

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YANGINA MARUZ KALAN KİREÇTAŞI VE MERMERLERİN MİKRO-
YAPISAL, FİZİKSEL, DAYANIM ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN
BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda İNALTUN

MART 2023
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YANGINA MARUZ KALAN KİREÇTAŞI VE MERMERLERİN MİKRO-
YAPISAL, FİZİKSEL, DAYANIM ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN
BELİRLENMESİ**

Seda İNALTUN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“JEOLojİ YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09/02/2023
Tezin Savunma Tarihi : 03/03/2023**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan ERSOY

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz kalan kireçtaşı ve mermer örneklerinin mineralojik, fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiş, hasarsız deney verileri kullanılarak kayaların dayanımlarındaki değişimler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmamın tüm aşamalarında ve tamamlanmasında bilgileriyle beni yönlendiren, yardımlarını ve önerilerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan ERSOY'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmamın yürütülmesinde yanımda olan bilgi, eleştiri ve önerileriyle hiçbir yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Muhammet Oğuz SÜNNETCİ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar ve tez sürecinde yardımlarını gördüğüm Arş. Gör. Murat KARAHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm öğrenim hayatım boyunca bana güvenen sabrı ve sevgisiyle her zaman yanımda olan, maddi manevi her türlü desteklerini ve fedakârlıklarını esirgemeyen sevgili anneme gönülden ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecimde her türlü desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan arkadaşım, N. Kardelen ESİM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seda İNALTUN
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yangına Maruz Kalan Kireçtaşı ve Mermerlerin Mikro-Yapısal, Fiziksel, Dayanım Özelliklerindeki Değişimlerin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan ERSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, 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. 03/03/2023

Seda İNALTUN

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. Çalışmanın Amacı	5
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	7
2.2. Örnek Hazırlama	7
2.3. Örneklerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	8
2.3.1. Birim Hacim Ağırlık	9
2.3.2. Özgül Ağırlık.....	10
2.3.3. Porozite.....	11
2.4. Ultrasonik Hız Deneyi.....	11
2.5. Equotip (Leeb Sertliği) Deneyi	12
2.6. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	13
2.7. Isıl İşlem Yöntemi	14
2.8. Mineralojik ve Mikro-Yapısal Tayinler	15
2.8.1. Mineralojik Tayin.....	15
2.8.2. XRD (X-Işını Kırınımı).....	16
2.8.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu)	17
3. BULGULAR VE İRDELEMELER	19
3.1. Mineralojik ve Mikro-Yapısal Özellikler.....	19
3.1.1. XRD (X-Işın Kırınımı) Analizleri.....	20
3.1.2. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)	21
3.2. Fiziksel Özellikler	22
3.2.1. Örneklerin Boyuna Dalga Hızları.....	25

3.2.2.	Örneklerin Leeb Sertliği Değerleri.....	27
3.3.	Kayaçların Dayanım Özellikleri.....	29
3.4.	Sıcaklıkla Değişim	30
3.4.1.	Mineralojik ve Mikro-Yapısal Özelliklerin Değişimi	30
3.4.1.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	30
3.4.2.	Fiziksel Özelliklerin Değişimi.....	32
3.4.2.1.	Boyuna Dalga Hızı	36
3.4.2.2.	Equotip (Leeb Sertliği).....	38
3.4.3.	Dayanım Özelliklerinin Değişimi	39
4.	TARTIŞMA.....	42
5.	KAYNAKLAR.....	45

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YANGINA MARUZ KALAN KİREÇTAŞI VE MERMERLERİN MİKRO-YAPISAL, FİZİKSEL, DAYANIM ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN BELİRLENMESİ

Seda İNALTUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2022, 47 Sayfa

Bu çalışma kapsamında, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kireçtaşı ve mermer örneklerinin mineralojik, fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiş, hasarsız deney verileri kullanılarak kayaçların dayanımlarındaki değişimler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kayaçların boşluk oranı değerlerine bakıldığında yüksek sıcaklığa maruz kalan kireçtaşı örneklerinin boşluk oranında bir azalma olduğu, mermer örneklerinde ise yüksek sıcaklıkla boşluk oranında artma olduğu görülmüştür. Çalışmada sıcaklık artışına bağlı olarak gelişen küçük değişimlerin sıcaklıktan kaynaklanmadığı, yüksek sıcaklıkların (680 °C ye kadar) bu tip karbonat kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde etkin olmadığı belirlenmiştir. Kayaçların mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ince kesitlerden yararlanılmıştır. Örneklerden alınan ince kesitlerde kalsit mineralinin hâkim olduğu görülmüştür. Hasarsız deneylerde boyuna dalga hızı sıcaklık artışına bağlı olarak her sıcaklık kademesinde azaldığı görülmüştür. Leeb sertlik değerleri de ölçülmüş ve mermerlerde sıcaklık artışı ile genel olarak sertlik değerlerinde bir azalma kaydedilmiştir. Kireçtaşı örneklerinde ise mermerlerden farklı olarak Leeb değerlerinde artış görülmüştür. Artan sıcaklığa bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerindeki değişim Leeb sertlik değerlerindeki değişimle benzer eğilim göstermektedir. Dayanım ise tek eksenli basınç değeri ile karakterize edilmiştir. Sıcaklık artışının dayanım üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Kireçtaşı örneklerinde sıcaklığa bağlı olarak dayanımda bir artış gözlenirken mermer örneklerinde ise sıcaklığın artmasıyla dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum tamamıyla kil içeriğine bağlıdır. Çalışmada ısıtma yöntemi olarak Eurocode (2002) tarafından önerilen ve maksimum 680 dereceye ulaşan sıcaklık eğrisi kullanılmış, örnekler 200, 300, 400, 500, 600 ve 680 °C, 2 saat süre ile yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Termal çatlakların gelişmemesi için yavaş soğuma şekli tercih edilmiş, örnekler fırın içinde kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklıkların kayaçlar üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde litolojik özelliklerden farklı olarak mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerinin çok etkili olduğu, özellikle kil içeriğinin büyük önem taşıdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Sıcaklık, Karbonat Kayaçlar, Tek Eksenli Basınç, Leeb Sertliği, Eurocode

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF CHANGES IN THE MICRO-STRUCTURAL, PHYSICAL, STRENGTH PROPERTIES OF LIMESTONE AND MARBLES EXPOSED TO FIRE

Seda İNALTUN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geology Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2022, 47 Pages

Within the scope of this study, changes in the mineralogical, physical and strength properties of limestone and marble samples exposed to high temperatures were investigated, and the changes in the strength of the rocks were tried to be estimated using non-destructive test data. When the void ratio values of the rocks were examined, it was observed that there was a decrease in the void ratio of the limestone samples exposed to high temperatures, while an increase in the void ratio in the marble samples with high temperature. In the study, it was determined that the small changes due to the increase in temperature were not caused by heat, and high temperatures (up to 680 °C) were not effective on the physical properties of this type of carbonate rocks. Thin sections were used to determine the mineralogical and microstructural properties of the rocks. It was observed that calcite mineral was dominant in the thin sections taken from the samples. In non-destructive tests, it was observed that the longitudinal wave velocity decreased at each temperature level depending on the temperature increase. LEEB hardness values were also measured, and a decrease in the hardness values in general was recorded with the increase in temperature in marbles. Unlike marbles, limestone samples showed an increase in Leeb values. The change in uniaxial compressive strength values with increasing temperature shows a similar trend with the change in Leeb hardness values. Strength is characterized by uniaxial compression strength value. The effect of temperature increase on strength was also evaluated. While an increase was observed in the strength depending on the temperature in the limestone samples, it was observed that the strength of the marble samples decreased with the increase in temperature. This depends entirely on the clay content. In the study, the temperature curve recommended by Eurocode (2002), reaching a maximum of 680 degrees, was used as the heating method, and the samples were exposed to high temperatures at 200, 300, 400, 500, 600 and 680 °C for 2 hours. In order to prevent the development of thermal cracks, the slow cooling method was preferred, and the samples were left to cool naturally in the furnace. When all the results obtained within the scope of the study were evaluated, it was determined that the mineralogical and micro-structural properties were very effective, especially the clay content, unlike the lithological properties, in the evaluation of the effect of high temperatures on the rocks.

