

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEKRARLI YÜKLEMENİN TEFRİT KAYACININ DAYANIMI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Müh. Melek Hanım BEŞER

**OCAK 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Tekrarlı Yüklemelere Maruz Kalan Kayaçların Yorulma Davranışının Kayaçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez çalışmasında FYL-2016-5658 numaralı ve FHD-2016-5519 numaralı K.T.Ü. B.A.P. projelerinin olanak ve imkânlarından yararlanılmıştır. Verilen destekten dolayı K.T.Ü. B.A.P birimine teşekkür ederim. Öncelikle yüksek lisans öğrenimim süresince, bilgisi ve tecrübesini esirgemeyen gerek konu seçimimde gerekse de deneysel çalışmalarım süresince her zaman yardımcı olan danışman hocam Doç. Dr. Kerim AYDINER’e en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda yardımını esirgemeyen mesai arkadaşım Arş. Gör. Serkan İNAL’a çok teşekkür ederim. Ayrıca tez süreci boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Arş. Gör. Serdar YAŞAR, Arş. Gör. Özüm YAŞAR ve Arş Gör. Elif YILMAZ’a teşekkürü bir borç bilirim. İnce kesit incelemesindeki yardımlarından dolayı Arş Gör. Murat KARAHAN’a teşekkürlerimi sunarım. DOLI programının temini ve kullanılması konusunda destek olan BESMAK Malzeme ve Test Makineleri şirketine teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezim süresince bana yardımcı olan sevgili ablam Esra ATEŞ’e ve manevi desteğini esirgemeyen kız kardeşim Sümeyye ATEŞ’e çok teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarımda bana çok yardımcı olan ve tezimin bütün sürecinde desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Musa BEŞER’e sonsuz teşekkür ederim. Son olarak da bu güne kadar benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, her konuda bana destek olan sevgili aileme teşekkürlerimi bildiririm.

Melek Hanım BEŞER

Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tekrarlı Yüklemelere Maruz Kalan Kayaçların Yorulma Davranışının Kayaçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Kerim AYDINER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.10/01/2017

Melek Hanım BEŞER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Önceki Çalışmalar	4
1.3. Tezin Amacı	9
1.4. Tezin Organizasyonu.....	10
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	11
2.1. Çalışma Programı	11
2.2. Malzeme	12
2.2.1. Kayacın Fiziko-Mekanik Özellikleri	14
2.2.1.1.Yoğunluk Deneyi.....	15
2.2.1.2.Görünür Porozite ve Su Emme Oranı Tayini	16
2.2.1.3.Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi.....	18
2.2.1.4.Elastisite Modülü Deneyi	21
2.2.1.5.Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi (Brazilian Yöntemi)	22
2.2.2. Tekrarlı Yükleme Deneyleri.....	24
2.3. Deney Tasarımı.....	25
2.3.1. Yük	25
2.3.2. Frekans	27
2.3.3. Tekrar Sayısı.....	28
2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)Analizi.....	29

3.	BULGULAR	31
3.1.	Yük Değişimi.....	31
3.2.	Frekans Değişimi.....	32
3.3.	Tekrar Sayısı Değişimi	33
4.	İRDELEME	35
4.1.	Tek Eksenli Basınç Dayanımının İrdelenmesi	35
4.2.	Tekrarlı Yükleme Deneylelerinin İrdelenmesi	35
4.2.1.	Yükün Dayanım Üzerindeki Etkisi	35
4.2.2.	Frekansın Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	37
4.2.3.	Tekrar Sayısının Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	39
4.3.	SEM Analiz Sonuçları	41
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	46
6.	KAYNAKÇA	48
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TEKRARLI YÜKLEMENİN TEFRİT KAYACININ DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Melek Hanım BEŞER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Kerim AYDINER
2017, 51 Sayfa

Bu tez çalışmasında ticari adı Trabzon taşı olan kayacın tekrarlı yükleme koşulları altında yenilme davranışı irdelenmiştir. Çalışmada yük, frekans ve tekrar sayısı olarak üç farklı değişkenin kayacın dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her değişken için deney grupları oluşturulmuş ve oluşturulan bu gruplarda yalnızca bir parametre değişken olarak kullanılmıştır. Kayacın suya doygun hali için de benzer çalışmalar gerçekleştirilmiş ve iki durum karşılaştırılarak suyun kayacın yorulma koşullarında yenilme davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Çalışmalara ek olarak tekrarlı yükleme deneyleri uygulandıktan sonra numunelerden kesitler alınarak SEM analizleri yapılmış ve alınan görüntüler ile kayacın yorulma davranışı ve yorulma mekanizması yorumlanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda artan yük ve azalan frekansla kayacın tek eksenli basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca tekrar sayısındaki artışın kayacın dayanımının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Doygun durumdaki kayalara uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda ise suyun kayacın dayanımını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Doygun durumdaki kayalar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda parametrik değişimlerle dayanım arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Tekrarlı yükleme, Yük, Frekans, Tekrar sayısı.

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF CYCLIC LOADING ON THE STRENGTH OF TEPHRITE ROCK

Melek Hanım BEŞER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Kerim AYDINER
2017, 51 Pages

In this thesis, the rock which is known as Trabzon stone in market was subjected to cyclic loading experiments to investigate the deformation mechanism under fatigue loading conditions. In this study, the effects of different variables used as load, frequency and number of cycles on the strength of the rock were analyzed. Experiment groups were developed for each variable and in each group; only one parameter was variable while others kept fixed. Similar studies were carried out for the saturated rocks and the effect of water on behavior of rock was investigated by comparing these two cases. In addition to these studies, after cyclic loading experiments, sections were taken from the samples and SEM analyzes were performed. In this way, fatigue mechanism of the rock tried to be interpreted with images taken. In the result of this work, it has been founded that the uniaxial compressive strength of the rock decreases with increasing load and decreasing frequency. Also, it was determined that the increase in the number of cycles caused a decrease in the strength. When cyclic loading tests are applied to the rocks in the saturated condition, it is seen that the water reduces the strength of the rock but it is founded that there is no significant relationship between the applied three parameters and the load.

Key Words: Fatigue, Cyclic loading, Load, Frequency, Number of cycles.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Tekrarlı yükleme görünümü (Singh, 1989; Khanlari ve Momeni, 2015)	3
Şekil 1.2. Dalga boyları görünümü.....	3
Şekil 2.1 Tezde yapılan çalışmaların akım şeması	11
Şekil 2.2. İnce kesit görünümü	12
Şekil 2.3. Tefrit taşının mikroskoptaki görünümleri (Pir: Piroksen, Pl: Plajiyoklas, Amf: Amfibol, Biy: Biyotit, Ze: Zeolit, Lö: Lössit, Oj: Ojit, O: Opak mineral)	13
Şekil 2.4. Karot alma makinesi.....	14
Şekil 2.5. Karot kesme ve düzeltme makinesi.....	14
Şekil 2.6. Yoğunluk deneyi numuneleri	15
Şekil 2.7. Tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan cihaz	18
Şekil 2.8. Örnek numuneler ve deney sonrası kırılan numune	19
Şekil 2.9. Kompresmetre ve LVDT'ler	21
Şekil 2.10. Elastisite belirlemede yazılım görüntüsü	22
Şekil 2.11. Deney aparatı ve deney sonrası numune görünümü.....	23
Şekil 2.12. Tekrarlı yükleme düzeneği.....	25
Şekil 2.13. Tekrarlı yükleme yük değişimi grafiği (Rmax: Yenilme yükünün %40)	26
Şekil 2.14. Tekrarlı yükleme frekans grafiği	28
Şekil 2.15. 50 tekrar sayısı için kaydedilen grafik	29
Şekil 2.16. Analizlerde kullanılan SEM cihazı.....	30
Şekil 3.1. Deney sonrası numune görüntüleri	31
Şekil 4.1. Yük ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için)	36
Şekil 4.2. Yük ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğgun durum için)	37
Şekil 4.3. Frekans ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için)....	38
Şekil 4.4. Frekans ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğgun durum için). 39	
Şekil 4.5. Tekrar sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için).....	40
Şekil 4.6. Tekrar sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğgun durum için).....	41
Şekil 4.7. Yenilme Yüzeyi.....	42
Şekil 4.8. Statik yüklemeler altında kayacın yenilme yüzeyinin SEM görüntüsü	43
Şekil 4.9. Tekrarlı yüklemeler altında kayacın yenilme yüzeyinin SEM görüntüsü (F2 deney grubu numunesi)	44

Şekil 4.10. Suya doygun kayaçlarda tekrarlı yüklemelere maruz kalan kayaçların yenilme yüzeylerinin SEM görüntüleri (F2 deney grubu numunesi)..... 45



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Yoğunluk deney sonuçları.....	16
Tablo 2.2. Görünür porozite ve ağırlıkça su emme oranı sonuçları	18
Tablo 2.3. Kayacın doğal hali için tek eksenli basınç dayanımı sonuçları.....	20
Tablo 2.4. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımına göre sınıflandırılması	20
Tablo 2.5. Kayacın doymuş hali için tek eksenli basınç dayanımı sonuçları.....	20
Tablo 2.6. Elastisite modülü sonuçları	22
Tablo 2.7. Dolaylı çekme dayanımı sonuçları	24
Tablo 2.8. Yük değişimi altında deney parametreleri	26
Tablo 2.9. Frekans değişimi altında deney parametreleri.....	28
Tablo 2.10. Tekrar sayısı değişimi altında deney parametreleri.....	29
Tablo 3.1. Tekrarlı yükleme durumu için yük değişkeni altında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları (Doğal durum için).....	32
Tablo 3.2. Tekrarlı yükleme durumu için yük değişkeni altında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları (Doymuş durum için).....	32
Tablo 3.3. Tekrarlı yükleme durumu için frekans değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doğal durum için).....	33
Tablo 3.4. Tekrarlı yükleme durumu için frekans değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doymuş durum için).....	33
Tablo 3.5. Tekrarlı yükleme durumu için tekrar sayısı değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doğal durum için).....	34
Tablo 3.6. Tekrarlı yükleme durumu için tekrar sayısı değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doymuş durum için).....	34

SEMBOLLER DİZİNİ

A_w	:	Ağırlıkça Su Emme Oranı
H_w	:	Hacimce Su Emme Oranı
D	:	Örnek Çapı
e	:	Boşluk Oranı
f	:	Frekans
F	:	Yenilme Yüğü
L	:	Örnek Boyu
M_d	:	Doygun Ağırlık
M_k	:	Kuru Ağırlık
n	:	Görünür Porozite
T	:	Tekrar Sayısı
V	:	Örnek Hacmi
V_v	:	Boşlukların Hacmi
Y	:	Yük
σ_t	:	Çekme Dayanımı
σ_c	:	Tek Eksenli Basınç Dayanımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Tüneller, barajlar, yollar, köprüler ve her türden yeraltı yapılarının yapım aşamasında sonrasında statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu yüklerin başlıca kaynakları delme, patlatma, yükleme, mekanik kazılar ve yoğun araç trafiği gibi insan kaynaklı olmakla beraber deprem gibi doğal faktörler de başlıca kaynaklar olarak değerlendirilebilir (Haimson, 1978; Badge ve Petros, 2009; Momeni et al, 2015). Bir kaya kütesini etkileyen yükler kayacın davranışını etkiler. Yüklerin kayaç üzerinde nasıl bir etki bıraktığını anlamak, tünel ve yeraltı yapıları için oldukça önem arz etmektedir.

Kayaçların mekanik davranışları, dinamik ve statik yükler altında farklılıklar göstermektedir. Kayaçlardaki dinamik yenilmenin kaynağı şimdiye kadar tam olarak açıklanamamıştır. Özellikle de tekrarlı yüklemeler durumunda oluşan dinamik yüklerin kayaçların mekanik davranışları üzerindeki etkisi açıklığa kavuşmamıştır. Gerçekleştirilmiş olan önceki çalışmalar kayaçların statik yüklemelere kıyasla tekrarlı yüklemelerde daha düşük gerilmelerde yenilmeye uğradığını göstermiştir. Bu yüzden yeraltı yapıları tasarımı yapılırken olası yenilmelerin tahmininde dinamik yükleme koşullarının da dikkate alınması gereklidir (Xia et al, 2010). Açıklık tasarımında planlamanın doğru yapılabilmesi için tekrarlı yüklemelerin kayacın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Fakat tekrarlı yüklemeler altında her malzemenin farklı davranış gösterdiği bilinmektedir. Bazı kayaçlar daha sert ve sünek olurken bazı kayaçlar daha zayıf ve gevrek olabilmektedir (Stavrogin ve Tarasov, 2001).

Tekrarlı yüklemelere maruz kalan bazı kayaçlar statik dayanımlarından daha erken yenilmeye uğramaları yorulma olarak tanımlanır. (Burdine, 1963; Eraslan 2011). Yorulma hem statik hem de dinamik yükleme koşullarında gerçekleşebilir. Yenilmenin sabit yük altında zamana bağlı olarak gerçekleşmesi durumu statik yükleme olarak adlandırılır (Cruden, 1974). Kayaçların zamana bağlı olarak değişen yüke maruz kalmaları durumu ise dinamik yükleme olarak tanımlanır. Statik yükler üst katmanların ağırlığından (kaya yükü) ve tektonik gerilmelerden kaynaklanırken, dinamik yükler yakın civarda gerçekleştirilen patlatmalar ve benzeri etkilerden kaynaklanır (Li vd., 2009; Mirzamani vd., 2011).

Yorulma mekanizmasını daha iyi anlamak için yorulma gerilimi, yorulma dayanımı, uygulanan maksimum ve minimum gerilmeler, gerilme genliği, frekans ve tekrar sayısı terimlerinin açıklanması gereklidir. Bu terimler literatürde aşağıdaki gibi tanımlanır (Singh, 1989; Eraslan 2011).

Yorulma gerilmesi (Fatigue stress): Sonsuz tekrar sayısında kayacı tamamen tahrip etmeden uygulanan maksimum gerilmedir.

Yorulma dayanımı (Fatigue strength): Kayacın belli bir tekrardan sonra yorulma durumuna geçtiğindeki dayanımdır.

Uygulanan maksimum yük: Tekrarlı yükleme testi boyunca numuneye uygulanan maksimum yüküdür. Bu gerilme tek eksenli sıkışma dayanımının yüzdesi olarak ifade edilir (Şekil 1.1).

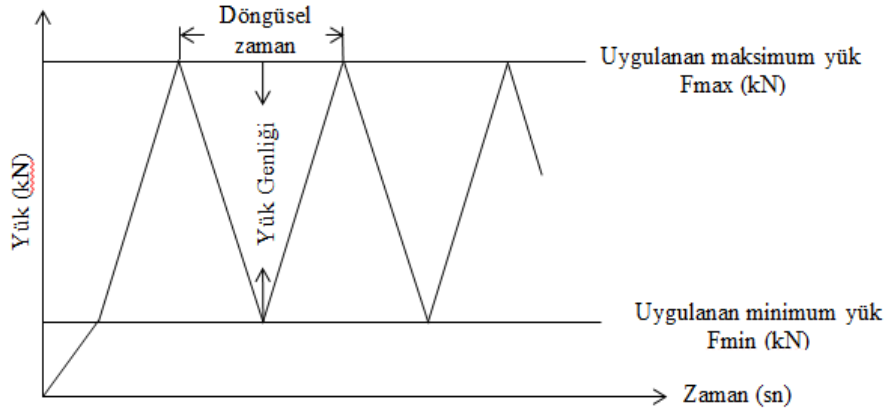
Uygulanan minimum yük: Tekrarlı yükleme döngüsünde en küçük yüküdür. Bu değer sıfırdan farklı bir değerdir (Şekil 1.1).

