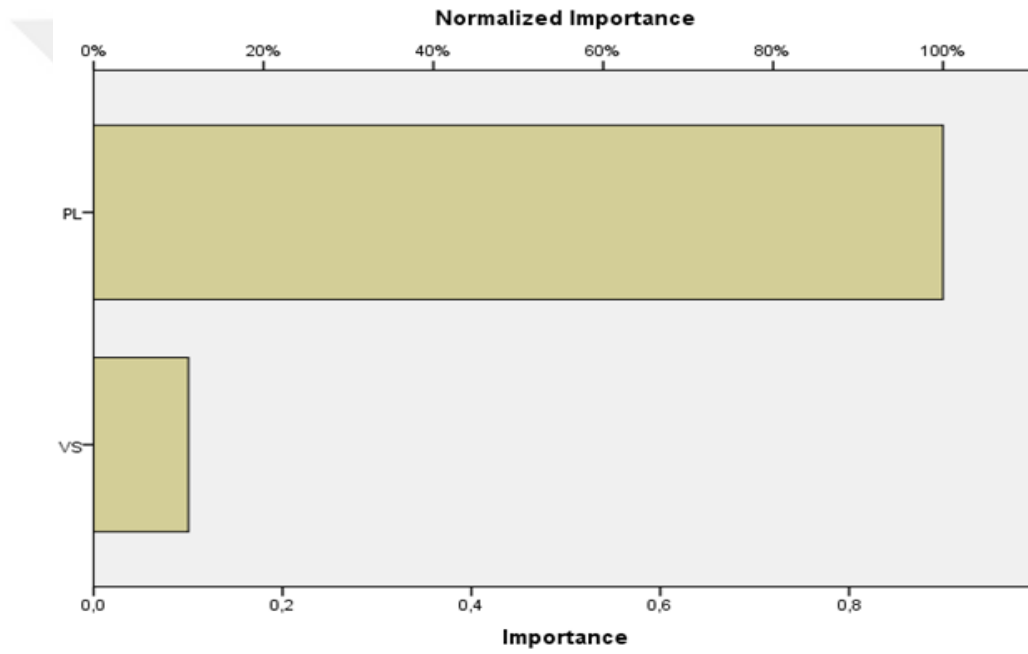
**Network Information**

Input Layer	Covariates	1	VP
	Number of Units <sup>a</sup>	2	UCS
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		2
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		1
	Activation Function		2
Output Layer	Dependent Variables	1	Hyperbolic tangent
	Number of Units		Kic
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		1
	Error Function		Identity
			Sum of Squares



*10 nolu eşitlik için*

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	VS
		2	PL
	Number of Units <sup>a</sup>		2
Hidden Layer(s)	Rescaling Method for Covariates		Standardized
	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		2
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	Kic
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Engin ÖZDEMİR

**Doğum Yeri:** Kangal-SİVAS

**Adres:** İnönü Üniversitesi, Merkez Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

**E-Posta:** ozdemir.engin@inonu.edu.tr

**Lisans:** İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği (2008-2012)

**Yüksek Lisans:** İnönü Üniversitesi FBE Maden Mühendisliği ABD (2012-2014)

**Doktora:** İnönü Üniversitesi FBE Maden Mühendisliği ABD (2014-2020)

### Akademik Çalışmalar:

- 5 Bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak görev almıştır.
- 1 Kitap (yüksek lisansdan çevrilmiş) ve 1 kitap bölümü bulunmaktadır.
- 3 SCI dergi kapsamında yayımlanmış makelesi bulunmaktadır.
- 1 Alan indeks dergi kapsamında yayımlanmış makelesi bulunmaktadır.
- 5 Ulusal hakemli dergi kapsamında yayımlanmış makelesi bulunmaktadır.
- 16 Uluslararası tam metin bildirisi (ISBN numaralı) bulunmaktadır.

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi (2012-2020 )