Key Words: High Temperature, Carbonate Rocks, Uniaxial Compression, Leeb Hardness, Eurocode

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Dünyada bazı tarihi yapılarda çıkan yangınlar (a) 2019 Notre Dame Katedrali yangını, (b) 2018 Brezilya Ulusal Müzesi yangını, (c) 2019 Japonya Shuri Kalesi yangını.....	1
Şekil 2.	Örnek resimleri (a) kireçtaşı örnekleri (b) mermer örnekleri.....	7
Şekil 3.	(a) örnek bloklarından karot alınması işlemi , (b) örneklerin kumpas yardımı ile çap, boylarının belirlenmesi.....	9
Şekil 4.	(a) Kireçtaşı örneklerinin etüvden sonra hassas terazi ile ölçülmesi, (b) mermer örneklerinin etüvden sonra hassas terazi ile ölçülmesi.....	10
Şekil 5.	Özgül ağırlık deney ekipmanı	11
Şekil 6.	(a) Ultrasonik hız aleti (b) p-dalga hızı ölçülmesi.....	12
Şekil 7.	Equotip sertlik cihazı.....	13
Şekil 8.	Çalışmalarda kullanılan yangın-sıcaklık eğrisi (Eurocode, 2002)	15
Şekil 9.	Isıl işlem görmüş kireçtaşı örnekleri	15
Şekil 10.	(a) Polarizan mikroskop, (b) örneklerin ince kesitlerinin incelenmesi	16
Şekil 11.	(a) Örnek kırma aleti, (b) örneklerin öğütülmesi	17
Şekil 12.	SEM analizleri öncesinde örneklerin vakumlu ortamda altınla kaplanması.....	18
Şekil 13.	Kireçtaşı ve mermer örneklerinin başlangıç koşulu ince kesit görüntüleri (a) kireçtaşının başlangıç koşulu tek nikol görüntüsü, (b) kireçtaşının başlangıç koşulu çift nikol görüntüsü, (c) mermerin başlangıç koşulu tek nikol görüntüsü, (d) mermerin başlangıç koşulu çift nikol görüntüsü	19
Şekil 14.	Kireçtaşı örneklerine ait XRD analiz sonuçları.....	20
Şekil 15.	Mermer örneklerine ait XRD analiz sonuçları	21
Şekil 16.	SEM görüntüleri (a) kireçtaşı başlangıç koşulu x1000 görüntüsü (b) mermer başlangıç koşulu x1000 görüntüsü.....	22
Şekil 17.	(a) Kireçtaşı 200°C sıcaklık SEM görüntüsü, (b) kireçtaşı 300°C sıcaklık SEM görüntüsü, (c) kireçtaşı 400°C sıcaklık SEM görüntüsü, (d) kireçtaşı 500°C sıcaklık SEM görüntüsü, (e) kireçtaşı 600°C sıcaklık SEM görüntüsü, (f) kireçtaşı 680°C sıcaklık SEM görüntüsü.....	31
Şekil 18.	(a) Mermer 200°C sıcaklık SEM görüntüsü, (b) mermer 300°C sıcaklık SEM görüntüsü, (c) mermer 400°C sıcaklık SEM görüntüsü, (d) mermer 500°C sıcaklık SEM görüntüsü, (e) mermer 600°C sıcaklık SEM görüntüsü, (f) mermer 680°C sıcaklık SEM görüntüsü	32
Şekil 19.	Kireçtaşı örneklerinin özgül ağırlık-sıcaklık değişimi	34
Şekil 20.	Mermer örneklerinin özgül ağırlık-sıcaklık değişimi.....	34

Şekil 21.	Kireçtaşı örneklerinin porozite-sıcaklık değişimi	35
Şekil 22.	Mermer örneklerinin porozite-sıcaklık değişimi.....	35
Şekil 23.	Kireçtaşı örneklerinin p-dalga hızı-sıcaklık değişimi grafiği.....	37
Şekil 24.	Mermer örneklerinin p-dalga hızı-sıcaklık değişimi grafiği	37
Şekil 25.	Kireçtaşı örneklerinin equotip-sıcaklık değişim grafiği.....	39
Şekil 26.	Mermer örneklerinin equotip-sıcaklık değişim grafiği	39
Şekil 27.	Kireçtaşı örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı- sıcaklık değişimi grafiği	41
Şekil 28.	Mermer örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı- sıcaklık değişimi grafiği	41



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kayaçlar üzerinde yüksek sıcaklıklarla ilgili çalışmalarda kullanılan yöntemler.....	2
Tablo 2. Kireçtaşı örneklerinin fiziksel özellikleri.....	23
Tablo 3. Mermer örneklerinin fiziksel özellikleri.....	24
Tablo 4. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulu özgül ağırlıkları	25
Tablo 5. Mermer örneklerinin başlangıç koşulu özgül ağırlıkları	25
Tablo 6. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulları P- dalga hızı değerleri	25
Tablo 7. Mermer örneklerinin başlangıç koşulları P- dalga hızı değerleri.....	26
Tablo 8. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin başlangıç koşulu için Leeb sertliği ortalamaları.....	28
Tablo 9. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulu tek eksenli basınç dayanımı.....	29
Tablo 10. Mermer örneklerinin başlangıç koşulu tek eksenli basınç dayanımı	29
Tablo 11. Artan sıcaklığa bağlı olarak kireçtaşı örneklerinin porozite ve özgül ağırlık değerlerindeki değişim.....	33
Tablo 12. Artan sıcaklığa bağlı olarak mermer örneklerinin porozite ve özgül ağırlık değerlerindeki değişim.....	33
Tablo 13. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklık P-dalga hız değişimi	36
Tablo 14. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklık-equotip değişimi	38
Tablo 15. Kireçtaşları örneklerinin sıcaklık-tek eksenli değişimi.....	40
Tablo 16. Mermer örneklerinin sıcaklık-tek eksenli değişimi.....	40

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: yüzey alanı (m^2)
D	: Silindirin çapı (cm)
d	: yoğunluk (gr/cm^3)
F	: yenilme yükü (kN)
L	: Silindirin boyu (cm)
m	: kütle (gr)
n	: porozite (%)
t	: süre (sn)
V	: numune hacmi (cm^3)
V _p	: boyuna dalga hızı (m/sn)
m ₁	: piknometre kütlesi (gr)
m ₂	: piknometre kütlesi + kuru örnek kütlesi (gr)
m ₃	: piknometre kütlesi + kuru örnek kütlesi + saf su kütlesi (gr)
m ₄	: piknometre kütlesi + saf su kütlesi (gr)
γ	: birim hacim ağırlık (kN/m^3)
σ_c	: tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
ρ_K	: kuru yoğunluk (g/cm^3)
ρ_{dane}	: dane yoğunluğu (g/cm^3)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Donma-çözünme, ıslanma-kuruma döngüleri, asit yağmurları ve yüksek sıcaklıklar gibi olaylar kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış kayaçlarda birçok değişim meydana gelir ve dayanımlarında da değişiklikler olur. Kayaçlar yangınlar veya nükleer atıkların depolandığı derin jeolojik bariyerlerde radyoaktiviteye bağlı olarak yüksek sıcaklığa maruz kalabilirler. Özellikle yangınlarda ortam sıcaklığı iç yangınlar için 1000°C üzerine çıkabilirken, dış yangınlarda ise 680°C'yi bulabilir. Yangınların ortaya çıkardığı yüksek sıcaklıklar mühendislik yapılarına ciddi hasar verebilmektedir. Bu durumun en çarpıcı ve acı örneklerinden bazıları tarihi yapılarda meydana gelen yangınlardır (Şekil 1).