Yük genliği: Bir döngüde uygulanan maksimum ve minimum gerilmelerin ortalamasıdır (Şekil 1.1).

Tekrar sayısı (Number of cycles): Her bir numuneye uygulanan toplam tekrar sayısıdır.

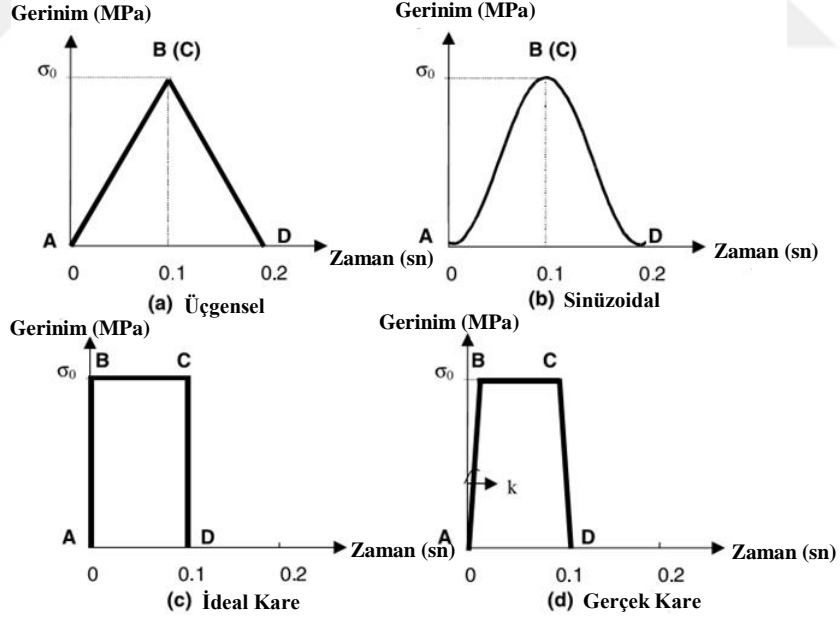
Frekans: Bir saniyedeki toplam devir sayısı olarak tanımlanır.

Yenilme deneyinde numune Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi belirli bir dalga boyunda yenilene kadar veya belirli bir tekrar sayısına kadar döngüsel biçimde belli bir yüke maruz bırakılır. Bu işlemten sonra yorulma mekanizmasının kayacın elastisite modülü, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri üzerine olan etkisi belirlenebilir.



Şekil 1.1. Tekrarlı yükleme görünümü (Singh, 1989; Khanlari ve Momeni, 2015)

Tekrarlı yüklemeleri belirleyen faktörlerinden biri de dalga boyunun şeklidir. Sinüsoidal, eğimli (üçgen biçimli), ve kare şeklinde olan bu üç farklı dalga boyu Şekil 1.2'de gösterilmektedir (Gongand, 2003; Badge ve Petros, 2005).



Şekil 1.2. Dalga boyları görünümü

1.2. Önceki Çalışmalar

Tekrarlı yüklemeler konusunu ilk çalışmalardan birisinde Burdin (1963) tek eksenli basınç dayanımı altında kum taşlarına yorulma testleri gerçekleştirmiş ve tekrarlı yüklemeler sonucunda tek eksenli basınç dayanımının %24 oranında azaldığını belirlemiştir. Hardy ve Chugh (1970) ise çalışmalarında granit, kumtaşı ve kireçtaşının tek eksenli basınç dayanımı altında yorulma dayanımlarını ve yorulma ömürlerini incelemiştir. Araştırmacılar deneylerde üçgenel dalga boyu modelini kullanmışlardır. Çalışmada, kayaçların yorulma dayanımlarının, tek eksenli basınç dayanımlarının %65-80'i civarında olduğu görülmüştür.

Haimson ve Kim (1971) iki çeşit mermer üzerinde tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirmiş ve kayaçların dayanımının yükleme oranı ile artış gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmada kayaçların yorulma dayanımları, statik basınç dayanımının %75-%80'i arasında değişim gösterdiği görülmüştür. Araştırmacılar, frekansın kayaçların yorulması üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirlemiştir. Haimson (1972, 1978) deformasyonları üzerinde tekrarlı yüklemelerin etkisini araştırmıştır. Yükleme frekansının 1 Hz olarak kullanıldığı deneylerde kayaçlar tek eksenli basınç ve çekme yüklemelerine maruz bırakılmışlardır. Araştırmada, kayaç dayanımının yorulma etkisi ile azaldığı belirlenmiştir. Tek eksenli basınç ve çekme dayanımlarındaki azalmanın sırası ile %60 ile %80 oranlarında olduğu belirtilmiştir.

Kayaçalarda yorulma konusunda Attawel ve Farmer (1973) beton ve kayalara tek eksenli sıkışma altında tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir ve statik dayanımlarının %50-70 oranlarında azaldığını belirlemiştir. Brown ve Hudson (1974), tekrarlı yükleme koşullarında sağlam ve yenilmeye uğramış eklemlerli kayaçların yorulmaya eğilimli oldukları sonucunu elde etmişlerdir. Prost (1988) ise tekrarlı yüklemelerde eklemlerin, çatlakların oluşması ve ilerlemesindeki etkisini litolojik açıdan incelemiştir. Üç eksenli basınç dayanımı deneyleri ile kayacın en büyük yükleme ve dalga boyunun yanında en az tekrar sayısında yenilmeye uğradığını belirlemiştir. Jafari (2004), tekrarlı yüklemelerin yapay eklemlerli kayaçların davranışı üzerindeki etkisini irdemiştir. Çalışmada, tekrar sayısı, frekans ve genlik artırılarak kayaç üzerine küçük yükler uygulamıştır. Sonrasında ise bu numunelere statik yüklemeler yapılmıştır. İlgili deneyler sonucunda maksimum ve artık makaslama dayanımının değişimleri incelenmiştir. Sıkışma

basıncın artması sonucunda makaslama dayanımının arttığı belirlenmiştir. Yükleme oranı, tekrar sayısı, frekans ve gerilmelerin artması ile de makaslama dayanımın azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Zoback ve Byerlee (1975) tek eksenli ve üç eksenli tekrarlı yükleme koşullarında kayacın hacimsel değişimini araştırmışlardır. Çalışmada üç eksenli basınç dayanımı durumu için tekrarlı yüklemelerin hacimsel değişime bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı koşullarında ise düşük gerilmeler altında kayada hacimsel azalmaların meydana geldiği görülmüştür. Hadley (1976), yüksek basınçlar için hacimsel değişimde tekrarlı yüklemelerin tutarlı bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Ancak, düşük basınçlarda tekrarlı yükleme deneyleri sonucunda hacimsel bir azalma olduğu ifade edilmiştir.

Costin ve Holcomb (1981) tekrarlı yüklemelerde yorulmanın daha çok dalga boyundan etkilendiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ortalama yüksek gerilme ve düşük dalga boylarında gerilme korozyonunun daha etkin olduğunu ancak tam tersi durumda ise yorulmanın kayacın üzerinde daha etkin olduğunu belirlemişlerdir.

Singh (1989), kumtaşının yorulma ve gerilme sertleşmesini araştırmıştır. Kayacın dayanımının yorulmaya bağlı olarak %17 oranında azaldığı ve gerilme sertleşmesinin %29 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, gerilme dalga boyunun azalması ile yorulma ömrünün arttığı ve kayacın yenilmesi için uygulanan tekrar sayısının logaritmik olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Ishizuka vd. (1990), statik dayanımının %85 ve %35 arasındaki gerilme değerlerini belirli bir tekrar sayısında (10^5) gerçekleştirdiği deneylerde frekansın kayaların tekrarlı yüklemeleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada frekans arttıkça yorulma ömrünün arttığı ve kayacın su içeriğinin yorulma dayanımını %7 oranında azalttığı belirlenmiştir.

Tien vd. (1990), suya doymuş kum taşının gözenek suyu basıncı, gerilme ve yorulma özelliklerini tekrarlı yükleme koşulu için incelemiştir. Çalışmada eksenel gerilme ile yorulma ömrünün ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, gözenek suyu basıncının farklı yükleme koşulları için kayacın mekanik özelliklerini etkilediğini belirlemiştir.

Zhenyu ve Haihong (1990), tekrarlı yüklemelerin kayaların davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Dalga boyu ve dalga şekli deformasyonu etkileyen önemli faktörler olduğunu ve her bir tekrarda sinüzoidal dalga şeklinde uygulanan tekrarlı yükleme

sonucundaki deformasyonun üçgensel olandan daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Tekrarlı yüklemelerde yanal deformasyonun aksel deformasyondan daha hızlı şekilde geliştiği sonucuna ulaşmışlardır. Kayaçların tekrarlı yüklemelerin sonucunda yenilmeden önce ve yenilmeden sonra farklı iki deformasyon davranışı sergilediğini belirlemişlerdir.

Li vd. (2002), eklemli kayaçların dayanımını, tekrar sayısı ve eklem açısına bağlı olarak irdelemişlerdir. Çalışma sonucunda deformasyonun, eklemlerin ve eklem açısının artması ile azaldığını belirlenmiştir. Bu çalışmaların yanında Li vd. (2003), tekrarlı yüklemenin kayacın mekanik özellikleri üzerindeki etkisini kuru, donmuş ve suya doymun durumları için araştırmışlardır. Kuru numuneler donmuş numunelerden daha yüksek dayanıma sahip iken, donmuş numuneler de doymun numunelerden daha yüksek dayanıma sahip olduğunu ve donmuş kayaçların çatlak olanlarının sağlam olanlarına göre yorulmaya daha eğilimli oldukları sonucuna ulaşmışlardır. Yükleme frekansının etkisini donma olayının azalttığını belirtmişlerdir.

Ray (1999), tekrarlı yüklemelerin ve deformasyon hızının kum taşının mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada tekrar sayısının ve uygulanan yüklerin artması ile kayacın dayanımının azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca deformasyon hızının artması ile de yorulma gerilmesi ve elastisite modülünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bagde ve Petros (2005), tekrarlı yüklemelerin kum taşının tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Frekans ve genlik değerleri kullanılarak kuru ve doymun numuneler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada frekans ve genliğin deformasyon üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yorulma dayanımının yükleme frekansı ve genlik ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Doymun numuneler için gerçekleştirilen tekrarlı yüklemelerde, yorulma dayanımının %30, elastisite modülünün ise %20 oranında azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacıların bir başka çalışmalarında ise tek eksenli basınç altında frekansın ve yükleme genliğinin kayacın dayanımı ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Badge ve Petros (2009), kayacın kuvars içeriğinin ve kayaç dokusunun yorulma davranışını etkilediğini ve yorulmadan dolayı meydana gelen yenilmenin, kayacın fiziksel ve mekanik özellikleri ile bünyesindeki mikro çatlaklarla ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, ortalama Young modülünün, yükleme frekansı ve genlik ile azaldığını belirtmişlerdir.

Badge ve Petros (2005), karbon içerikli kum taşlarında dinamik ve statik yüklemeler uygulayarak kayacın davranışını araştırmışlardır. Çeşitli frekanslarda sinüzoidal ve üçgensel dalga boyu modelleri kullanarak tek eksenli basınç dayanımı için tekrarlı yüklemeler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada frekansın artması ile Young modülü, Sekant modülü, tek eksenli sıkışma dayanımı ve gerilme enerjisinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek genlik ile kayacın yorulma dayanımı ve elastisite modülünün artış gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bunların yanında, dalga boyu modelinin kayacın dayanımı üzerinde benzer etkilere sahip olduğu gözlenmiştir. Tekrarlı yüklemelerde kare dalga boyu modeli altında kayaçta hasar birikimi daha hızlı elde edilmiş olup, üçgensel dalga boyu modeli ile en az hasar birikiminin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Xiao vd. (2008) tekrarlı yüklemelerde dalga boyu modelinin kayacın dayanımı üzerindeki etkilerini irdelemiştir. Çalışmaları yarı-dinamik yükleme koşullarında sinüzoidal dalga boyu modelinde dolaylı çekme dayanımı ve gerilme oranının, kare dalga boyu modeline oranla daha düşük olduğu, üçgensel dalga boyu modeline göre de daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Fuenkajorn ve Phueakphum (2010), kaya tuzunun tek eksenli basınç ve elastisite modülünün zamana bağlı davranışı üzerinde tekrarlı yüklemelerin etkisini incelemiştir. Çalışmada, tek eksenli basınç dayanımının tekrar sayısının artması ile azaldığı sonucu elde edilmiştir. Elastisite modülünün ise ilk birkaç tekrar için azaldığı ve daha sonra sabit bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Yükleme frekansı yükleme genliğine kıyasla kayacın dayanımı üzerinde daha düşük etki gösterdiği gözlenmiştir.

Xia vd. (2010), granitin dinamik yükler altında yorulma sürecini tek eksenli basınç yüklemesi koşullarında irdelemiş ve bir hasar değişkeni tanımlamışlardır. Gerilme ve frekans faktörlerinin kayaçtaki hasar oluşumunu etkilediğini belirlemiştir. Yorulma ömrünün artan gerilme ile azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Eraslan ve Williams (2012a), tekrarlı yüklemeler altında iki farklı yük metodu kullanarak tütün gerilme-gerinim özelliklerini araştırmışlardır. Yükleme metodları olarak sinüzoidal tekrarlı yükleme ve ortalama gerilmenin artması ile uygulanan tekrarlı yükleme kullanılmıştır. Sinüzoidal yükleme modeli ile kayacın dolaylı çekme dayanımında %33 azalma meydana geldiği görülmüştür. Tekrarlı yüklemenin artması ile dayanımın en çok %37 azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bir başka çalışmalarında Eraslan ve Williams (2012b), statik ve tekrarlı yüklemelerin kırılma tokluğuna etkisini araştırmışlardır. Statik yüklemeler altındaki kırılma tokluğunun tekrarlı yüklemeler altındaki kırılma tokluğundan farklı olduğunu

belirleyen araştırmacılar dinamik tekrarlı yüklemeler için kırılma tokluğunun %46 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Sinüsoidal tekrarlı yükleme için kırılma tokluğunda meydana gelen azalma %27 olarak kaydedilmiştir.

Liu ve He (2012), tekrarlı yüklemelere maruz kalan kum taşının mekanik özellikleri üzerinde sıkışma basıncının etkilerini değerlendirmiştir. Belirli bir frekansta ve sıkışma basıncı değerlerinde deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, sıkışma basıncının deformasyon üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Liu vd. (2012), sıkışma basıncı koşulları altında tekrarlı yüklemeye maruz kalan kayaçların dinamik özellikleri üzerinde frekansın etkisini araştırmışlardır. Çeşitli sıkışma basıncı ve farklı frekans değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde, aynı sıkışma basıncı durumu için frekansın dinamik deformasyon, dinamik sertlik ve kayacın yenilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sabit sıkışma basıncında frekansın artması ile eksenel gerinim ve kayacın yenilmesine neden olan tekrar sayısının artışı belirlenmiştir. Sabit basınç altında frekansın artması ile artık hacimsel gerinimde de artma görülmüştür.