Şekil 1. Dünyada bazı tarihi yapılarda çıkan yangınlar (a) 2019 Notre Dame Katedrali yangını, (b) 2018 Brezilya Ulusal Müzesi yangını, (c) 2019 Japonya Shuri Kalesi yangını (URL 1,2,3)

Meydana gelen yangınlardaki sıcaklık artışları doğrusal değildir. Bir dış yangında ortam sıcaklığı beş dakikada 500°C'yi, 10 dakikada ise 680°C'yi bulmaktadır (Eurocode, 2002). Bu sebeple yangınların kayaçlar ve yapılar üzerindeki etkisini araştırmak için Eurocode (2002) tarafından önerilmiş olan ‘‘üstel sıcaklık-zaman eğrisi’’nden yararlanılır. Literatürde yüksek sıcaklıkların kayaçların mekanik davranışı üzerine etkisini araştıran çalışmalarda ısıtma şekli, soğuma şekli, ısıtma hızı, maruz kalma süresi, maksimum sıcaklık gibi parametreler farklılık göstermektedir. Bazı araştırmacılar ısıtma işlemini kül fırını ile yaparken bazı araştırmacılar yangın odaları ile gerçekleştirmişlerdir. Soğutma sürecinde

uygulanan yöntemler de farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalarda oda sıcaklığında veya fırın içerisinde (fırın kapağı açık veya kapalı şekilde) soğuma sağlanırken, bazı çalışmalarda ise su veya sıvı nitrojen içerisinde soğutma gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıkların kayalar üzerindeki etkilerini araştıran başka araştırmacıların çalışmalarına bakıldığında ısıtma hızlarında da farklılıklar görülmektedir. Araştırmaların çoğunda lineer artış gösteren yangın eğrilerini kullanırken sıcaklığa maruz kalma süreleri farklılık göstermektedir. Bu süre bazı çalışmalarda 2 saat bazı çalışmalarda ise 12 saate ulaşmıştır. Çalışmalarda en yüksek sıcaklık seviyelerinde de farklılıklar vardır. Bazı araştırmacılar 800°C ye kadar ısıtma yaparken bazı araştırmacılar 1200°C ye kadar ısıtma gerçekleştirmişlerdir. Bununla ilgili bazı çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kayalar üzerinde yüksek sıcaklıklarla ilgili çalışmalarda kullanılan yöntemler

Uygulama	Genellikle	Az oranda	Nadiren
Isıtma şekli	Kül Fırını		Alev
Kaynaklar	*Ersoy vd (2019) *Yang vd (2019) *Meng vd (2019) *Ozguven , Özçelik (2014)		*Koca vd (2006) *Heldal and Storemyr, (2015)
Soğuma şekli	Havada veya fırın içinde	Suda	Likit nitrojen, asitli su
Kaynaklar	*Ersoy vd (2019) *Wang (2015) *Török ve Hajpal (2005)	*Ersoy vd (2019) *Li vd. (2020)	*Li vd (2019)
Isıtma oranı (°C/dak)	1-10	<1 veya > 10	Lineer olmayan yangın eğrileri
Kaynaklar	*Meng (2019) (10°C/dk) *Chaki vd. (2007) (1°C/dk) *Beck vd (2015) (2°C/dk) *Wu vd (2013) (5°C/dk)	*Yavuz vd (2009) (20°C/dk)	*Ersoy vd (2021a)
Maruz kalma süresi (saat)	2-6	> 6 veya gün	Farklı zamanların etkisi
Kaynaklar	*Beck vd (2015) (3s) *Meng vd (2019) (4s)	*Yavuz (2009) (12s)	*Ersoy vd. (2021b)
Maksimum sıcaklık (°C)	500-1000	> 1000	Standart yangın sıcaklığı
Kaynaklar	*Meng vd (2019) (800°C) *Ozguven ve Ozcelik (2014) (1000°C) *Yang vd (2019) (900°C)	*Kılıç (2006) (1050°C) *Wu (2013) (1200°C)	*Ersoy vd. (2021a) (680°C)

Kademeli olarak sıcaklığa tabi tutulan kayaçların dayanımlarının incelenmesi üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur. Tek eksenli basınç dayanımı gibi örneğe hasar veren deneyler dışında boyuna dalga hızı ölçümü gibi hasarsız deneyler de mevcuttur. Meng vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada; 200°C'den 800°C ye kadar kireçtaşı örneklerini gruplandırarak kademeli olarak ısıtma işlemi uygulanmışlardır. İstenen sıcaklığa ulaştıklarında kayaç örneklerini 4 saat fırında bekletmişlerdir. Isıtma oranı 10°C/dk'dır. Kayaçları fırından çıkarttıktan sonra doğal soğutma ile soğutmuşlardır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların P-dalga hızındaki değişime baktıklarında sıcaklık arttıkça P-dalga hızında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Yang vd. (2019) yaptıkları çalışmada ise 100°C den başlayarak 900°C ye kadar kireçtaşı örneklerini kademeli olarak ısıtmış istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra ise 2 saat bekletmişlerdir. Isıtma oranı ise 5°C/dk olarak tercih etmişlerdir. Sıcaklık artışıyla birlikte tek eksenli basınç dayanımının sıcaklık etkisinin kayaya hasar verdiğini gözlemlemişlerdir. Beck vd (2016) tarafından yapılan çalışmada, bir bina yangınına maruz kalmış beton malzemenin yapısal özelliklerindeki değişikliklere neden olan yüksek sıcaklıkları incelenmiştir. Sıcaklık derecesi 100°C ile 900°C arasında kademeli olarak arttırılmış, ısıtma oranı 2°C/dk olarak seçilmiştir. Hedef sıcaklığa ulaştıklarında örnekleri 3 saat ısıya tabi tutmuşlar. ısıtma işlemi uğrayan kayaçlar üzerinde hasarsız deneyler uygulanmış ve P- dalga hızındaki değişimde 400°C üzerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ersoy vd. (2021a) yaptıkları çalışmada kalkarenitleri kül fırınında belli kademelerde sıcaklığa tabi tutmuşlardır. İstenilen sıcaklığa ulaştığında 2 saat ısıya maruz bırakmışlar, soğuma işlemini ise oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Kalkarenitlerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları zaman fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimini incelemişler ve çalışma sonucunda kalkarenitlerin yapılar da sadece dış kaplama olarak kullanılmasını önermişlerdir. Özgüven ve Özçelik (2014) yaptıkları çalışmada; kireçtaşı ve mermerler üzerinde yaptıkları kademeli olarak artan sıcaklık artışının kayaç üzerindeki etkilerine bakmışlardır. Örnekleri 200°C den başlayıp kademeli olarak 1000°C ye kadar kül fırınında ısıtmış, soğuma işlemini ise fırın içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Isıtma oranı 5°C/dk olarak belirlemiş ve 1 saat boyunca hedef sıcaklığa tabi tutmuşlardır. Artan sıcaklıkla birlikte kayacın porozitesinde artış meydana geldiğini tespit etmişler, bu durumda kılcal çatlaklar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Sıcaklık artışıyla kayaçların sertliklerinde büyük bir değişim olmadığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla soğuma sırasında emilen su miktarının artması yıkımlara yol açabileceğini bu yüzden yangın anında su ile müdahalede güvenlik önlemlerinin alınmasını öngörmüşlerdir. Ayrıca sıcaklık değişimi ile basınç dayanımları

değerleri değişebileceğini, 600°C ve üzeri sıcaklıklarda dayanımlarında bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yüzden bu sıcaklıklara ulaşabileceği düşünülen yerlere kireçtaşı ve mermer kullanımı uygun bulmamışlardır. Li vd (2019) yaptıkları çalışmada kumtaşı örneklerini kademeli olarak yüksek sıcaklıklara maruz bırakmış fakat ısıtma işlemi sona erdikten sonra su ve sıvı nitrojen ile soğutarak örneklerin dayanımlarını kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, kumtaşının artan sıcaklıkla birlikte P- dalga hızında, çekme dayanımında ve tek eksenli basınç dayanımında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Su ile soğutma işlemine göre sıvı nitrojen işlemi ile soğutulan kumtaşlarının dayanımının daha fazla düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Kaya mekaniği çalışmalarında sıkça kullanılmaya başlanan bir diğer hasarsız deney de Leeb sertlik deneyidir. İlk olarak metalik malzemelerin yüzey sertliğini ölçmek için Leeb (1979) tarafından geliştirilen yöntem son zamanlarda kaya malzemelerinin mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır. Corkum vd (2018) yaptıkları çalışmada equotip uygulama metodlarından bahsetmişlerdir. Equotip sertlik cihazının uygulanacağı örneğin çap, boy oranı 0.4 den büyük olmasına ve hacminin 90 cm³ den küçük olmasına dikkat edilmesi gerektiğini ve uygulanacak yüzeyin pürüzsüz olmasının önemini vurgulamışlardır. Ölçüm yapılacak yüzeye tek bir noktadan vuruş yapılmaması gerektiğini, 25-30 mm çapında bir alana farklı yerlere vuruş yapılması gerektiğinden bahsetmişlerdir. Vuruş sayısı için ise ortalama genellikle 12 vuruşun yeterli olduğunu fakat kayacın değişkenlik gösterdiğinde 20, en fazla 30 vuruş olması gerektiğini, 30'dan fazla vuruş yapıldığında ise H_L değerinin azaldığını bu yüzden de sağlıklı bir sonuca ulaşılmadığını ortaya koymuşlardır.