Salim ve Mohamed (2012), yaptıkları çalışmalarda tekrarlı yüklemenin bozunmuş kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tekrarlı yüklemenin kayacın dayanımı üzerinde etkisinin olduğu ve artan yükleme sayısı ile kayacın dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

Liang vd. (2012), tekrarlı yüklemelerde tenardit, glauberit ve jipslerin tek eksenli basınç dayanımlarının sırasıyla %34, %19 ve %35 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Kayaçların gerinimlerinin birbirlerine çok yakın gerçekleştiği ve kaya tuzunun geriniminin yaklaşık %2 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Wang vd. (2013), tekrarlı yüklemeler altında üç eksenli sıkışma dayanımı koşulu için granitlerin volumetrik değişim ve artık gerinimin (residual strain) deformasyon üzerindeki etkilerini araştırmış ve yorulma deformasyonunu plastik deformasyonla karşılaştırmışlardır. Yorulma durumunda hacimsel deformasyonun daha yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Sıkışma durumunda tekrarlı yükleme sayısı ile ters orantılı olarak eksenel artık gerinim ve hacimsel artık gerinimin azaldığı, deformasyon modülünün ise arttığı gözlenmiştir. Genişleme durumunda ise tam tersi durum kaydedilmiştir.

Khanlari ve Momeni (2014), tek eksenli yüklemeye maruz bırakılan monzogranitinin yorulma davranışını belirli bir frekans ve çeşitli yükleme seviyeleri (kayacın dayanımının %85, %90 ve %95) için incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, uygulanan farklı yükleme seviyelerinin kayacın yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. İlk birkaç

tekrar için kayacın elastik davranış gösterdiği ve artan tekrarlar ile beraber elasto-plastik davranış sergilediği belirlenmiştir. Tekrarların artışı ve yükün azalması ile kayacın plastik davranış gösterdiği gözlenmiştir.

Momeni vd. (2015), granitin mekanik özellikleri üzerinde tekrarlı yüklemelerin etkisini incelemişlerdir. Yükleme ve frekansın kayacın yorulma davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, yorulma ömrünün frekansın artması ve maksimum gerinim seviyesinin azalması ile arttığı belirlenmiştir. Tanjant elastisite modülünün farklı yükleme koşullarında azalan bir eğilim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Zhou vd. (2015), tekrarlı nokta yüklemeye maruz bırakılan kum taşlarının mekanik özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Deneylede farklı yükleme frekansı ve yükleme oranları uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda, frekansın artışı ile yorulma ömrünün ilk önce azaldığı ve daha sonra artış gösterdiği belirlenmiştir.

Taheri vd. (2016), tekrarlı sıkışma ve statik üç eksenli yükleme koşulları için Hawkesbury kum taşının dayanımındaki değişimi belirlemek amacıyla eksenel yük, sıkışma basıncı, eksenel ve yanal deformasyonu parametrelerinin değişimini incelemişlerdir. Çeşitli gerilim değeri için gerçekleştirilen tekrarlı yüklemelerde uygulanan yükün kayacın pik dayanımının %94'üne eşit veya daha yüksek olduğunda kayacın yenildiği belirlenmiştir.

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde kayaçların tekrarlı yüklemeler altında mekanik davranışı konusunda genel bir sonucun elde edilemediği görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalarda hala birçok belirsizlikler mevcuttur. Bu belirsizliklerin ana sebepleri kaya özelliklerinin çeşitliliği ve dokusal homojenizasyonun olmayışıdır. Bu durum da bu türden çalışmaların bir süre daha devam edeceğine işaret etmektedir. Ayrıca, bu tür çalışmalar çalışılan kayacın/kayaçların detaylı deformasyon davranışının analizine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle bu kapsamdaki çalışmaların sistematik çalışmalara ek olarak sürdürülmesi gereklidir. Bu amaçla bu tezde daha önce çalışmayan ve Trabzon ve civarında yaygın olarak bulunan Trabzon taşı (Tefrit) kullanılmıştır.

1.3. Tezin Amacı

Tekrarlı yüklemelere maruz kalan kayaçların bazıları yorulma davranışı sergilediği için tasarlanan yapıların beklenilenden daha erken yenilmesi söz konusu olabilmektedir.

Bu nedenle yer altı yapılarının tasarımı yapılırken tekrarlı yükleme deneyleri laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmeli ve tasarımlar bu bilgiler ışığında gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla bu çalışmada da, ticari adı ile Trabzon taşı olarak bilinen kayacın tekrarlı yüklemeler altında yorulma davranışının incelenmiştir. Çalışmada, Trabzon taşının doğal ve doygun durumu için tekrarlı tek eksenli basınç yüklemelerinin etkisi sistematik bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın hipotezi kayaçlara etkiyen düşük oranlardaki tekrarlayan yükler kayacın dayanımını zayıflatarak kayacın daha düşük yüklerde yenilmesine neden olacağıdır. Bu hipoteze uygun olarak kayacın tek eksenli basınç dayanımının %10'u ile %50'si arasında dört farklı yükleme aralığı seçilmiştir. Yükleme oranı, yükleme frekansı ve tekrar sayısına bağlı olarak kayacın kuru ve doygun durumdaki deformasyon davranışları araştırılmıştır. Ayrıca, mineralojik ve SEM analizlerinin bulguları değerlendirilerek farklı yükleme koşullarında kayacın deformasyon eğilimi analiz edilmiştir.

1.4. Tezin Organizasyonu

Tez 5 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölümde çalışma konusu ile ilgili genel bilgi verildikten sonra konu ile ilgili geçmiş çalışmalar detaylı bir şekilde özetlenmiştir. 2. Bölümde çalışılan kayaç ile ilgili mineralojik ve fiziko-mekanik karakterizasyon çalışmalarının sonuçları sunulduktan sonra deney tasarımı, deney ekipmanı ve uygulanan deney prosedürleri tanıtılmıştır. Yorulma deneylerinde elde edilen veriler yine bu bölümde sunulmuştur. 3. Bölümde elde edilen bulgular açıklanırken 4. Bölüm de bulgular irdelenmiştir. Son bölümde ise sonuçlar açıklanmış ve konu ile ilgili öneriler sunulmuştur.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Programı

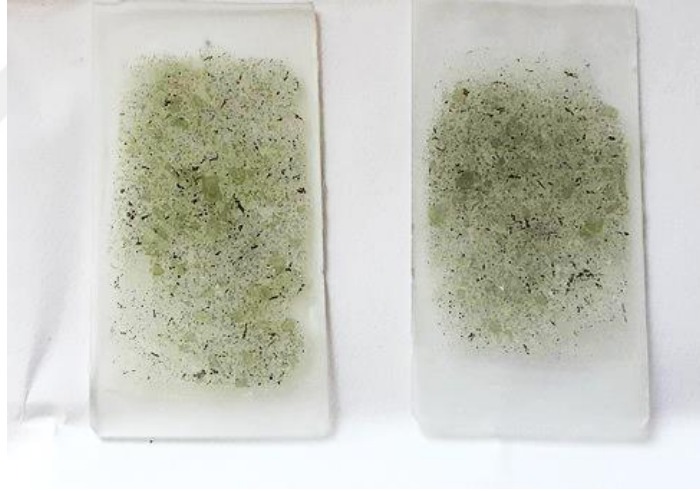
Bu araştırmada, gerçekleştirilen çalışmalar ana başlıklar halinde Şekil 2.1’de sunulmaktadır. Temin edilen kayaç bloklarından deneysel çalışmalar için uygun boyutlarda deney örnekleri hazırlanmıştır. Elde edilen örneklere fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında kayacın doğal ve doygun durumu için yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yenilmiş örneklerden alınan SEM örneklerinin analizi yapılmış, mineralojik ve fiziko-mekanik özellikler referans alınarak yorulma deneylerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak bulgular tartışılmış ve deney sonuçları çıkarılmıştır.



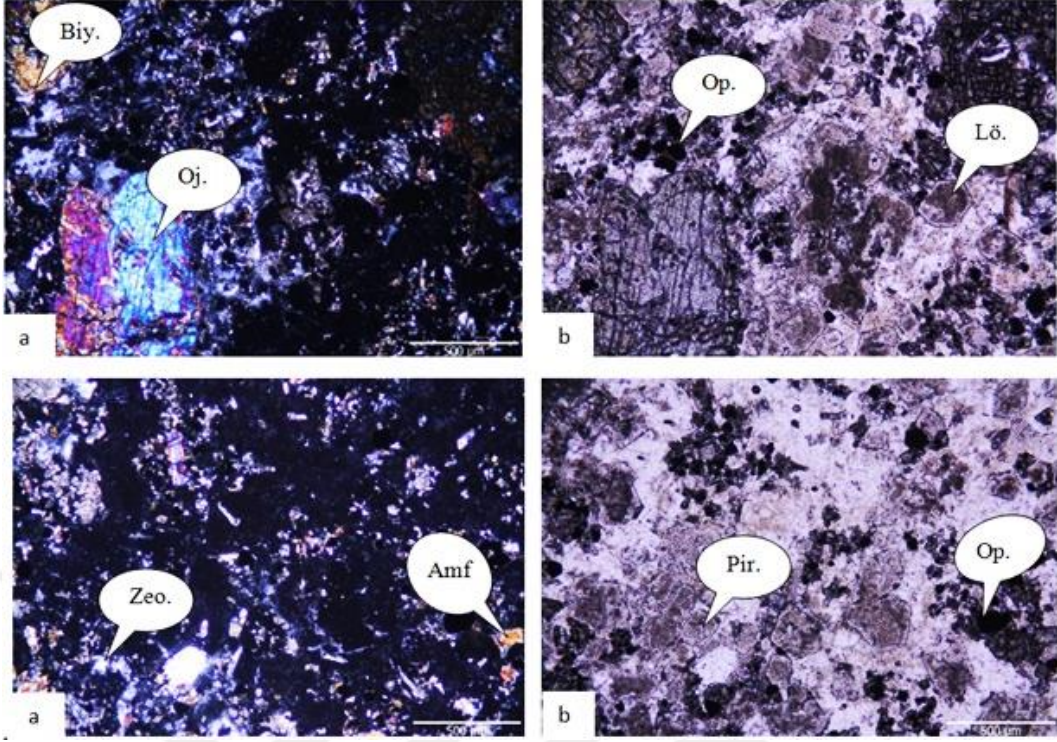
Şekil 2.1 Tezde yapılan çalışmaların akım şeması

2.2.Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler doğal taş ve mermer işletme fabrikasından temin edilmiştir. Alınan numunelerin olabildiğince aynı özelliklere sahip olması için aynı bölgeden temin edilmesine dikkat edilmiştir. Numunelerin minerolojik ve petrografik özelliklerini belirlemek için Şekil 2.2'de gösterildiği gibi ince kesit örnekleri hazırlanmış ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde analizler yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda kayacın Şekil 2.3'te sunulan minerallerden oluştuğu belirlenmiştir. Kayacın bol miktarda piroksen (%20), amfibol (%3-5), biyotit (%3-5), kalsitleşmiş plajiyoklas, biyotit ve opak mineralleri (%2) içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca, kayacın içerisinde altere olmuş şekilde bol miktarda kalsit, klorit, lösit, analsit, sodalit, ojit ve zeolit de bulunduğu gözlenmiştir. Trabzon taşı olarak bilinen bu kayaç tefrit olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2.2. İnce kesit görünümü

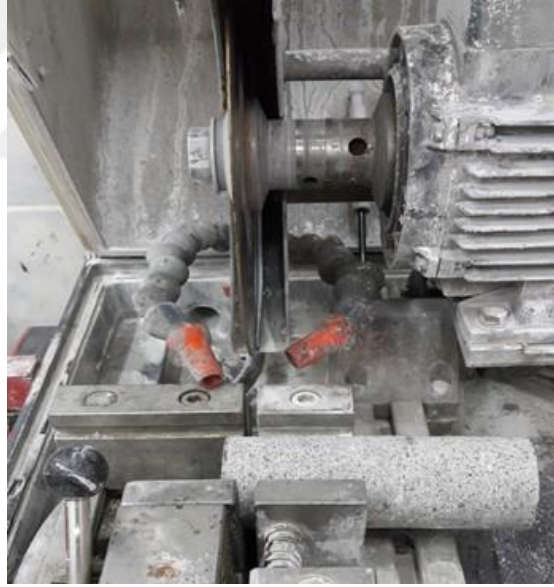


Şekil 2.3. Tefrit taşının mikroskoftaki görünümleri (Pir: Piroksen, Pl: Plajiyoklas, Amf: Amfibol, Biy: Biyotit, Ze: Zeolit, LÖ: Lössit, Oj: Ojite, O: Opak mineral)

Çalışmada 15x20x40 boyutlarındaki bloklardan 15 cm boyunda NX çaplı (54,7 mm) karot örnekleri alınmıştır (Şekil 2.4). Karotlardan deneyler için uygun boyutlarda örnekler kesilmiştir. Kesilen numunelerin yüzeylerinin pürüzsüz ve olabildiğince düzgün olması sağlanmıştır (Şekil 2.5). Hazırlanan numunelerin boyları ve çapları daha sonra kumpas yardımı ile 10^{-2} mm hassasiyetle ölçülmüştür.



Şekil 2.4. Karot alma makinesi



Şekil 2.5. Karot kesme ve düzeltme makinesi

2.2.1. Kayacın Fiziko-Mekanik Özellikleri

Kayacın yoğunluk, porozite ve boşluk oranı ile bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı (Brazilian

yöntemi) deneyleri yapılmıştır Tekrarlı yüklemelerin kayacın mekanik özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesi için bu mekanik deneylerin yapılması ayrı bir önem arz etmektedir.

2.2.1.1. Yoğunluk Deneyi

Yoğunluk deneyi ISRM (2007) tarafından önerilen metotla gerçekleştirilmiştir. (ISRM, 2007). Bu deneyde ağırlıkları 50 g'dan fazla olan ve boy /çap oranı yaklaşık 0,5 olan dört örnek kullanılmıştır (Şekil 2.6). 10^{-2} hassasiyetli dijital kumpas ile numunelerin boy ve çapları üç farklı noktadan ölçülmüş ve elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak numunelerin hacimleri belirlenmiştir. Daha sonra numuneler 10^{-2} duyarlılıktaki hassas terazi ile tartılmış ve örneklerin ortalamaları alınarak kayacın doğal yoğunluğu belirlenmiştir. Numunenin yoğunluk değeri $9,81 \text{ m/sn}^2$ ile çarpılarak kayacın birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Kayacın ortalama yoğunluğu $2,50 \text{ gr/cm}^3$ olarak belirlenirken birim hacim ağırlığı $24,5 \text{ kN/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.6. Yoğunluk deneyi numuneleri

Kayaç örnekleri daha sonra doymun duruma getirilmiş ve bu durumda kayaç numunelerinin ağırlıkları hassas terazi yardımıyla ile belirlenmiştir. Bu şekilde hacimleri bilinen kayaçların doymun durumdayken yoğunlukları hesaplanmıştır.