Kayaçların mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişimini inceleyen çalışmalarda hasarsız deneyler sık sık kullanılsa da Leeb sertlik deneyini kullanan çalışmaların sayısı çok azdır. Kawanishi vd (2019) yaptıkları çalışmalarında beton numuneleri RABT yangın eğrisine göre ısıtmışlardır. Bu eğrinin kullanım amacı bir tünelde gerçekleşen yangını simüle etmektir. Sıcaklık 5 dakikada 1200°C yi bulmaktadır. Ölçülmek istenen örnekten 100 mm uzağa yerleştirilen ısı çiftleri ile sıcaklığı kontrol etmişlerdir. 1 saat boyunca sıcaklığı sabit tutmuşlardır. Bu çalışmadaki amaç, equotip sertlik test cihazındaki geri tepme sayısı ile bir yangın durumunda tüneldeki beton yapılarda oluşan hasarın derinliğini tespit etmektir. Hasarlı derinliğin equotip test cihazı geri tepme sayısı ölçülerek tahmin edilebileceğini öngörmüşlerdir. Garrido vd. (2021) yaptıkları bu çalışmada kireçtaşlarının dayanımı ve sertliğinde yüksek sıcaklıkların etkilerine bakmışlardır. Kireçtaşlarını 200°C den başlayıp

900°C ye kadar kademeli olarak sıcaklığa tabi tutmuşlardır. Hızlı ve yavaş olarak iki tür soğutma gerçekleştirmişlerdir. Her örneğin leeb sertliğine bakmışlar, Leeb sertliğine bakmadan önce örneğin yüzeyinin pürüzsüz olmasına dikkat etmişlerdir. Her örneğe 25-50mm çapında bir alanda ölçüm yapıp, 10 ölçüm kaydetmişlerdir. Sıcaklığa tabi tutulan örneklerde sertlik; 700°C ye kadar yavaş ve kademeli olarak değiştiğini ve sonrasında keskin bir düşüş olduğunu tespit etmişlerdir. Değişikliklerin 700°C ye kadar her iki soğutma yöntemi içinde geçerli olduğunu gözlemlemişlerdir. Yavaş soğuyan numunelerde sertlik kaybının hızlı soğuyan numunelere göre %13 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre sırasıyla yavaş ve hızlı soğutma %92.7 ve %95 oranında bir düşüşün meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. 700°C ye kadar sertlik yavaş yavaş azalırken 700°C üzerine çıktıkça kayacın sertliğinde hızlı bir azalma olduğunu belirlemiş ve yavaş soğutulan numunelerde 900°C sertlikteki azalma hızlı soğuyan numunelere göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yüksek sıcaklıkların kayaçların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalar değerlendirildiğinde, bu çalışmalarda hasarsız deneylerin sık sık uygulanmasına rağmen equotip deneyinin bu çalışmalarda nadiren kullanıldığı gözükmemektedir. Deneyin uygulanma pratikliği, tarihi yapılar veya çok düşük dayanımlı kayaçlar üzerinde dahi uygulanabilir olması ve deney aletinin taşınabilirliği gibi önemli avantajları olduğu düşünüldüğünde, equotip deneyinin kayaçların mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişiminin incelendiği çalışmalarda uygulanabilirliğinin araştırılmasının önem taşıdığı anlaşılmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışma kapsamında, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kireçtaşı ve mermer örneklerin mineralojik, fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiş, hasarsız deney verileri kullanılarak kayaçların dayanımlarındaki değişimler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kayaçların mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerin belirlenmesi amacıyla ince kesitler, XRD analizleri ve SEM görüntülerinden yararlanılmış, hasarsız deneylerde boyuna dalga hızı ve LEEB sertlik değerleri ölçülmüş, dayanım ise tek eksenli basınç değeri ile karakterize edilmiştir. Çalışmada ısıtma yöntemi olarak Eurocode (2002) tarafından önerilen ve maksimum 680 °C ye ulaşan sıcaklık eğrisi kullanılmış, örnekler 200, 300, 400, 500, 600 ve 680 °C de 2 saat süre ile yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Termal çatlakların

gelişmemesi için yavaş soğuma şekli tercih edilmiş, örnekler fırın içinde kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışmada Kullanılan Kayaçlar

Bu çalışmada karbonat kayaçlar ısıtıl işlemlere tabi tutulmuş, bu kapsamda Marmara Mermeri ve Trabzon Araklı ilçesinde yüzeylenen kireçtaşları çalışmaya dahil edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Örnek resimleri (a) kireçtaşı örnekleri (b) mermer örnekleri

2.2. Örnek Hazırlama

Kaya mekaniği deneylerinde standartlara uygun şekilde örnek hazırlanması önemlidir. Örnekler belli standartlara uygun olarak hazırlanır. Alınan karot örnekleri üzerinde kesme, yüzeylerin törpülenmesi işlemlerine örnek hazırlama ismi verilmektedir. Örnek hazırlamada; ISRM (2007) önerilerine dikkat edilerek örnekler hazırlanır. Öncelikle alınan bloklardan karot alma makinesi ile mermer ve kireçtaşından 35'er adet olmak üzere

toplamda 70 adet silindirik örnek alınmıştır (Şekil 3a). Deney için hazırlanan örneklerin süreksizlik, kırık, çatlak içermemesine dikkat edilir.

Kullanılan karotiyer 50 mm çaplıdır. Alınan karot örneklerinin ISRM (2007) önerilerine uygun olması için ,”boy/çap” oranı 2.5-3 arasında olması gerekmektedir. Bu öneriler doğrultusunda örneklerin boyunu 12-15 cm arasında ayarlayarak kesilmiştir. Kesilme işleminden sonra alt ve üst yüzeylerinin birbirine paralel olması gerekmektedir. Örnekleri UTC1035 törpüleme makinesi ile 0.01 mm oranında paralellik sağlanıncaya kadar törpüleme işlemi yapılmıştır. En son olarak hazırlanan örnekler numaralar vererek örnek hazırlama işlemi tamamlanmıştır.

2.3. Örneklerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Numaralandırılmış örneklerin alan, hacim hesabı yapılması için çap ve boyunun belirlenmesi gerekmektedir. Örneklerin çap (D) ve boy(L) kumpas yardımı ile 0.1 mm hassasiyet ile ölçülmüştür (Şekil 3b). Çapın belirlenmesi için; örneğin alt ve üst yüzeyinden ölçüm yapılarak, bu ölçümlerin ortalaması alınmış, boy ölçümü için ; dik iki ayrı yönde ölçüm alınarak bu değerlerin ortalamaları alınıp not edilmiştir. Belirlenen değerler neticesinde, Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 yardımıyla örneklerin hacmi , yüzey alanı hesaplanmıştır.

$$V = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi \cdot L \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi \quad (2)$$

D= karot çapı

L= karot boyu

V= numune hacmi



Şekil 3. (a) örnek bloklarından karot alınması işlemi , (b) örneklerin kumpas yardımı ile çap, boylarının belirlenmesi

2.3.1. Birim Hacim Ağırlık

Bu deney çapları ve boyları belli olan örneklerin birim hacim ağırlıklarını hesaplamak için ISRM (2007) önerilerine uygun olarak yapılmıştır. Daha sonra 1 gün boyunca 105°C de etüvde bekletilerek örnekler kurutulmuş, etüvden çıkartılan örnekler hassas terazi yardımıyla tartılıp , kuru ağırlıkları ölçülmüştür (Şekil 4). Kurutulmuş örneklerin Eşitlik 3 ve 4 yardımı ile önce yoğunluk değerleri daha sonra kuru birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{V} \quad (3)$$

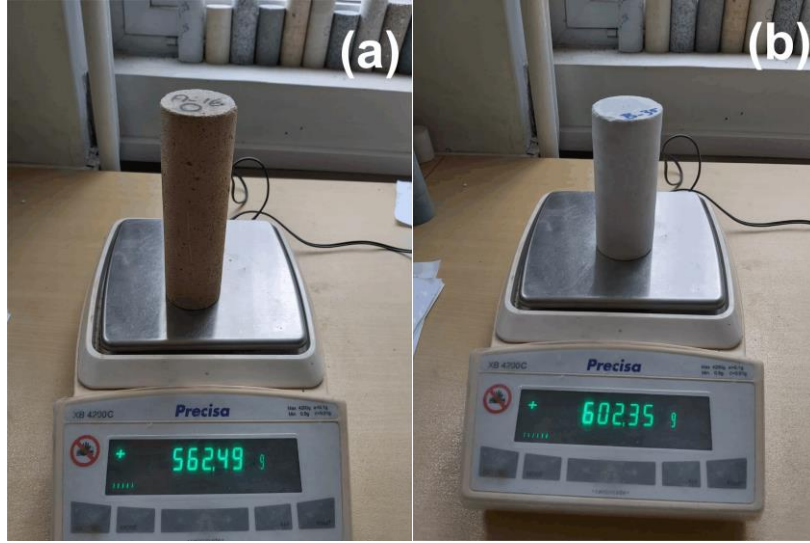
$$\gamma_k = 9.81 \cdot d \quad (4)$$

d= yoğunluk (g/cm³)

V= numune hacmi(cm³)

m = kütle (g)

γ = birim hacim ağırlık(kN/m³)



Şekil 4. (a) Kireçtaşı örneklerinin etüvden sonra hassas terazi ile ölçülmesi, (b) mermer örneklerinin etüvden sonra hassas terazi ile ölçülmesi

2.3.2. Özgül Ağırlık

Bu deney; kireçtaşı ve mermer örneklerinin başlangıç koşulu ve her sıcaklık kademesinde yapılmıştır. Deney için; piknometre, 0.01 g hassaslıkta terazi, desikatör, damlalık, huni gereklidir. Bu deney ASTM D 854-92 standardına uygun yapılmıştır. Deney başlamadan önce piknometreler içerisine saf su koyarak tartılmıştır (m4). Örnekler 4 no. (2 mm açıklık) elekten geçecek kadar kırılıp öğütülmüştür. Hassas terazide her bir piknometreyi ölçülüp, not edilmiş (m1), öğütülmüş örnekler etüvde 105°C 'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan örneklerden piknometrenin içerisine 8,24 gram öğütülmüş, kuru örnekten döküp tekrar hassas terazide ölçülüp not edilmiştir (m2). Daha sonra piknometrenin içerisine damlalık yardımıyla 2/3 si dolu olacak şekilde saf su ilave ederek desikatör içerisine koyulmuştur. Hava kabarcıkları bitene kadar desikatör içerisinde bekletilmiştir. Desikatörden alınan piknometreler ve saf su piknometrenin tamamı dolacak şekilde ilave edilmiştir ve tekrardan hassas terazi yardımıyla tartılıp, not edilmiştir (m3). Bu deney 3 kere tekrarlanmıştır. Eşitlik 5 kullanılarak örneklerin özgül ağırlıkları hesaplanmıştır (Şekil 5).

$$G_s = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (5)$$

m_1 = piknometre kütlesi (gr)

m_2 = piknometre kütlesi + kuru örnek kütlesi (gr)

m_3 = piknometre kütlesi + kuru örnek kütlesi + saf su kütlesi (gr)

m_4 = piknometre kütlesi + saf su kütlesi (gr)



Şekil 5. Özgül ağırlık deney ekipmanı

2.3.3. Porozite

Porozite hesabı için kuru yoğunluk ve özgül ağırlık değerlerinden yararlanılmıştır. Porozite hesabı Eşitlik 6 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$n = 1 - \frac{\rho_K}{\rho_{dane}} \quad (6)$$

n = porozite (%)

ρ_K = kuru yoğunluk (g/cm^3)

ρ_{dane} = dane yoğunluğu (g/cm^3)

2.4. Ultrasonik Hız Deneyi

Örnekler Pundit Plus aleti kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 6). Bu ölçümlerde transdüserler 154 kHz ve sinyal puls süreleri ise $0.1 \mu\text{s}$ seçilmiştir. Bu deney ASTM D 854-

92 önerilen yöntemlere dikkat edilerek yapılmıştır. Deneyde örneklerin alt ve üst yüzeylerin pürüzsüz olmasına dikkat edilmiştir. Yüzeylerle alıcı ve verici arasında tam temasın sağlanıp boşluk kalmaması için jel kullanılmıştır. Daha sonra cihazdan P- dalga hızının örnekten geçiş süresi μs cinsinden ölçülerek not edilmiştir. Eşitlik 7 kullanarak P- dalga hız değeri hesaplanmıştır. Bu deney ilk başta tüm örneklerle uygulanıp daha sonra her sıcaklık kademesi için tekrarlanmıştır.

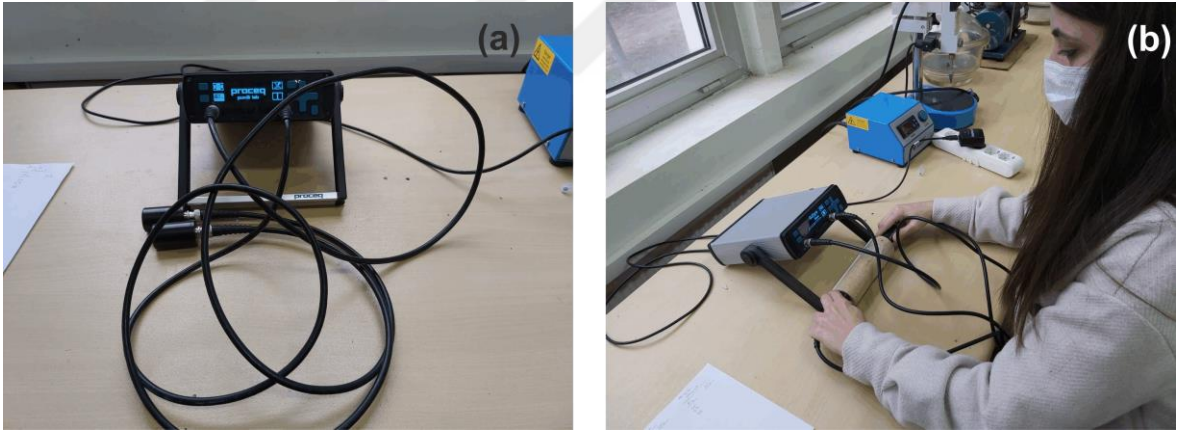
$$V_p = \frac{L}{t} \quad (7)$$

Burada;

V_p = boyuna dalga hızı (m/sn)

L= örneğin boyu (m)

t = süre (sn)



Şekil 6. (a) Ultrasonik hız aleti (b) p-dalga hızı ölçülmesi

2.5. Equotip (Leeb Sertliği) Deneyi

Equotip sertlik cihazı, kayanın basınç dayanımını tahmin etmek için dolaylı kullanılan bir yöntemdir. Örneğe zarar vermediği için ve çok hafif, rahat taşınabileceği için tercih edilir. Ayrıca ölçülecek olan yüzeyin duruş açısında herhangi bir kısıtlama yoktur, cihaz ölçülecek yüzeye dik tutulduğu sürece doğru ölçüm yapılabilir. Bu nedenle de arazide uygulaması rahat bir yöntemdir. Equotip cihazı; 3 mm çapın da olan tungsten karbür bilyeden ve yaylı

bir sistemden oluşur. Bilye yüzeye çarpar ve geri tepmesiyle birlikte bir elektrik akımı oluşturur ve sertlik değeri ölçülür. Sertlik değeri L olarak ifade edilir. Deney, Leeb geri sekme yöntemini esas alır. Bu yüzden okunan değerler Leeb sertlik değeri olarak ifade edilir. Kullanılan cihazda D tipi prob kullanılmaktadır. Cihazın, örneğe verdiği enerji ise 11 mJ'dur (Şekil 7). Bu deney yapılırken örneği dik bir şekilde tutarak 90°'lik bir açı ile cihazı yerleştirip 20 farklı noktadan değer alıp bu değerlerin ortalaması alınıp, not edilmiştir. Literatürde H_L değerlerinden yola çıkılarak tek eksenli basınç dayanımının tahmin edildiği çalışmalar göz önüne alındığında, bu çalışmalarda örnek yüzeyine dağınık halde 20 tek vuruş (single impact) yapılarak bu değerlerin ortalamasının alınmasının en yaygın olarak uygulanan yöntem olduğu görülmektedir (Desarnaud, 2019). Her sıcaklık kademesi için bu işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 7. Equotip sertlik cihazı