Trabzon taşı olarak bilinen tefrit numunelerinin yoğunluk deneyi sonuçları Tablo 2.1'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi kayacın doğal ve doymun yoğunlukları $2,50$ ve $2,51 \text{ gr/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.1. Yoğunluk deney sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Hacim (cm ³)	Doygun Ağırlık (gr)	Doğal Ağırlık (gr)	Doygun Yoğunluk (gr/cm ³)	Doğal Yoğunluk (gr/cm ³)
1	29,40	53,89	67,02	164,47	164,52	2,45	2,45
2	30,85	53,92	70,41	175,72	175,51	2,50	2,49
3	29,52	53,38	66,03	168,43	167,94	2,55	2,54
4	30,02	53,52	67,50	170,12	170,51	2,52	2,53
Ortalama			67,74	169,69	169,62	2,51	2,50

2.2.1.2. Görünür Porozite ve Su Emme Oranı Tayini

Görünür porozite ve boşluk oranı tayini deneyi ISRM (2007) tarafından önerilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin, düzgün geometrik şekle sahip olan, ağırlıkları en az 50 gr veya çapları içerdikleri en büyük tane boyunun en az 10 katı büyüklüğündeki numuneler için kullanılması önerilmektedir (Ulusay ve Hudson, 2007). Deneyin yapılması için ağırlıkları en az 50 g olan dört örnek kullanılmıştır. Örneklerin öncelikli olarak boyutlarını belirlemek için 10⁻² mm duyarlılıktaki kumpas kullanılmıştır. Daha sonra numunelerin doğal ağırlıklarını belirlemek amacıyla numuneler hassas terazide tartılmışlardır (M_d). Ardından numuneler 105 °C'de 24 saatlik süreyle etüvde kurutulmuşlardır. Sonrasında soğuması için yarım saat desikatörde tutulan numunelerin kuru ağırlıkları belirlenmiştir (M_k). Ardından su dolu bir kabın içinde yaklaşık 48 saat tutulmuşlardır. Sudan çıkarılan numunelerin yüzeylerindeki su, kağıt havlu ile alınarak doymuş ağırlıkları belirlenmiştir (M_s). Daha sonra aşağıdaki formüller kullanılarak görünür porozite ve boşluk oranı hesaplanmıştır. Kullanılan kayaç için etkin porozite ortalama % 3,74 olarak belirlenmiştir.

$$V_V = \frac{M_d - M_k}{\rho_s} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{100 V_V}{V} \quad (2.2)$$

$$e = \frac{n}{100 - n} \quad (2.3)$$

Bu denklemlerde;

V_v : Boşlukların hacmi (cm^3)

n : Görünür porozite (%)

e : Boşluk oranı

V : Örnek hacmi (cm^3)

M_d : Doygun ağırlık (gr)

M_k = Kuru ağırlık (gr) ifade etmektedir.

Örneklerin ölçülen hacim, kuru ve doymuş birim hacim ağırlıklarından, ağırlıkça ve hacimce su emme oranları aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$A_W = \frac{M_d - M_k}{W_k} \quad (2.4)$$

$$H_W = \frac{M_d - M_k}{V} \quad (2.5)$$

Burada;

A_W : Ağırlıkça su emme oranı (%)

H_W : Hacimce su emme oranı (%)

M_d : Doygun ağırlık (gr)

M_k : Kuru ağırlık (gr)

V : Örnek hacmi (cm^3)

Yapılan deney sonucunda kayacın gözenek ve porozite sonuçları Tablo 2.2'de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi kayacın etkin porozitesi ve boşluk oranı %3,74 ve ağırlıkça su emme oranı %1,51 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.2. Görünür porozite ve ağırlıkça su emme oranı sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Hacim (cm ³)	Doğal Ağırlık (gr)	Doygun Ağırlık (gr)	Etkin Porozite (%)	Ağırlıkça Su Emme Oranı (%)
1	29,40	53,89	67,02	161,92	164,47	3,80	1,57
2	30,85	53,92	70,41	172,50	175,72	4,57	1,87
3	29,52	53,38	66,03	166,28	168,43	3,26	1,29
4	30,02	53,52	67,50	167,88	170,12	3,32	1,33
Ortalama			67,74	167,15	169,69	3,74	1,51

2.2.1.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi ISRM (2007) standartlarına göre yapılmıştır. Deney düzgün geometrik şekle sahip olan ve boy çap oranı 2,5-3 arası olan örnekler için uygulanmaktadır. Çapları NX (yaklaşık 54,7 mm) ve boyları yaklaşık 150 mm olan örnek numuneler hazırlanmış ve deneyin standartlarına göre tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiştir. Deneyde BESMAK 200 ton'luk servo hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 2.7). Yükleme hızı 1 kN/s olarak ayarlanmıştır



Şekil 2.7. Tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan cihaz

Deneyleerde beş tane numune kullanılmış bu deneyleerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak kayacın tek eksenli basınç dayanımı hesaplanmıştır. Şekil 2.8’de ilgili deney için hazırlanan numuneler ve tek eksenli basınç dayanımına maruz kalan bir örnek gösterilmektedir. Kayacın tek eksenli basınç dayanımı ortalama 98,81 MPa olarak hesaplanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı kayacın suya doğgun durumu için de hesaplanmıştır. Gerçekleştiren deneyleer sonucunda kayacın suya doğgun durum için tek eksenli basınç dayanımı 86,02 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.8. Örnek numuneler ve deney sonrası kırılan numune

Gerçekleştiren deneyleer sonucunda kayacın doğal durumu için tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 2.3’te verilmektedir. Elde edilen ortalamaya göre kayacın tek eksenli basınç dayanım 98,81 MPa olduğu belirlenmiştir. Deer ve Miller’in yaptığı sınıflandırma referans alınarak kayacın dayanımının orta seviyede olduğu belirlenmiştir (Tablo 2.4). Aynı şekilde kayaç doğgun durumu için tek eksenli basınç dayanımı hesaplanmıştır. Bu sonuçlar da Tablo 2.5’te sunulmaktadır.

Tablo 2.3. Kayacın doğal hali için tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Yükleme Hızı (kN/s)	Yenilme Yüğü (kN)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
1	136,91	53,42	1	218,47	97,48
2	142,27	53,32	1	209,39	93,77
3	138,43	53,51	1	233,54	103,85
4	143,80	53,13	1	198,59	89,58
5	141,59	53,39	1	204,04	91,14
Ortalama				221,47	98,81

Tablo 2.4. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımına göre sınıflandırılması (Deer ve Miller, 1966)

Sınıf	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
Çok Yüksek	>220
Yüksek	110-220
Orta	55-110
Düşük	27,5-55
Çok Düşük	<27,5

Tablo 2.5. Kayacın doymun hali için tek eksenli basınç dayanımı sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Yükleme Hızı (kN/s)	Yenilme Yüğü (kN)	Tek eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
1	154,52	53,84	1	177,21	77,84
2	154,74	53,80	1	222,98	98,09
3	154,47	53,91	1	186,08	81,52
4	154,40	53,97	1	199,27	87,10
5	154,53	53,82	1	194,64	85,53
Ortalama				196,04	86,02

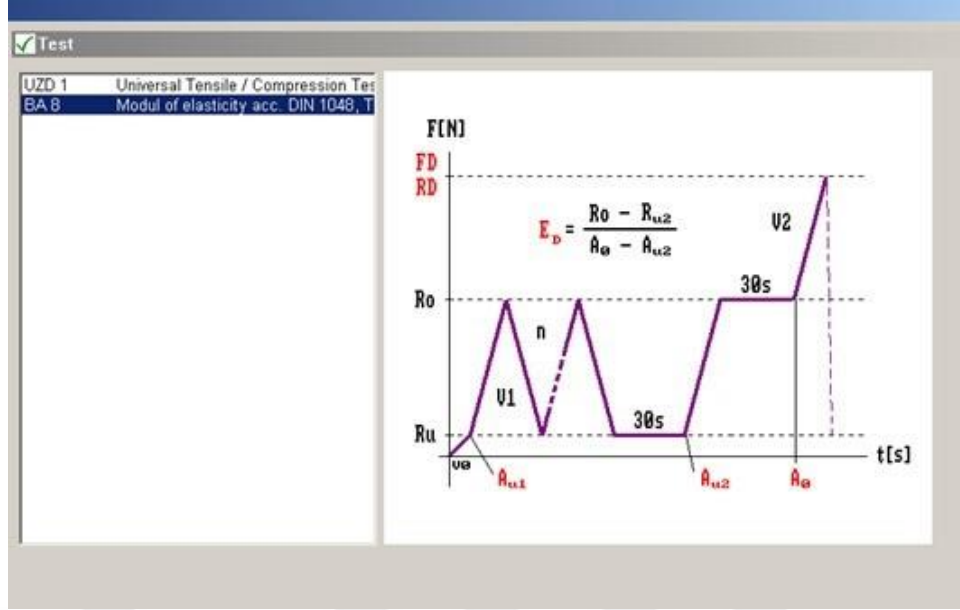
2.2.1.4. Elastisite Modülü Deneyi

Deneyde düzgün geometrik şekle sahip numuneler kullanılmıştır. Numunelerin çapları 54,7 mm (NX) ve boy çap oranı 2,5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Numune Şekil 2.9'da görülen kompressometre ile düzgün bir şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra deney numunesi üzerine şekilde görülen üç tane deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Deformasyon ölçerlerin ikisi düşey şekilde yerleştirilmiş ve aksenal deformasyonun kaydı sağlanmıştır. Diğeri ise yan şekilde yerleştirilerek yanal deformasyonun ölçülmesi sağlanmıştır.

Düzenek hazırlandıktan sonra pres cihazı ile numune üzerine yük uygulanmaya başlanmıştır. Bilgisayar ile bağlantılı yapılmış ve yük değişimlerine bağlı olarak oluşan deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Deney makinesinin aldığı verileri kullanan bir yazılım vasıtasıyla deney sonuçlarının görselleştirilebilme olanağı mevcuttur. Deneyde elde edilen verilerin (yanal uzama ve kısalma) depolanması, işlenmesi ve gösterimi işlemleri Şekil 2.10'da görülmektedir. Deney, beş numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak elastisite modülü belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Kompressometre ve LVDT'ler



Şekil 2.10. Elastisite belirlemede yazılım görüntüsü

Elastisite modülünü, kullanılan yazılım tarafından ölçülen yanal uzama ve kısalma değerleri ile otomatik olarak hesaplamıştır. Deney sonuçları Tablo 2.6’da verilmektedir.

Tablo 2.6. Elastisite modülü sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Elastisite Modülü (GPa)
1	53,91	153,82	138,43
2	53,96	154,14	235,49
3	53,96	154,08	260,86
4	53,96	154,00	264,50
5	53,98	154,33	142,21
Ortalama			208,30

2.2.1.5. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi (Brazilian Yöntemi)

Bu deneyde kayaçların çekme dayanımları dolaylı yoldan belirlenmektedir. Deney ISRM (2007)'nin önerdiği standartlara göre yapılmıştır. Çapları yaklaşık 54 mm (NX) olan ve boy çap oranı 1/2 ile 1 arasında olan disk numuneler hazırlanmıştır. Yükleme hızı 1 kN/s olarak uygulanmıştır. Deney sonucunda kayacın yenilme yükleri elde edilmiştir.

Deney sonunda yenilen numune ve kullanılan aparat Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Elde edilen yenilme yükünden aşağıdaki formül yardımı ile dolaylı çekme dayanımı hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda dolaylı çekme dayanımı ortalama 6,42 MPa olarak belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{0,636F}{D.t} \quad (2.6)$$

Burada;

σ = Dolaylı çekme dayanımı (MPa)

F = Yenilme yükü (kN)

D = Örnek çapı (mm)

t = Örnek kalınlığı (mm)



Şekil 2.11. Deney aparatı ve deney sonrası numune görünümü

Tablo 2.7'de kayacın dolaylı çekme dayanımı sonuçları sunulmaktadır. Deney sonuçlarına göre kayacın dayanımı 6,42 MPa olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2.7. Dolaylı çekme dayanımı sonuçları

Deney No	Boy (mm)	Çap (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Dolaylı Çekme Dayanımı MPa
1	31,77	53,22	21,44	8,08
2	36,73	53,15	20,48	6,68
3	33,00	53,08	10,43	3,79
4	32,07	53,23	11,29	4,21
5	34,08	53,10	16,91	5,95
6	33,85	53,25	19,47	6,88
7	34,61	53,09	25,02	8,67
8	29,92	53,41	19,79	7,89
9	30,35	53,52	14,23	5,58
Ortalama			17,67	6,42

2.2.2. Tekrarlı Yükleme Deneyleri

Tekrarlı yükleme deneyleri yapılırken belirli parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler tekrarlı yüklemenin uygulandığı yük aralığı (yükleme genliği), frekans ve tekrar sayısıdır. Deneyler gerçekleştirilirken bu parametrelerin biri değişken diğerleri sabit olarak alınmış ve kayacın durumu analiz edilmiştir. Deneylerde bismak 200 ton'luk pres kullanılmıştır.

Deneylerde her bir numune belirli bir tekrar sayısına kadar belirli bir yüke ve belirli frekansa maruz bırakılmıştır. Yorulma deneyi gerçekleştirilirken numuneye kompresometre ve deformasyon ölçer bağlanmıştır. Daha sonra yorulan kayaç baskı cihazına yerleştirilerek yenilene kadar yük uygulanmıştır. Yenilen numunenin kırılma yükü ve yorulmadan önceki kırılma yükleri karşılaştırılır ve değerlendirilir. Çalışmada her bir değişken için en az üç tekrar ile deneyler gerçekleştirilmiş ve ortalamaları alınarak tekrarlı yükleme sonrası yenilme yükü değerleri belirlenmiştir. Aynı koşullar altında kayaçların doygun durumları için de tekrarlı yükleme deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı yükleme işlemi tamamlandıktan hemen sonra kayacın tek eksenli basınç dayanımı belirlenmiştir. Bu şekilde su altında iken tekrarlı yükün kayacın dayanımı üzerine etkisi de araştırılmıştır.

2.3. Deney Tasarımı

Çalışma kapsamında kullanılan tasarım Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Deneylerde yorulma mekanizmasının belirlenmesinde etkin olan parametrelerin (yük genliği, frekans ve tekrar sayısı) üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Bu bağımlı değişkenler dört farklı grup şeklinde uygulanmış ve tek eksenli basınç dayanımını nasıl etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 2.12. Tekrarlı yükleme düzeneği

2.3.1. Yük

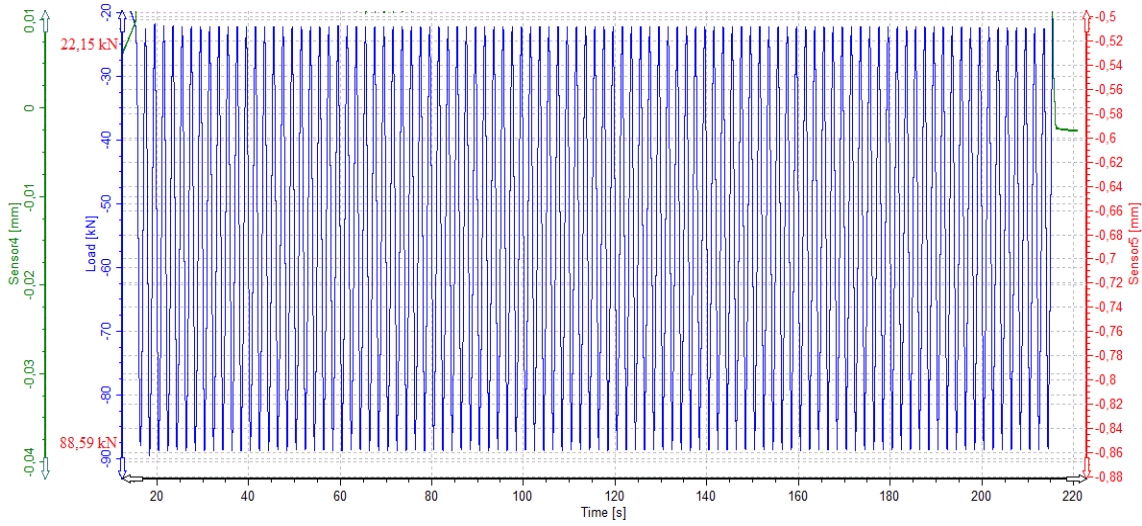
Tekrarlı yükleme deneylerinde yük parametresi değişkenlerden biri olarak değerlendirilmiştir. Yükler, kayacın tek eksenli basınç dayanımının % 10 ile % 50'si arasında değişen değerlerde seçilmiştir. Yük sıfırdan başlayarak önce belirli bir alt yüke (Tek eksenli sıkışma dayanımının %10 alınmıştır) oradan da maksimum bir yüke çıkıp daha sonra verilen minimum yük ile maksimum yük arasında belirli tekrar sayısında uygulanmıştır. Bu deneylerde frekans (0,5 Hz) ve uygulanan tekrar sayısı (100) sabit tutulmuştur.