2.6. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Tek eksenli basınç dayanımı, kaya mekaniğinde kayaçların dayanımlarını bulmada önemli bir parametredir. Deney ISRM (2007) önerilerine uygun olarak yapılmıştır. Bu deneyde karot örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin birbirine paralel olması önemlidir. Örnek

seçiminde süreksizlik, kırık, çatlak içermeyen olmasına dikkat edilmiştir. Çapı ve boyu belli olan örneklerin yüzey alanı hesabı yapılmıştır. Hazır olan örnekler presin ortasına plakalar üzerine yerleştirilmiş, örnek ve plakalar arasındaki hiç boşluk kalmadığına emin olduktan sonra yükleme başlatılmıştır. Örneğin yenildiği andaki yük göstergeden okunup not edilmiştir. Örneğin yenilme süresi 5-10 dakika olacak şekilde yükleme hızı ayarlanmıştır. Bu deney 25, 200, 300, 400, 500, 600, 680°C ısıtılma uğramış her örnek üzerinde yapılmış, yenilme yükü ve yüzey alanları belli olan örneklerin tek eksenli basınç dayanımları Eşitlik 9 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (9)$$

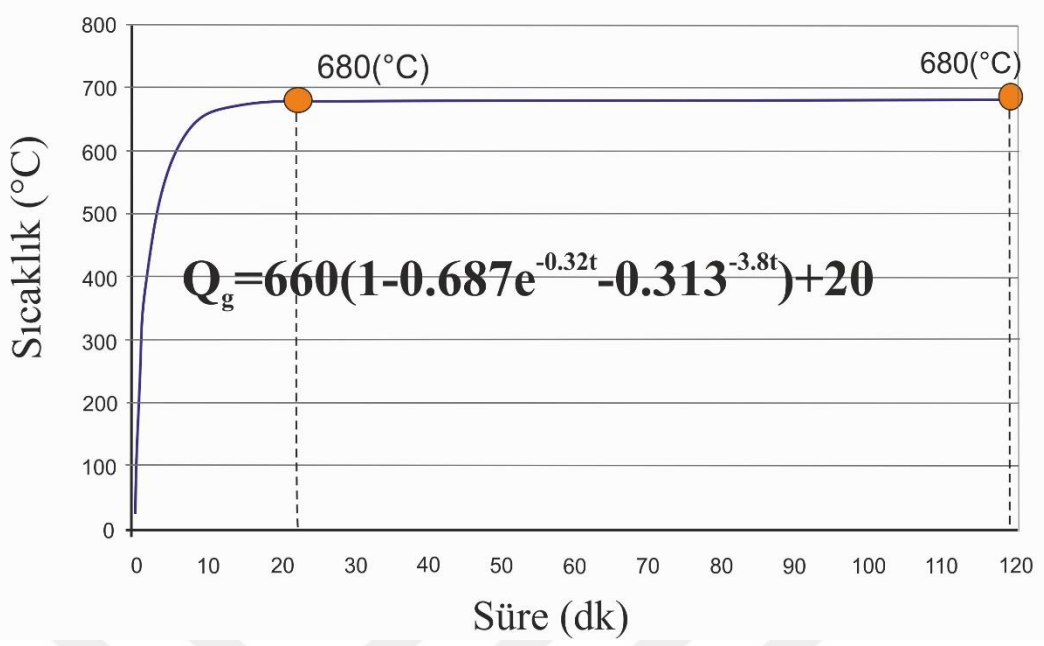
Burada;

F= yenilme yükü (kN)

A= yüzey alanı (m²)

2.7. Isıl İşlem Yöntemi

Sıcaklığın kayaçlar üzerinde fiziksel ve mekanik birçok etkisi vardır. Örneklerin artan sıcaklık ile değişimlerine bakmak için örnekleri her sıcaklık için 5'er adet olmak üzere toplamda 7 grup oluşturulmuştur. Başlangıç koşuluna hiçbir ısıtılma uygulanmadı, kalan 6 grup kademe kademe ısıya tabi tutulmuştur. Örnekler 200°C den başlayarak 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 680°C ye kadar ısıtılmıştır. Isıtma işlemi için kullanılan fırın protherm kül fırınıdır. Maksimum sıcaklık derecesinin 680°C seçilme nedeni Eurocode 2002'ye göre bir dış yangın sıcaklığının 680°C'yi temsil etmesidir (Şekil 8). Örnek grupları her sıcaklık kademesinde ikişer saat bekletilmiştir. Örnek ısıtma işleminde, kül fırını Eurocode (2002) tarafından verilen sıcaklık-zaman grafiği kullanılarak ısıtılmıştır. Soğuma işlemi ise örneklerin termal şoka girmemesi için 2 saat sürenin sonunda fırının içerisinde kendi halinde soğumaya bırakılmıştır (Şekil 9).



Şekil 8. Çalışmalarda kullanılan yangın-sıcaklık eğrisi (Eurocode, 2002)



Şekil 9. Isıl işlem görmüş kireçtaşı örnekleri

2.8. Mineralojik ve Mikro-Yapısal Tayinler

2.8.1. Mineralojik Tayin

Bu çalışmada örnekler üzerinde mineralojik tayinler yapılabilmesi için Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği bölümü ince kesit hazırlama laboratuvarında

örneklerin ince kesitleri hazırlanmıştır. Örneklerden 0.5x2x4 cm boyutunda olacak şekilde plakalar kesilmiştir. Hazırlanan plakaların yüzeyleri pürüzsüz hale getirildikten sonra 0.1x2.5x5 cm boyutlarındaki cam plakalar üzerine Kanada balzamu yardımı ile yapıştırılmıştır. Daha sonra aşındırıcı tozlar ile 0.3 mm'ye kadar inceltilerek ince kesitler elde edilmiştir. Hazırlanmış olan bu ince kesitler Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Araştırma Mikroskopisi Laboratuvarında Nikon LV-100Pol model polarizan mikroskopta incelenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. (a) Polarizan mikroskop, (b) örneklerin ince kesitlerinin incelenmesi

2.8.2. XRD (X-Işını Kırınımı)

Bu analiz, minerallerin kristal yapısı, tane boyutunu ve içerdikleri fazları belirlemek için yapılmaktadır. Toz haline getirilmiş örnekler üzerinde uygulanmıştır (Şekil 11). Tek eksenli basınç deneyi yapılmış olan örneklerden ilksel koşulda olan örnekler çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra halkalı öğütücüde 30 saniye boyunca öğütülmüştür. Bu yöntemde öğütülmüş örnekler üzerine X ışını gönderilir ve örneklerin kırılma ve dağılma verilerini

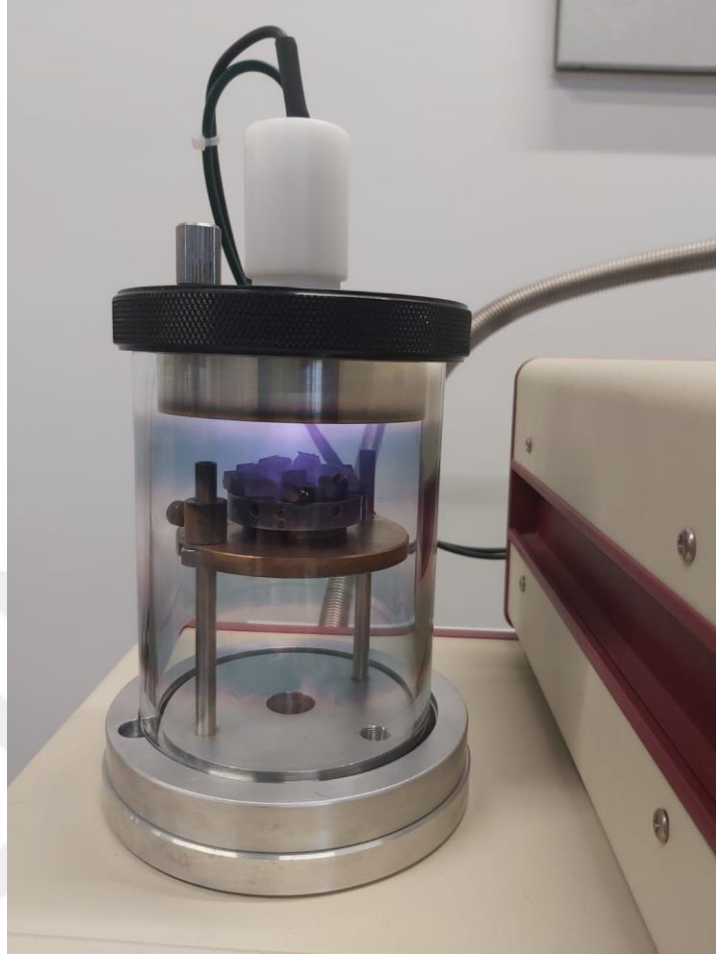
toplayarak örneklerin minerallerini kısa bir süre içerisinde tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu analizde İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan D8 ADVANCE BRUKER-XRD marka cihaz kullanılmıştır. X-ray enerji aralığı ise 3KeV ile 30 KeV arasındadır.



Şekil 11. (a) Örnek kırma aleti, (b) örneklerin öğütülmesi

2.8.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu)

Bu analiz, bir elektron demetini numunenin yüzeyine göndererek, numunenin yüzeyini tarayıp görüntü elde edilmesini sağlayan bir analizdir. Analiz küp şekilli ve yaklaşık 1 cm^3 hacme sahip örnekler üzerinde yapılmaktadır. Tek eksenli basınç deneyi yapılan örneklerden her sıcaklık kademesi için örnekler alınıp bu örnekler küp şeklinde kesilmiştir. Hazırlanmış olan küp şekilli örnekler Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında vakumlu ortamda altın ile kaplandıktan sonra Zeiss Evo LS 10 marka cihaz kullanılarak SEM görüntüleri çekilmiştir (Şekil 12). Analizler bin kata kadar büyütme ve 10 kV hızlandırma voltajında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile örneklerle ait kırılma yüzeyi, çatlak analizi gibi bilgiler elde edilmektedir.

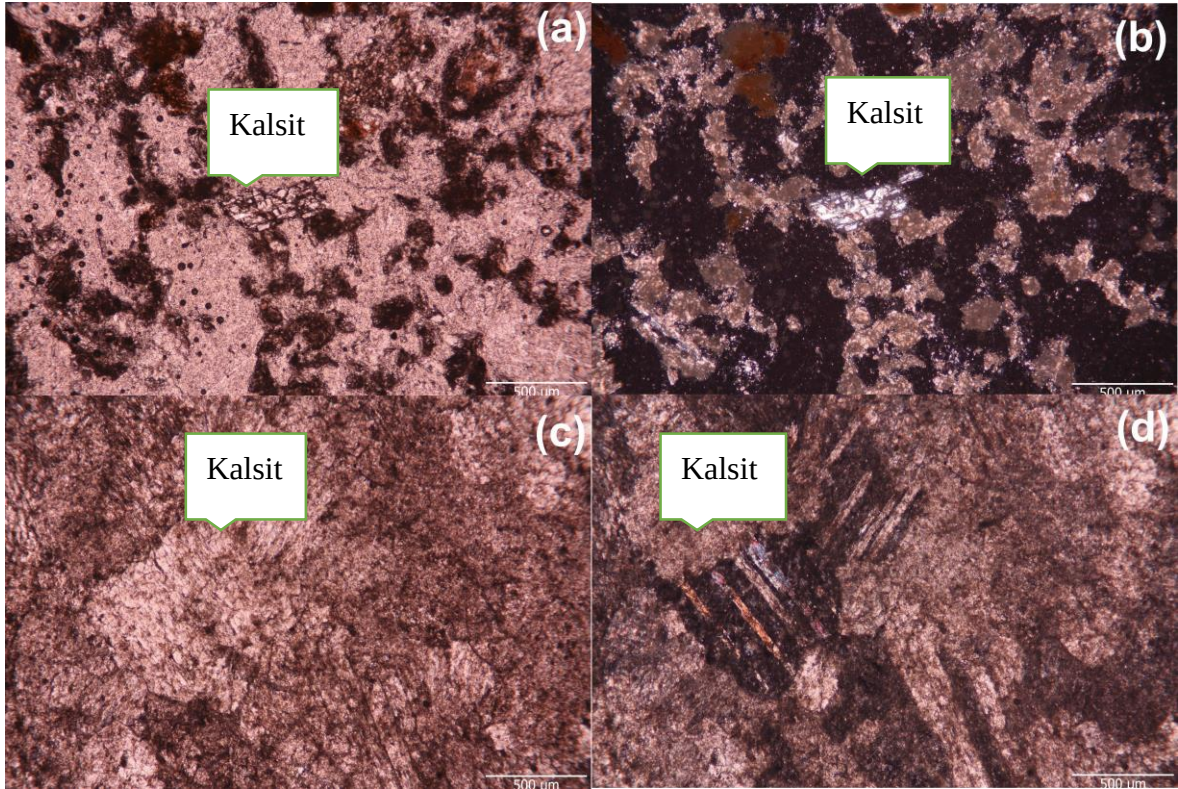


Şekil 12. SEM analizleri öncesinde örneklerin vakumlu ortamda altınla kaplanması

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Mineralojik ve Mikro-Yapısal Özellikler

Çalışma kapsamında kullanılan kireçtaşı ve mermer örneklerinin mikro-yapısal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ince kesitler hazırlanmış ve bu kesitler polarizan mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 13).

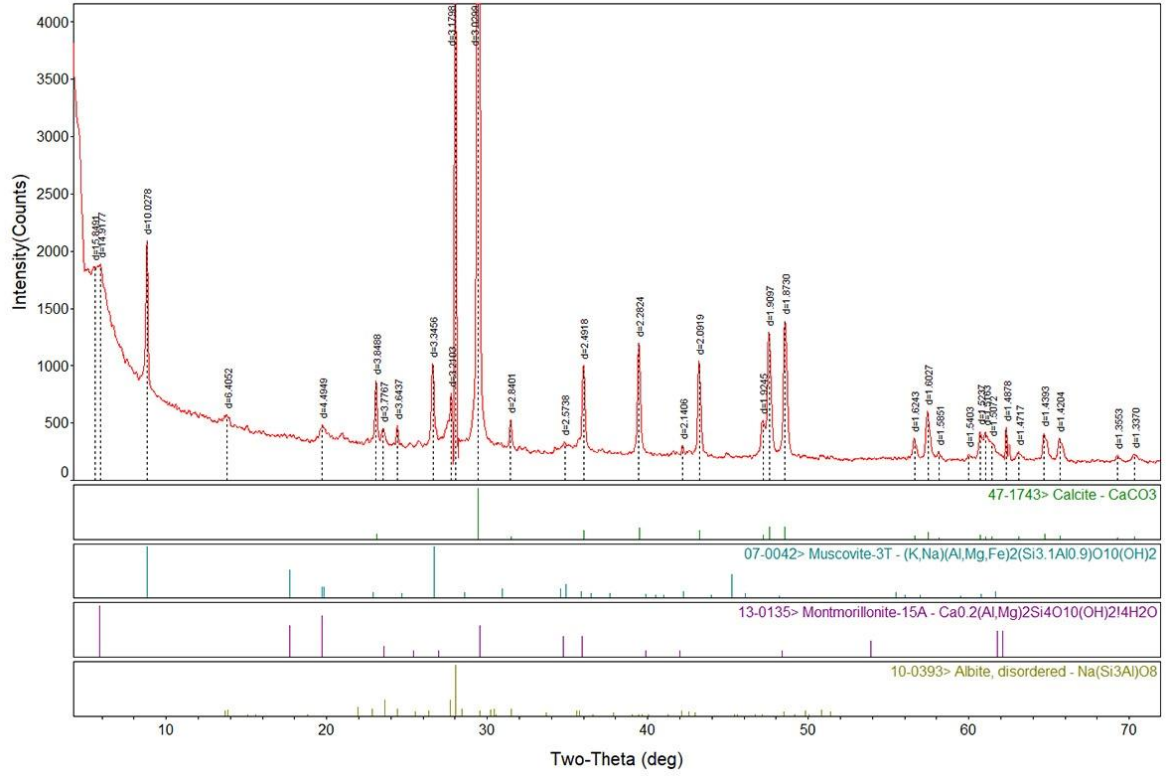


Şekil 13. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin başlangıç koşulu ince kesit görüntüleri (a) kireçtaşının başlangıç koşulu tek nikol görüntüsü, (b) kireçtaşının başlangıç koşulu çift nikol görüntüsü, (c) mermerin başlangıç koşulu tek nikol görüntüsü, (d) mermerin başlangıç koşulu çift nikol görüntüsü