Dört farklı yük aralıklarının her biri üç numune kullanılarak uygulanmıştır. Bazı deneyler deney sırasında gerçekleşen hatalardan dolayı üç tekrardan daha fazla tekrar

edilmiştir. Uygulanan yük grafiği Şekil 2.13'de sunulmaktadır. Bu grafiklerde sensor 4 olarak adlandırılan değerler aksenal deformasyonu, sensor 5 olarak adlandırılan değerler yanal deformasyonu temsil etmektedir.

Tablo 2.8. Yük değişimi altında deney parametreleri

Deney No	Pmin (MPa)	Rmin (kN)	Pmax (MPa)	Rmax (kN)	Frekans (Hz)	Tekrar Sayısı (n)
Y1	9,88	22,15	19,76	44,29	0,50	100
Y2	9,88	22,15	29,64	66,44	0,50	100
Y3	9,88	22,15	39,52	88,59	0,50	100
Y4	9,88	22,15	49,41	110,74	0,50	100



Şekil 2.13. Tekrarlı yükleme yük değişimi grafiği (Rmax: Yenilme yükünün %40)

Tablo 2.8'de görüldüğü gibi dört farklı yük aralığı uygulanmıştır ve bu yükler için numuneler sıralı olarak numaralandırılmıştır. Bu yükler tek eksenli basınç dayanımının %20, %30, %40 ve %50'si şeklinde seçilmiştir. Yorulmanın kayaç üzerine etkisi araştırılırken belirlenen yüklerin kayaçın dayanımından düşük olması gerekmektedir. Kayaçın dayanımına yakın yüklerin düşük yüklerle oranla kayaç üzerinde yıkıcı bir etkiye yol açtığı bilinmektedir. Fakat düşük yükler devamlı olarak kayaç üzerine etki ettiğinde kayaçın dayanımını ve deformasyon davranışını etkileyebilmektedirler. Bu nedenle bu çalışmada düşük yüklerin kayaçın tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmak amacıyla

deneyler düşük yükler altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kayacın suya doygun ve doğal hali için gerçekleştirilmiştir.

2.3.2. Frekans

Burada değişken olarak frekans kullanılmıştır. Yük genliği ve tekrar sayısı sabit alınmıştır. Deneyler, kayacın dayanımının %10 ile %30 arasında yük değişimi ve 100 tekrar sayısı için uygulanmıştır.

Tablo 2.9'da görüldüğü gibi 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 gibi düşük frekans aralıkları kullanılmıştır. Bu aralıktaki frekanslar seçilirken daha önce yapılan çalışmalar ve gerçeği yansıtma durumu göz önünde bulundurulmuştur. Burdine (1978), yaptığı araştırmalarında deprem ve patlatma gibi büyük olayların meydana geldiği frekansın 1 Hz civarı olduğunu ileri sürmüştür. Ayrıca literatürde mevcut bir çok çalışmada uygulanan frekans genellikle 1 Hz olarak alınmıştır (Khanlari ve Momen, 2014; Momeni vd., 2015). Bunlara ek olarak düşük frekanslarda yük daha uzun süre kayaca etki etmektedir (Badge ve Petros, 2009). Bu nedenle düşük frekanslarda çalışmalar yürütülmüştür. Bu koşullar altında deneyler kayacın doygun durumu için de uygulanmıştır.

Frekansın değişken olarak kullanıldığında kaydedilen grafik Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü gibi bir tekrarı 2 saniyede tamamlamaktadır. Zaman 2 saniye olduğu durumda aşağıdaki denkleme yerleştirildiğinde frekans 0,5 Hz olarak alınmış olduğu anlaşılmaktadır.

$$f = \frac{1}{t} \quad (2.7)$$

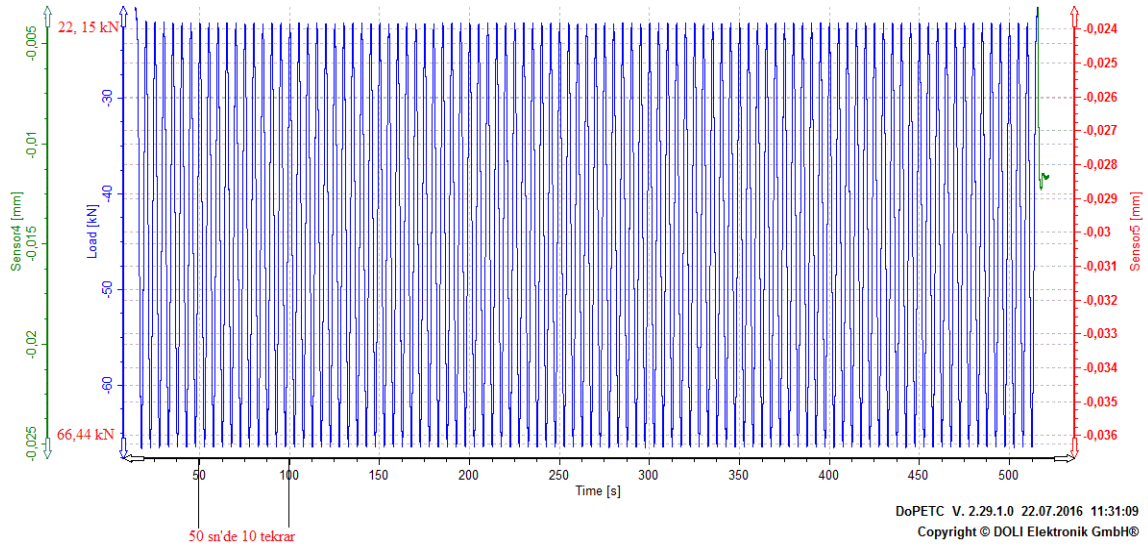
Burada;

f:Frekans (Hz)

t: Zaman (sn)'dir.

Tablo 2.9. Frekans değişimi altında deney parametreleri

Deney No	Pmin (MPa)	Rmin (kN)	Pmax (MPa)	Rmax (kN)	Frekans (Hz)	Tekrar Sayısı (n)
F1	9,88	22,15	29,64	66,44	0,2	100
F2	9,88	22,15	29,64	66,44	0,3	100
F3	9,88	22,15	29,64	66,44	0,4	100
F4	9,88	22,15	29,64	66,44	0,5	100



şekil 2.14. Tekrarlı yükleme frekans grafiği

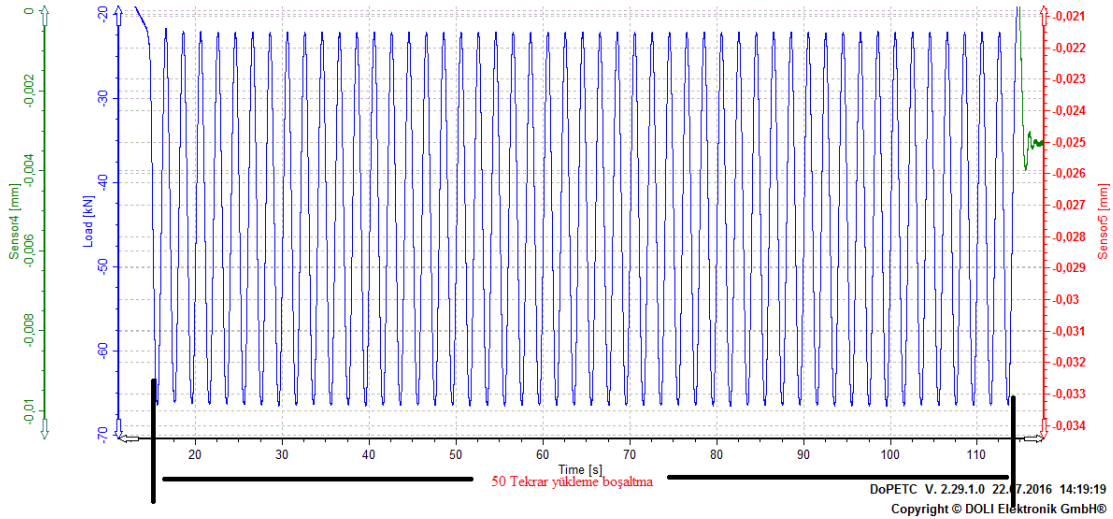
2.3.3. Tekrar Sayısı

Frekans ve yk sabit tutularak tekrar sayısı değişken olarak değerlendirilmiştir. Tekrarlı yükleme deneylerinde tekrar sayısı genellikle kayalar yenilene kadar uygulanmış ve tekrarlı yüklemeler sonucunda kayacın dayanımının nasıl değiştiği araştırılmıştır. Ray vd. (1999) yaptığı çalışmalarında 100 ile 600 arasında tekrar sayıları uygulamışlardır. Araştırmacılar, 100 tekrarın üzerindeki değerlerde kayacın yorulmaya daha eğilimli olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde bu durumlar göz önünde bulundurulmuş ve 100 ve yakın tekrar sayıları seçilmiştir. Tablo 2.10'da görüldüğü gibi deneylerde dört farklı tekrar sayısı uygulanmıştır. Kayacın hem doğal hali hem de

suya doygun durumu için deneyler gerçekleştirilmiştir. 50 tekrar yükleme boşaltma için kaydedilen grafik Şekil 2.15'de gösterilmektedir.

Tablo 2.10. Tekrar sayısı değişimi altında deney parametreleri

Deney No	Pmin (MPa)	Rmin (kN)	Pmax (MPa)	Rmax (kN)	Frekans (Hz)	Tekrar Sayısı (n)
N1	9,88	22,15	29,64	66,44	0,5	50
N2	9,88	22,15	29,64	66,44	0,5	100
N3	9,88	22,15	29,64	66,44	0,5	150
N4	9,88	22,15	29,64	66,44	0,5	200



Şekil 2.15. 50 tekrar sayısı için kaydedilen grafik

2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Tekrarlı yükleme deneyleri uygulandıktan sonra kayalardan alınan parçalar üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Karadeniz Teknik Üniversite Metalürji Mühendisliğinde mevcut olan Zeiss EVO LS10 marka SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.16).

SEM analizleriyle, yorulma mekanizmasının ana özelliklerinin incelenmesi ve tekrarlı yüklemeler ile statik yüklemeler arasındaki farkın ortaya koyulması amaçlanmıştır. Numuneden parçalar alınırken ekstra çatlak oluşmamasına dikkat edilmiştir.



Şekil 2.16. Analizlerde kullanılan SEM cihazı

3. BULGULAR

Yük, frekans ve tekrar sayısı olarak üç farklı parametre uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda elde edilen numunelerin toplu görünümü Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Deney sonrası numune görüntüleri

3.1. Yük Değişimi

Uygulanan tekrarlı yüklemelerde yük değişkeni altında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.1’de verilmektedir. Deneylerde sırası ile tek eksenli basınç dayanımının %20, %30, %40 ve %50’si oranında yükler uygulanmıştır. Deneyler üç kez tekrar edilmiş ve ortalamaları hesaplanmıştır. Çalışmada minimum yük 22,15 kN, frekans 0,5 Hz ve tekrar sayısı 100 olarak uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme deneyleri aynı şekilde suya doymun kayaçlar için de uygulanmıştır (Tablo 3.2). Bazı veriler kayacın dayanımından daha yüksek değerde olduğu belirlenirken bazı verilerin de dayanım değerinden oldukça düşük olduğu elde edilmiştir. Bu değerlerin hatalı olabileceği düşünüldüğünden üç tekrardan daha fazla uygulanmıştır.

Tablo 3.1. Tekrarlı yükleme durumu için yük değişkeni altında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları (Doğal durum için)

Deney No	Pmax (MPa)	Rmax (kN)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
Y1	19,76	44,29	210,29	91,99
Y2	29,64	66,44	201,71	88,28
Y3	39,52	88,59	199,32	87,34
Y4	49,41	110,74	194,93	85,23

Tablo 3.2. Tekrarlı yükleme durumu için yük değişkeni altında tek eksenli basınç dayanımı sonuçları (Doğun durum için)

Deney No	Pmax (MPa)	Rmax (kN)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
Y1	19,76	44,29	185,25	81,26
Y2	29,64	66,44	202,43	88,79
Y3	39,52	88,59	182,66	80,01
Y4	49,41	110,74	168,61	73,85

3.2. Frekans Değişimi

Deneyin bu bölümünde minimum yük 22,15 kN, maksimum yük 66,44 kN ve tekrar sayısı 100 olarak belirlenmiş ve deneyler uygulanmıştır. Frekansın değişimi ile tekrarlı yükleme deneyleri sonucunda elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri değişim Tablo 3.3’de sunulmaktadır.

Tablo 3.3. Tekrarlı yükleme durumu için frekans değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doğal durum için)

Deney No	Yükleme Frekansı, (Hz)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
F1	0,2	173,36	75,95
F2	0,3	187,05	82,21
F3	0,4	193,16	84,81
F4	0,5	201,71	88,28

Suya doygun kayalar üzerine frekansın değişimi ile uygulanan tekrarlı yüklemeler sonucunda elde edilen veriler Tablo 3.4'te sunulmaktadır.

Tablo 3.4. Tekrarlı yükleme durumu için frekans değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doygun durum için)

Deney No	Yükleme Frekansı (Hz)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
F1	0,2	172,47	75,53
F2	0,3	202,36	88,69
F3	0,4	191,74	83,98
F4	0,5	202,43	88,79

3.3. Tekrar Sayısı Değişimi

Tekrar sayısının değişimi sonucunda tekrarlı yükleme koşulu için kayacın tek eksenli basınç dayanımındaki değişim Tabloda 3.5'te sunulmaktadır. Deneyler frekans 0,5 Hz, yük aralığı 22,15 kN ile 66, 44 kN değerleri alınarak yapılmıştır. Tabloya göre tek eksenli basınç dayanımında, tekrarlı yükün etkisi ile değişim olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3.5. Tekrarlı yükleme durumu için tekrar sayısı değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doğal durum için)

Deney No	Tekrar Sayısı (n)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
N1	50	213,02	93,33
N2	100	201,71	88,28
N3	150	195,23	85,43
N4	200	188,23	82,57

Tekrarlı yüklemeler altında tekrar sayısına bağılı olarak elde edilen doyunun kayaç dayanımları Tablo 3.6'da sunulmaktadır.

Tablo 3.6. Tekrarlı yükleme durumu için tekrar sayısı değişkeni altında tek eksenli dayanım sonuçları (Doygun durum için)

Deney No	Tekrar Sayısı (n)	Ortalama Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Gerilme (MPa)
N1	50	205,97	90,23
N2	100	202,43	84,86
N3	150	187,83	81,76
N4	200	207,41	91,09

4. İRDELEME

4.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımının İrdelenmesi

Yukarıda da bahsedildiği gibi Trabzon taşı olarak bilinen kayaç fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Kayacın tek eksenli basınç dayanımı doğal ve suya doymun hali için belirlenmiştir. Bu kısımda mekanik özellikler irdelenmiş ve kayacın doğal halindeki dayanımı ile suya doymun durumundaki dayanımları karşılaştırılmıştır.

Su içeriği kayacın dayanımını ve kırılma yükünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Kirby, 1984; Fukui ve Hashiba, 2015). Birçok araştırmacı suyun kayacın dayanımını olumsuz yönde etkilediğini belirtmiştir (Yılmaz, 2010). Örneğin, Erguler ve Ulusay (2009), kayaç içerisinde suyun küçük bir varlığının kayacın dayanımını azaltarak deformasyonunu arttırdığı gözlemlemiştir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda kayacın tek eksenli basınç dayanımı doğal durumu ve doymun durumu için sırasıyla 98,81 MPa ve 86,02 MPa olarak bulunmuştur. Başka ifadeyle su etkisiyle kayacın tek eksenli basınç dayanımının %13 oranında azaldığı belirlenmiştir. Daha önce Masuda (2001) ve Vasarhelyi ve Van (2006) tarafında yapılan çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.2. Tekrarlı Yükleme Deneylerinin İrdelenmesi

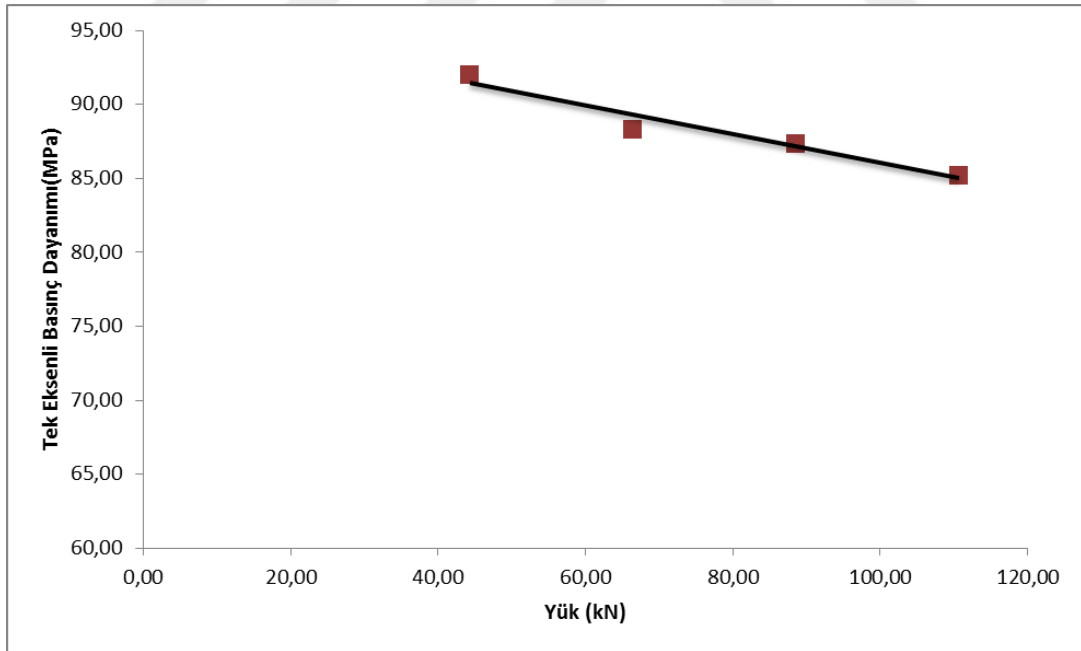
Trabzon taşı numunelerine uygulanan tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen bulgular bu kısımda irdelenmiştir. Ayrıca, doğrusal regresyon analizleri yapılarak uygulanan farklı yüklerin, frekansların ve tekrar sayılarının kayacın dayanımı üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş ve elde edilen değerler önceki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Yükün Dayanım Üzerindeki Etkisi

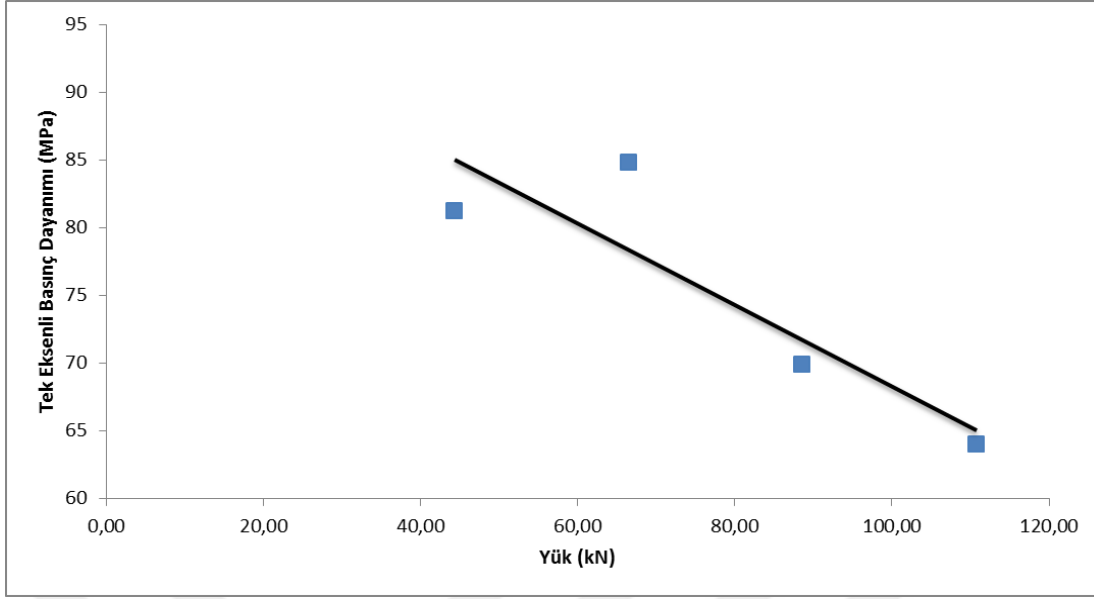
Tekrarlı yüklemelerde yük değişkeninin kayacın dayanımı ve young modülü üzerine etkisini belirlemek için yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler kullanılarak

grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.1’de görüleceği üzere yük genliğinin artması ile kayacın dayanımı azalmıştır. Momeni vd. (2015), yorulma sürecinde kayalarda deformasyon gelişiminin kaya kütlesi içinde kılcal çatlakların oluşumu ile başladığını belirtmiştir. Yüklemler devam ettiği sürece bu çatlakların sayısının ve kayaç içindeki dağılımının artması ile oluşan çatlak ağı kayacın yenilmesine sebep olmaktadır. Önceki çalışmalarda da tekrarlı yüklemelerde uygulanan yük seviyesi arttıkça kayacın yorulma dayanımının düştüğü ve kayacın daha düşük yüklerde yenildiği sonucu elde edilmiştir. Çalışma sonuçları literatürle örtüşmektedir (Ray vd.; 1999; Badge ve Petros, 2002; Momeni vd., 2015).

Kayacın suya doygun durumu için yük değişiminin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi doygun halde tekrarlı yüklemeye maruz bırakılan örneklerde yük artışı ile dayanımın düştüğü görülmektedir. Bu genel olarak yorulmuş kayacın deformasyon davranışına uygun bir durumdur.



Şekil 4.1. Yük ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için)



Şekil 4.2. Yük ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doygun durum için)

Kayacın doğal hali ile suya doygun durumu karşılaştırıldığında doygun durumdayken kayacın daha düşük yüklerde yenildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca doygun durum için elde edilen verilerin dağılımının daha düzensiz olduğu görülmektedir. Kayaçlar homojen bir malzeme olmadığı için içerisindeki gözenek oranı ve su emme oranları da farklı farklı olabilmektedir. Bunlara ek olarak içerisinde var olan çatlaklı yapılar da göz önünde bulundurulduğunda, suyun aynı tür kayaçta farklı etkiler gösterebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumdaki belirsizliklerin giderilebilmesi amacı ile daha fazla çalışma gerçekleştirilmelidir.

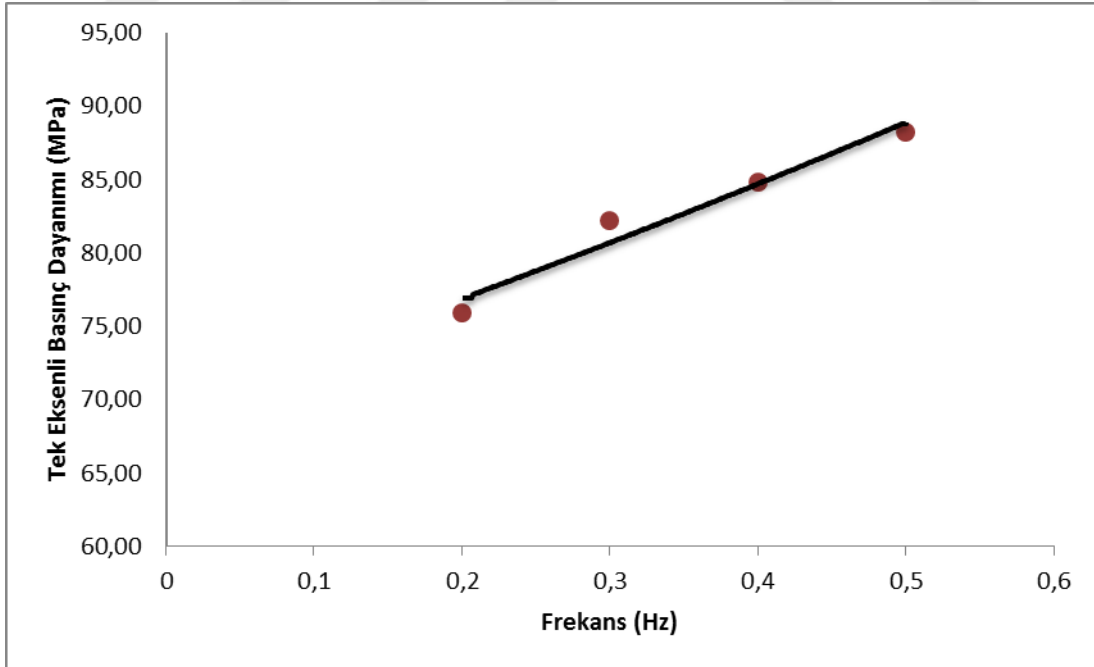
4.2.2. Frekansın Dayanım Üzerindeki Etkisi

Tekrarlı yükleme deneyleri sonucunda kayacın tek eksenli basınç dayanımı ile frekans arasında güçlü bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 4.3). Frekans artışına paralel olarak kayacın dayanımında da artış görülmüştür. Anlaşılacağı gibi kayacın dayanımı tekrarlı yüklemeler sonucunda belli bir oranda azalma göstermiştir. Dayanımdaki azalma miktarı frekansın daha düşük değerlerinde daha yüksektir. Çalışma sonuçları literatürle uyumludur (Momeni vd., 2015).

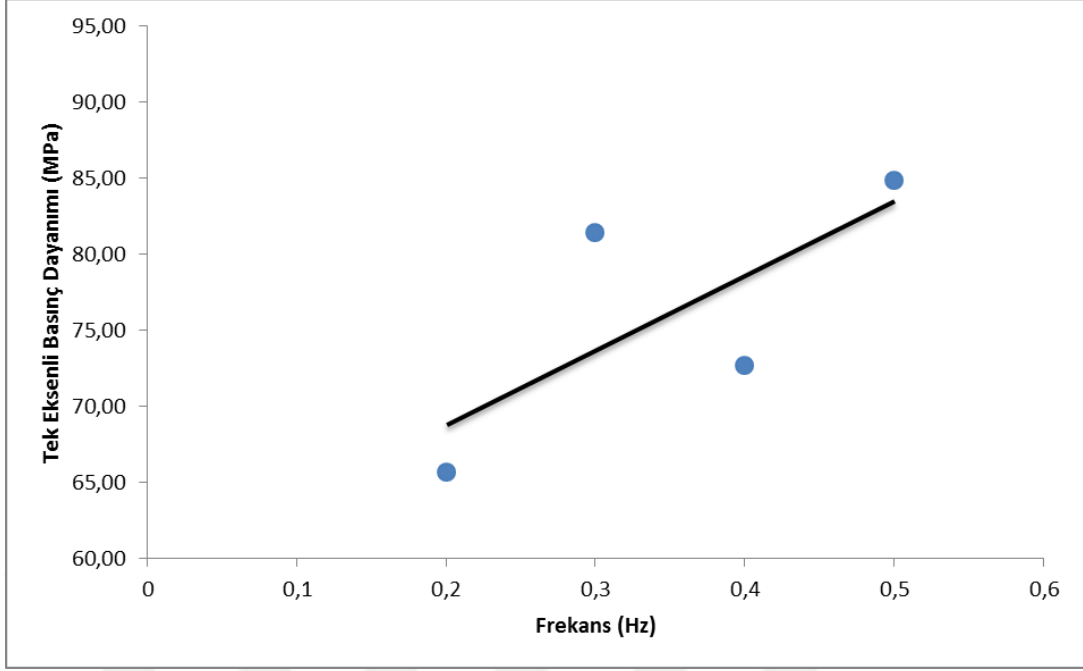
Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi frekans bir tekrarın tamamlanma süresinin ters orantısı alınarak elde edilir. Frekans ne kadar küçük olursa döngüsel zaman bir o kadar

uzun olur. Momeni vd. (2015), zaman faktörünün tekrarlı yükleme deneyleri için önemli bir role sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü daha düşük frekanslarda yük kayaç üzerine daha uzun süre uygulanmakta ve yorulma deneyleri sonucunda çatlaklar meydana gelmektedir. Oluşan çatlaklar yükleme devam ettikçe ilerlemekte ve bir noktada birleşmektedir. Sonra daha büyük çatlaklar oluşmakta ve bu da kayacın yenilmeye uğramasına sebep olmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslarda kayaç daha düşük yüklerde yenilmeye uğramaktadır.

Şekil 4.4'te doygun durum için frekans ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Anlaşılacağı gibi doygun durum için de frekans artışı ile dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. Ancak burada iki değişken arasında yüksek bir ilişki mevcut değildir. Doğal ve doygun durum için frekansın artışı ile dayanımın da arttığı görülmüştür. Doygun durum için elde edilen veriler de düzenli bir artış olmadığı görülmektedir. Kayaçlar içerisinde var olan çatlaklı yapılar ve gözeneklerin aynı olmamasından dolayı su emme oranları da farklı olabilmektedir. Bu nedenle suyun etkisini daha iyi anlayabilmek amacı ile daha detaylı araştırmalar yapılmalıdır.



Şekil 4.3. Frekans ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için)



Şekil 4.4. Frekans ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doymun durum için)

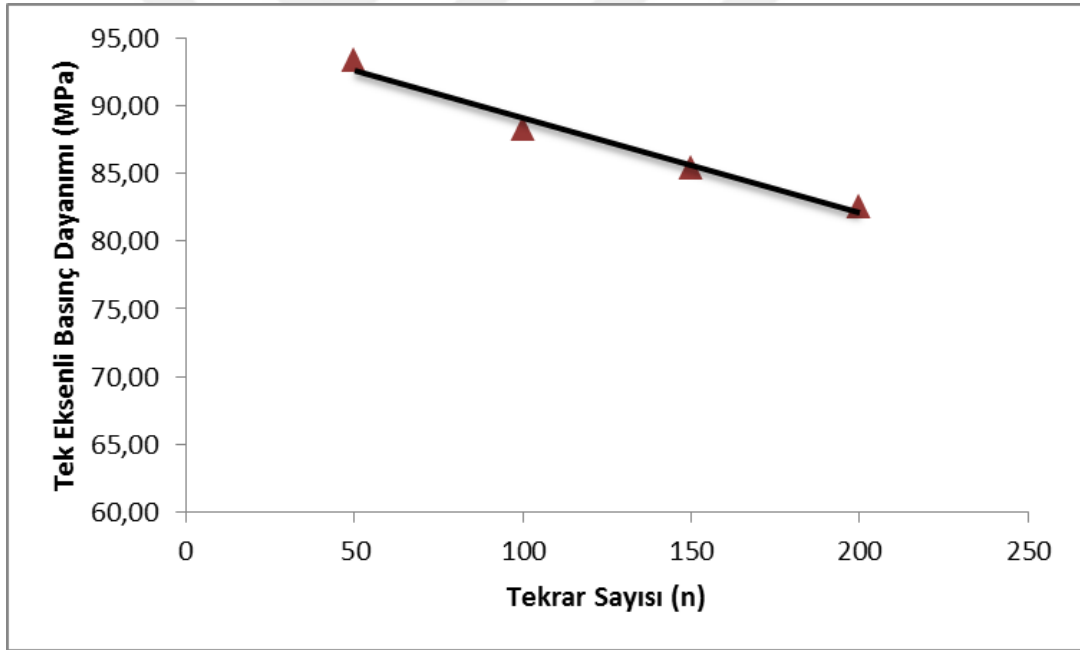
4.2.3. Tekrar Sayısının Dayanım Üzerindeki Etkisi

Tekrar sayısının kayacın dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.5). Tekrar sayısının artması kayacın üzerine uygulanan yükün süresinin daha uzun olması anlamına gelmektedir. Kayaç üzerine uygulanan yük arttıkça da kayacın dayanımında azalma görülmektedir. Elde edilen sonuç literatürde mevcut çalışmaların bulguları ile de örtüşmektedir. Ray (1999) 100 ile 600 arasında tekrar sayıları uygulayarak kayaç dayanımındaki değişimleri analiz etmiştir. Çalışmada, 100 ile 300 tekrar arasında kayacın dayanımında hızlı bir azalma görülürken, 300 ile 500 tekrar arasında biraz daha yavaş azalma ve 500'den 600 tekrara kadar ise çok daha yavaş azalma gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Aynı şekilde Salim ve Mohamed (2012), 25 ile 175 arasında tekrar sayılarını uygulayarak tekrarlı yükleme deneyleri gerçekleştirmiş ve kayacın dayanımında sırasıyla %0,4 ile %23,1 oranında azalma olduğunu tespit etmiştir. Önceki çalışmalarla benzer şekilde bu çalışmada da kayacın dayanımı ile tekrar sayısı arasında ters bir ilişkinin olduğu gözlenmiştir.

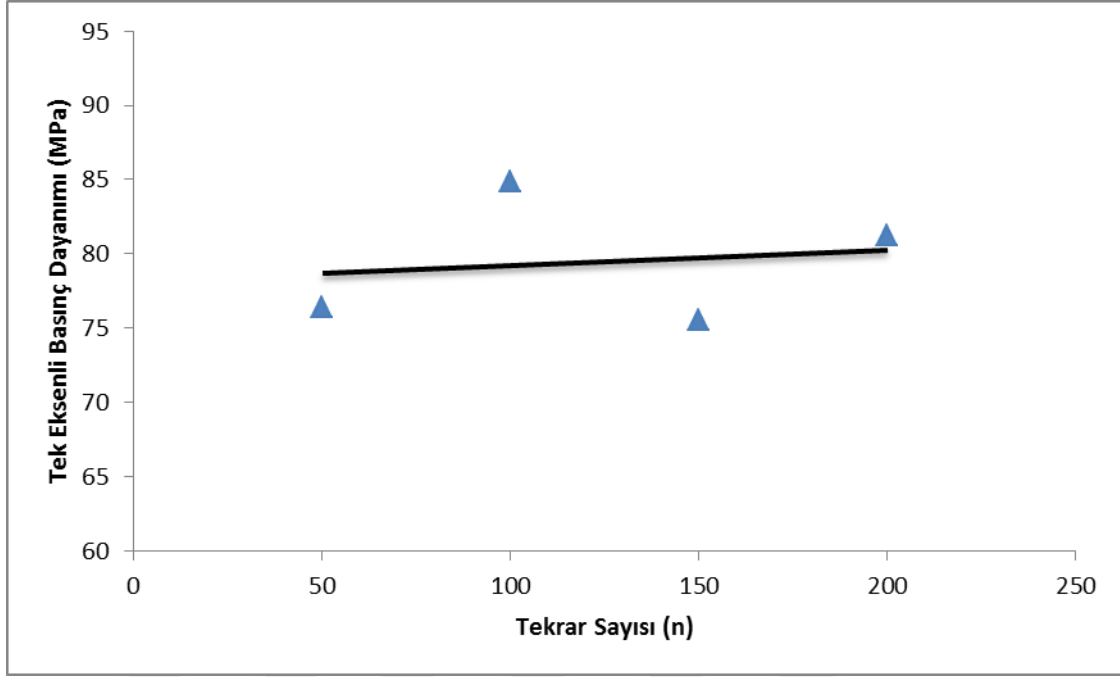
Doymun haldeki numunelerle gerçekleştirilen deneylerde tekrar sayısı ile dayanım arasında bir ilişki gözlenmemiştir. Şekil 4.6'da dayanım değerlerinin düzenli bir dağılım

göstermemesinin suyun kayaç üzerine etkisinden kaynaklandığı izlenimini doğurmaktadır. Kayaç yapısındaki suya eğilimli ya da suya duyarsız minerallerin kayaç davranışının homojen olmayan bir şekilde gelişmesine neden olabilmektedir. Su, kayaçın mineralojik özelliklerini ve içerisinde var olan ve tekrarlı yükleme sonrasında oluşan çatlakları etkilemektedir. Fakat bu etkinin sebebini genelleştirebilmek için benzer kayaçlar üzerinde çok sayıda çalışmanın gerçekleştirilmesine gerek vardır.

Kayaçın iki durumu için grafikler birlikte değerlendirildiğinde tekrarlı yükleme deneylerinde doğal durum için tekrar sayısı arttıkça dayanımın azaldığı gözlemlenirken, suya doymun durum için aksine kayaçın dayanımında artış görülmüştür. Su kayaçın yapısını etkileyerek tam tersi bir etki göstermesine neden olmuştur. Bu durumun sebebini açıklayabilmek amacıyla daha fazla araştırma yapılmalıdır.



Şekil 4.5. Tekrar sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğal durum için)



Şekil 4.6. Tekrar sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Doğgun durum için)

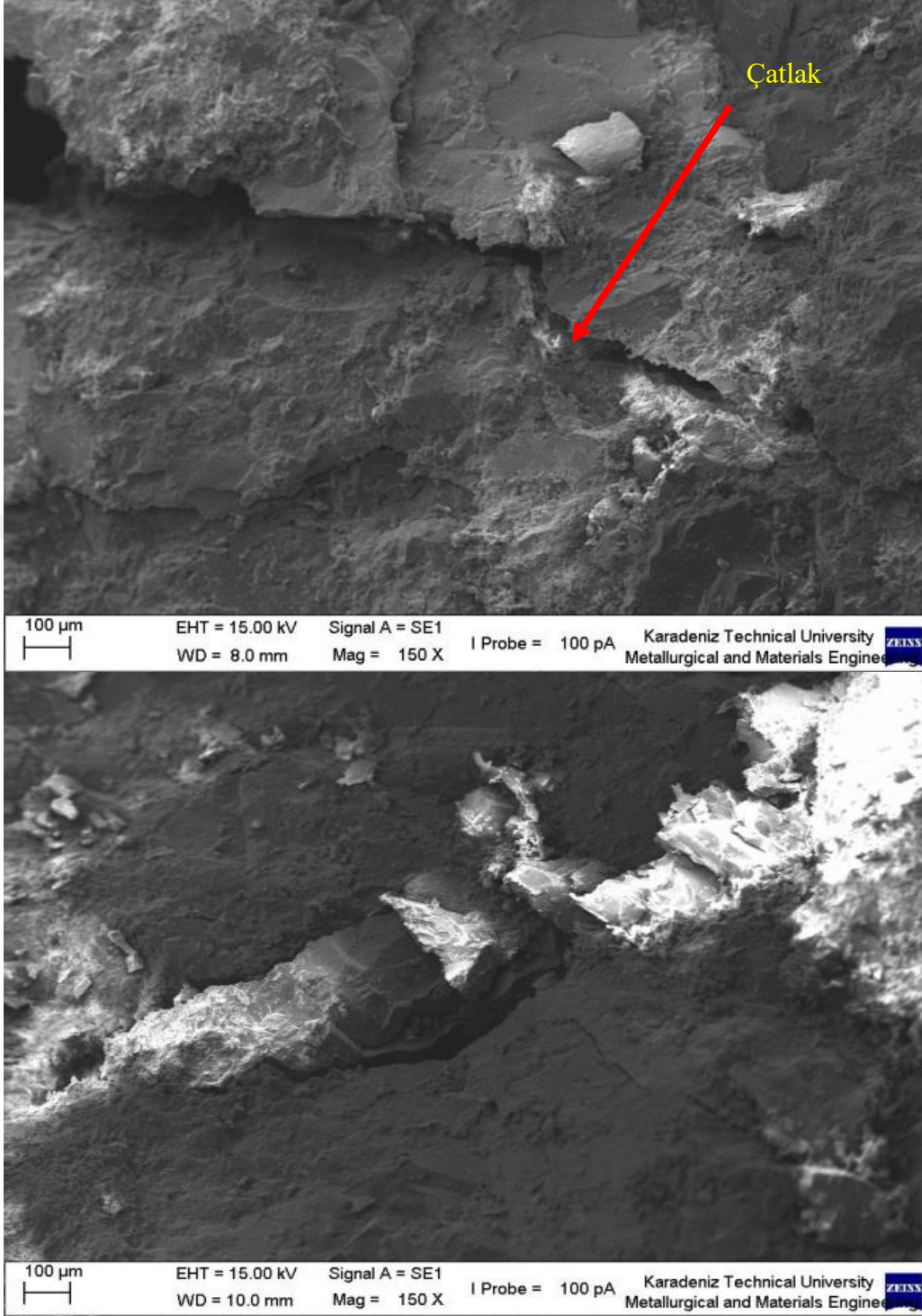
4.3. SEM Analiz Sonuçları

Çatlak oluşumu mekanizması basit bir çekme gerilmesi iken yenilme mekanizması daha karmaşık bir olgudur ve birkaç çatlakın birleşmesi ile meydana gelmektedir (Eraslan, 2011). Griffith (1924), basınç yükleri altında oluşan çatlakların bile çatlak ucunda meydana gelen çekme gerilmelerinden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Öncelikle kayaç içerisinde çatlaklar oluşmakta ve sonra çatlaklardaki ilerlemelerle yenilme meydana gelmektedir. Yenilmenin meydana gelmesi ile de Şekil 4.7’de görüldüğü gibi de yenilme yüzeyi meydana gelmektedir.

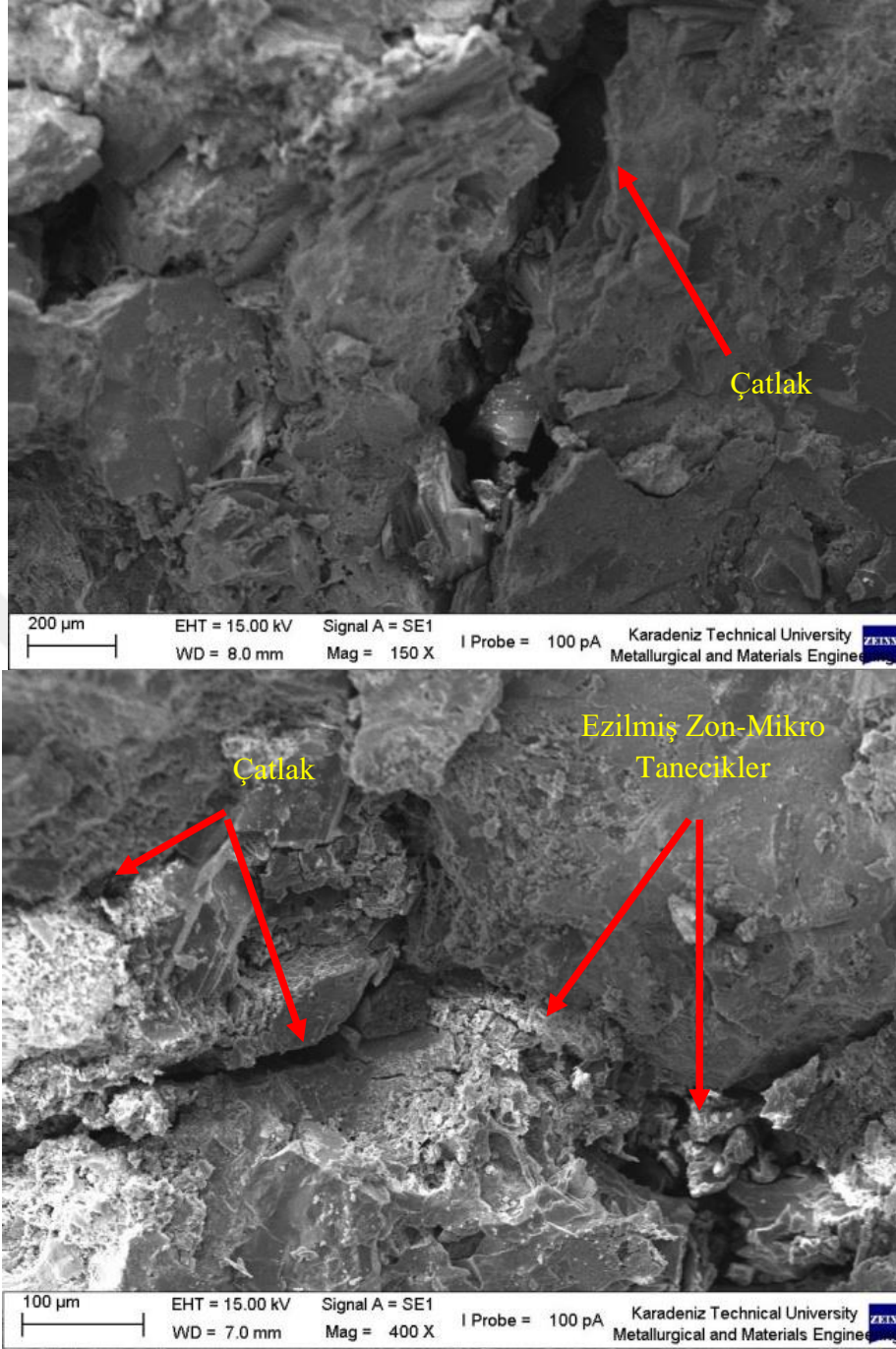


Şekil 4.7. Yenilme Yüzeyi

Bu çalışmada statik yükleme sonucunda elde edilen SEM analizi görüntüleri ile tekrarlı yükleme sonucunda elde edilen görüntüler karşılaştırılmış ve yorulma mekanizması yorumlanmaya çalışılmıştır. Elde edilen görüntüler kayaçların yenilme yüzeylerinden alınmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'deki SEM görüntülerinde görüldüğü gibi tekrarlı yüklemelere maruz bırakılan kayaçlarda (Şekil 4.9) yenilme statik yüklenen örnekler ile (Şekil 4.8) kıyaslandığında tekrarlı yüklemeler sonucunda yenilen kayaçların içerisinde daha fazla çatlak bulunmaktadır. Statik yükleme altında örnekler ağırlıklı olarak gevrek kırılma gösterirken tekrarlı yükleme altında yenilmenin ağırlıklı oranda sünek bir kırılma ile geliştiği gözlenmiştir. Kırılma yüzeylerinde çok sayıda mikro boyutta tanecik gözlenmiştir. Statik yükleme deneyleri sonucunda yenilen kayaçlarda ağırlıklı olarak daha düzgün kırılma yüzeyleri ve az sayıda çatlakların mevcut olduğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar ile örtüşmektedir (Pino vd, 1999; Eraslan, 2011).



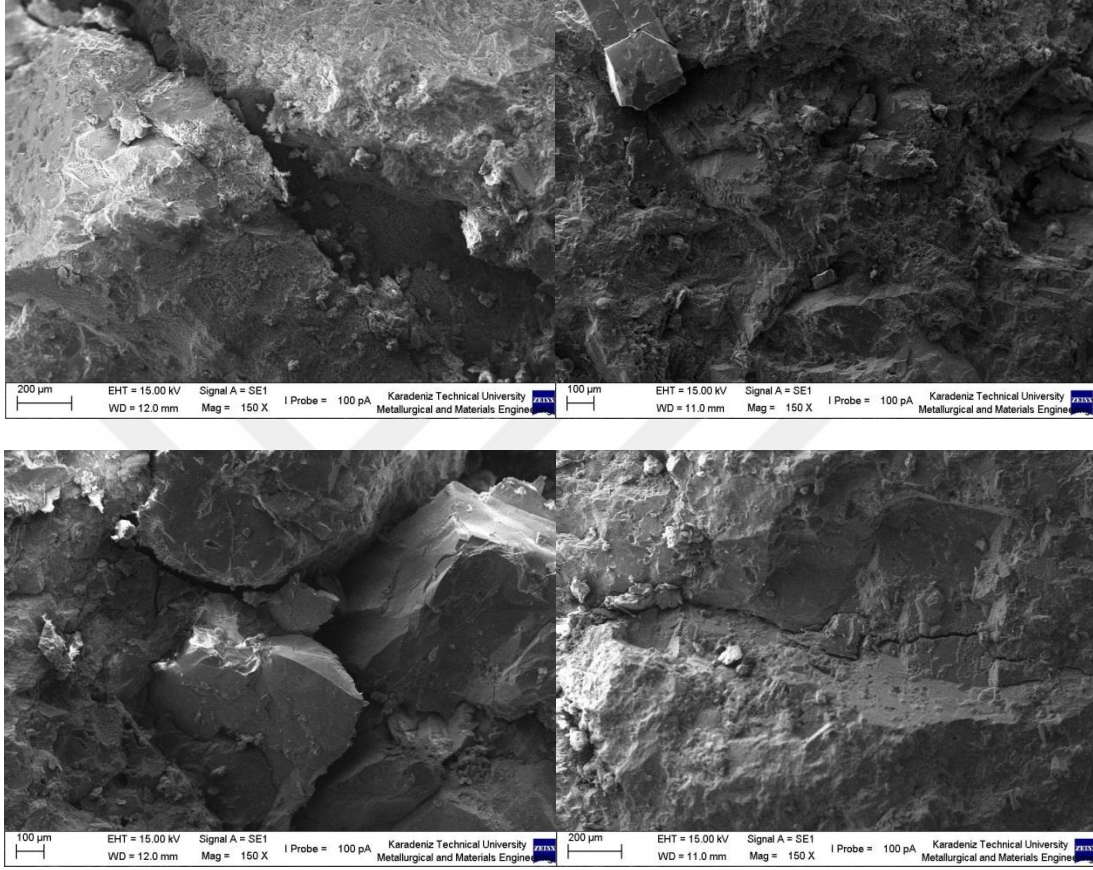
Şekil 4.8. Statik yüklemeler altında kayacın yenilme yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 4.9. Tekrarlı yüklemeler altında kayacın yenilme yüzeyinin SEM görüntüsü (F2 deney grubu numunesi)

Tekrarlı yükleme deneyleri doygun kayaca uygulandığında yenilme yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Tekrarlı yükleme koşullarında suyun da etkisi ile kayacın oluşmuş çatlakların yer yer sayıca daha fazla olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri ışığında suyun kayacın yapısı üzerindeki etkisinin çok belirgin olmadığı söylenebilir. Ancak çatlaklar boyunca yer yer kırılma yüzeylerinde bozmuş, ayrılmış

ince boyutta malzemenin oluştuğu gözlenmiştir. Bu duruma kayaçların boşluklarına giren su ve tekrarlı yüklemelerden dolayı oluşan gerilmelerin çatlak yüzeylerine etki etmesi sebep olmaktadır.



şekil 4.10. Suya doymun kayaçlarda tekrarlı yüklemelere maruz kalan kayaçların yenilme yüzeylerinin SEM görüntüleri (F2 deney grubu numunesi)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Patlatma, deprem, yoğun trafik akışı gibi olayların etki alanı içinde yer alan ve bu etkiler nedeniyle sürekli tekrar eden yüklere maruz kalan yeraltı yapılarının (tünel vb.) mekanik özelliklerinde zamanla değişimler meydana gelebilmektedir. Bu değişimler kayacın dayanımının azalmasına ve daha erken yenilmesine yol açabilmektedir. Bu da tasarlanan yapıların planlanan sürelerden daha erken yenilmesine neden olur. Bu nedenle tekrarlı yüklemelerin etki alanında oluşturulacak olan yapıların tasarımında tekrarlı yüklemelerin etkisi göz önünde bulundurulmalı ve kayacın yorulma davranışı belirlenmelidir.

Bu çalışmada tekrarlı yüklemelerin kayacın dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yükleme oranı, yükleme frekansı ve tekrar sayısının kayacın dayanımına etkisi irdelenmiştir. Aynı koşullarda kayacın doygun durumu için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler analiz edilmiş ve sonuçlar literatürde mevcut olan benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- i. Kayacın doğal ile doygun haldeki tek eksenli basınç dayanımları kıyaslandığında suyun kayacın dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür (%13 daha düşük).
- ii. Yükleme oranı değişimi ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki gözlenmiştir. Yükleme oranı arttıkça kayacın tek eksenli basınç dayanımı düşmüştür. Kayacın doygun durumunda ise kayacın dayanımı ile yük arasında bir ilişki kurulamamıştır Kayacın doğal hali ile karşılaştırıldığında doygun durum için daha düşük tek eksenli basınç dayanımları elde edilmiştir.
- iii. Frekans ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Artsn frekansla birlikte tek eksenli basınç dayanımının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Düşük frekanslarda kayacın daha düşük yüklerde yenilmeye uğradığı tespit edilmiştir. Doygun durum deneylerinde dayanım ile frekans arasında bir ilişki olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

- iv. Tekrar sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişki elde edilememiştir. Tekrar sayısının artışı ile tek eksenli basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Suya doygun durum değerlendirildiğinde ise tek eksenli basınç dayanımı ile tekrar sayısı arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.
- v. Statik yüklemelere maruz kalan kayaçların yenilme yüzeyleri SEM cihazı ile incelendiğinde kırılma yüzeylerinin daha düzgün olduğu sonucu elde edilmiştir. Tekrarlı yüklemelere maruz kalan numunelerin yüzeylerinde ise çatlakların, ezilmiş zonların ve mikro tanelerin daha fazla bulunduğu belirlenmiştir.

Kayaçların yorulma davranışının izahına yönelik genel bir sonuç elde edebilmek için yorulmayı kontrol eden faktörlerin farklı kayaçlar üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla çok sayıda çalışmanın gerçekleştirilmesine gereksinim vardır. Ayrıca elde edilen sonuçlarda suyun tekrarlı yüklemeler altında kayacın yapısını nasıl etkilediği konusunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bu durumu açıklayabilmek için daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

6. KAYNAKÇA

- Attawel, P. B. ve Farmer, I. W., 1973. Fatigue behavior of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 10, 1–9
- Badge, M. N. ve Petros, V., 2005. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min Sci., 38, 169-196.
- Badge, M. N. ve Petros V., 2005. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Min Sci., 42, 237-250.
- Bagde, M. N. ve Petros, V. 2005. The effect of machine behaviour and mechanical properties of intact sandstone under static and dynamic uniaxial cyclic loading, Rock Mech. Rock Engng., 38, 1, 59–67.
- Badge, M. N. ve Petros V., 2009. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 46, 200-209.
- Brown, E. T. ve Hudson, J. A., 1974. Fatigue failure characteristics of some models of jointed rock, Earthquake Eng Struct Dyn., 2, 379–86.
- Burdine, N. T, 1963. Rock failure under dynamic failure conditions, Soc. Petr Eng J., 3, 1-8.
- Costin, L. S. ve Holcomb, D. J., 1981. Time-dependent failure of rock under cyclic loading, Tectonophys., 79, 279-296.
- Cruden, D. M., 1974. The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr., 11, 67-73.
- Deere, D. V. ve Miller, R. L., 1966. Engineering classification and index properties of intact rock, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 90-101.
- Eraslan, N., 2011. Static and Cyclic Laboratory Testing of Brisbane Rocks, PhD Thesis, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.
- Eraslan, N. ve Williams, D. J., 2012 (a). Damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 56, 15-26.
- Eraslan, N. ve Williams, D. J., 2012 (b). Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks, Rock Mech. Rock Eng., 45, 327-340.
- Erguler, Z. A. ve Ulusay R., 2009. Water-induced variations in mechanical properties of clay bearing rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 46, 355-370.

- Fuenkajorn, K. ve Phueakphum, D., 2010. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt, Engineering Geology, 112, 43–52.
- Gong, M. ve Smith, I., 2003. Effect of waveform and loading sequence on low-cycle compressive fatigue life of spruce, J. Mater. Civ. Engng., 15, 1, 93–99.
- Griffith, A. A., 1924. The theory of rupture. In Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics, 55-63, Biezeno, Delft. C.B., Burgers, J.M. & Waltman, J. (Eds.).
- Hadley, K., 1976. The effect of cyclic stress on dilatancy: another look, J. Geophys. Res., 81, 2471-2474.
- Haimson, B. C ve Kim, C.M., 1971. Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, Rock Mechanics, 3, 845–863.
- Haimson, B. C., 1972. Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, In: Advances in rock mechanics, Proc. of the 3rd Congress of the Int. Soc. for Rock Mechanics, National Academy of Sciences, Washington, D. C., II, 373–378.
- Haimson, B. C., 1978. Effect of cyclic loading on rock, In: Dynamic geo-technical testing. ASTM STP 654, Am. Soc. Testing and Materials, 228–245
- Hardy, H. R. ve Chugh, Y. P., 1970. Failure of geological material under low cycle fatigue, Proc 6.th Canadian Rock Mech. Symp, 33–47, Montreal, Canada.
- Hashiba, K. ve Fukui, K., 2015. Effect of water on the deformation and failure of rock in uniaxial tension, Rock Mech. Rock. Eng., 48, 1751-1761.
- Ishizuka Y., Abe T., ve Kodama J., 1990. Fatigue behavior of granite under cyclic loading, In brumer R., editor, ISRM international symposium-static and dynamic considerations in rock engineering, Swaziland, 139-146.
- ISRM. Ulusay R. and Hudson J. A. (eds)., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, 1974–2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods. Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group. ISRM, Ankara, 87-88.
- Jafari, M. K., Pellet, F., Boulon, M. ve Hosseini K. A., 2004. Experimental study of mechanical behavior of rock joints under cyclic loading, Rock Mec. and Rock Engng., 37, 1, 3-23.
- Khanlari Gh. ve Momeni A. A., 2014. Assessment of fatigue behavior of Alvand Monzogranite Rocks, Journal Geology Engineering, 8, 1
- Kirby S.H., 1984. Introduction and digest to the special issue on chemical effects of water on the deformation and strengths of rocks, J.G.R., 89, 3991-3995.

- Li, N., Chen, W., Zhang, P. ve Swoboda, G., 2001. The mechanical properties and a fatigue damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38, 1071–1079.
- Li, N., Zhang, P., Chen, Y. ve Swoboda, G., 2003. Fatigue properties of a cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, 145–150.
- Li, X., Zhou, Z. Zhao, F., Zuo, Y., Ma, C., Ye, Z. ve Hong, L., 2009. Mechanical properties of rock under coupled static-dynamic loads, Int. J. Rock Mech. and Geotech. Engng., 1, 1, 41-47.
- Liang, W., Zhang C., Gao, H., Yang, X., Xu, S. ve Zhao, Y., 2012. Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading, J Rock Mec. and Geo. Engng., 4, 1, 54-61.
- Masuda, K., 2001. Effects of water on rock strength in brittle regime, J. of Struc. Geo. P., 1653-1657.
- Mirzamani, K. O., Goodarzi A. ve Mirzamani, N. O., 2011. Assessment of the dynamic loads effect on underground mines supports, 30th International Conference on Ground Control in Mining, United Kingdom.
- Mohd Salim N. A. ve Mohamed Z., 2012. Cyclic loading effect on the uniaxial compressive strength of weathered rock, 6th SASTech 2012, Malaysia Kuala Lumpur.
- Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R. ve Heidari M., 2015. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 77, 89-96.
- Pino, R. D., Narducci, P. ve Carfagni, G. R., 1999. A SEM investigation on fatigue damage of marble, Journal of Materials Sci. Letters, 18, 1619-1622.
- Prost CL, 1988. Jointing at rock contacts in cyclic loading, Int J Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 25, 5, 263–272.
- Ray S.K., Sarkar M. ve Singh T.N., 1999. Effect of loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36, 543–549.
- Singh, S.K., 1989. Fatigue and strain hardening behaviour of greywacke from the flagstaff formation, NSW, Engineering Geology, 26, 171–179.
- Stavrogin A. N. ve Tarasov B. G., 2001. Experimental physics and rock mechanics, Balkem (Rotterdam), 356.
- Taheri, A., Royle, A., Yang, Z. ve Zhao Y., 2016. Study on variations of peak strength of a sandstone during cyclic loading, Geomech. Geophy. Geo-energy Geo-resour., 2, 1-10.

- Tien Y. M., Lee D. H. ve Juang C. H., 1990. Strain, pore pressure and fatigue characteristics of sandstone under various load conditions, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 27, 4, 283–289.
- Vasarhelyi, B. ve Van, P., 2006. Influence of water content on the strength of rock, Engineering Geology, 84, 70-74.
- Wang, Z., Li, S. ve Qiao Li, 2013. Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition, Rock Mec. Rock Eng., 46, 1603-1615.
- Xia J Q., Ding D. X., Xu G. ve Jiang F. L ., 2008. Waveform effect on quasi-dynamic loading condition and mechanical properties of brittle materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 45, 621-626.
- Xia J Q., Ding D. X., Jiang F. L. ve Xu G., 2010. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 461-468.
- Yilmaz, I., 2010. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 342-347.
- Zhenyu T. ve Haihong M., 1990. Technical note: an experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geo. Mech. Abstr., 27, 1, 51–56.
- Zhou, Z., Wu, Z., Li, X, Li, X. ve MA, C., 2015. Mechanical Behavior of red sandstone under cyclic point loading, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 25, 2708-2717.
- Zoback, M. D. and Byerlee, J. D., 1975. The effect of cyclic differential stress on dilatancy in westerly granite under uniaxial and triaxial conditions, J. Geophys. Res., 80, 1526-1530.

ÖZGEÇMİŞ

Melek Hanım BEŞER, 27.03.1990 yılında Sürmene/Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğretimini Yakup Kalafatoğlu İlköğretim Okulu'nda tamamlayan yazar, Lise öğrenimini 2008 yılında Sürmene Hasan Sadri Yetmiş bir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013 yılında bir yıl İngilizce hazırlık eğitimi alarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü üçüncülikle bitirdi. Aynı yıl Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılına kadar 8 dersi başarı ile tamamladıktan sonra 2015 yılında kaydını Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne alarak yüksek lisans öğrenimine devam etti. 2015 Şubat ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden İşletme Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı ve hala görevine devam etmektedir.