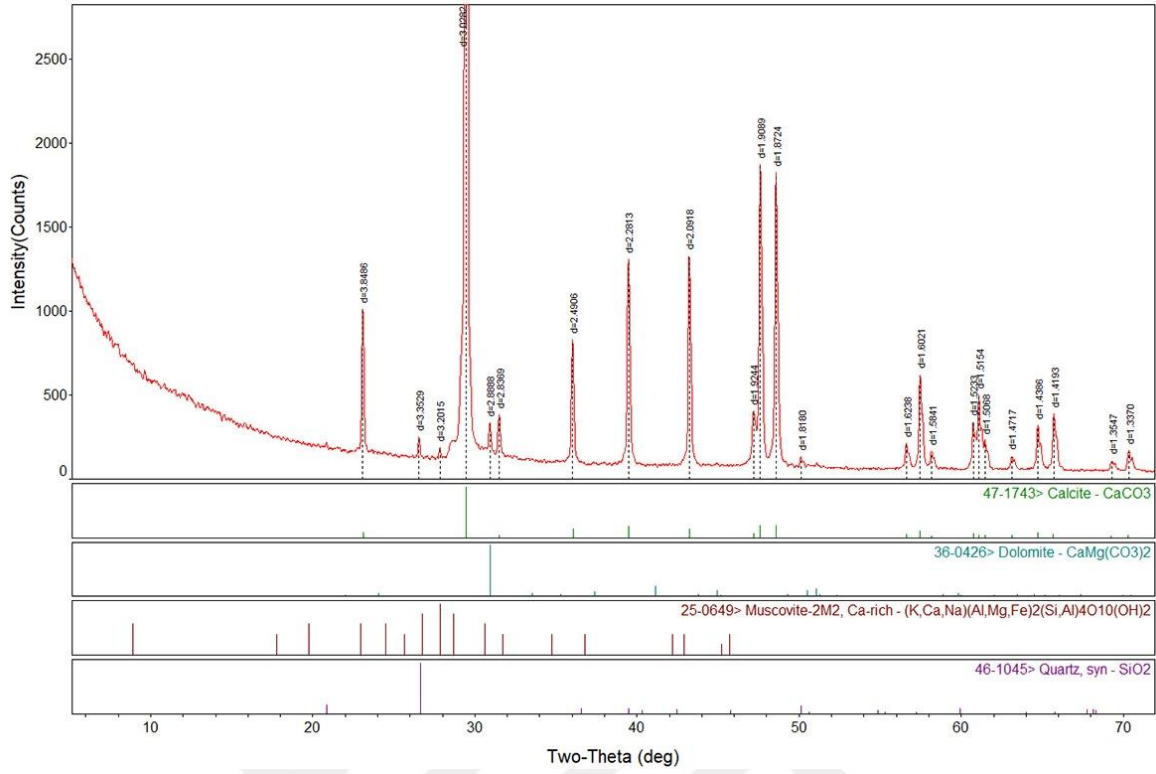
Kireçtaşı ve mermer örneklerinde kalsit mineralleri görülmektedir. Kayaçların tek nikol ve çift nikol altında ince kesitleri incelendiğinde tane boyutlarının; kireçtaşında daha küçük yapıdayken mermer örneğinde ise daha büyük yapıda olduğu gözlenmiştir. Mermer örneğinde mikro çatlakların kireçtaşına göre daha fazla olduğu görülmüştür.

3.1.1. XRD (X-Işın Kırınımı) Analizleri

Örneklere ait XRD difraktogramlarına bakıldığında; kireçtaşı örnekleri kalsit+muskovit+montmorillonit+albit içerdiği görülmüştür (Şekil 14). Mermer örneklerinde ise; kalsit+dolomit+muskovit+kuvars görülmektedir (Şekil 15).



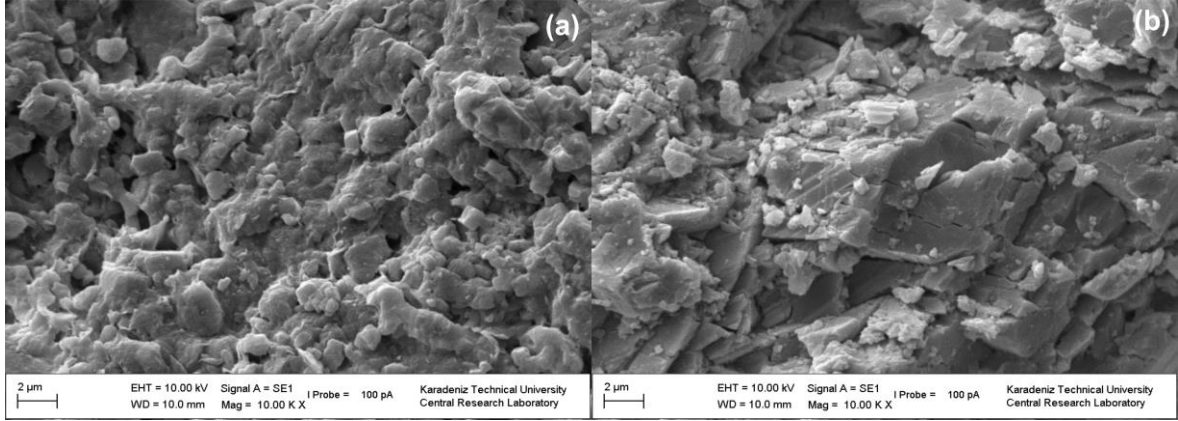
Şekil 14. Kireçtaşı örneklerine ait XRD analiz sonuçları



Şekil 15. Mermer örneklerine ait XRD analiz sonuçları

3.1.2. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda taramalı elektron mikroskop ile çekilen ısıtılmış işlem görmemiş kireçtaşı ve mermer örneklerinin $\times 10.00$ büyütmede görüntülerine bakıldığında örneklerin mikro-gözenek ve mikro-çatlak/kırıklar içerdiği gözükmemektedir (Şekil 16). Mermer örneklerinde taneler daha iri yapıda görünürken kireçtaşı örneğinde ise daha küçük yapıdadır. Kireçtaşı örneklerinde boşluklar mermer örneklerine göre daha fazla olduğu gözükmemektedir.



Şekil 16. SEM görüntüleri (a) kireçtaşı başlangıç koşulu x1000 görüntüsü (b) mermer başlangıç koşulu x1000 görüntüsü

3.2. Fiziksel Özellikler

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklıkla değişimlerine bakmak için ilk olarak oda sıcaklığında bulunan örneklerin çapları, boyları ölçülüp bu değerlerden yararlanarak hacim, yüzey alanı hesabı yapılmıştır. Daha sonra örneklerin kuru ağırlıklarını bulmak için; 24 saat etüvde 105°C sıcaklıkta bekletilmiştir ve etüvden çıkartılan örnekler tartılmıştır. Bulunan değerler neticesinde kuru birim hacim ağırlık hesabı ve yoğunluk hesapları yapılmıştır (Tablo 2). Kireçtaşı örneklerinin kuru birim hacim ağırlığı 18.834-29.728 kN/cm³ arasında değişmektedir. Yoğunluklarının ortalaması 2.169gr/cm³'tür (Tablo 2). Mermer örneklerinin, kuru birim ağırlıkları 25.77-33.684 kN/cm³ arasında değişmektedir. Yoğunluklarının ortalaması 2.699gr/cm³'dur (Tablo 3). Sıcaklığa maruz kalmamış başlangıç koşulu kireçtaşı ve mermer örneklerinin özgül ağırlıkları tespit edilmiştir. Üç adet özgül ağırlık deneyi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Kireçtaşı örneğinin özgül ağırlık ortalaması 2.621 iken (Tablo 4) mermer örneğinin ise 2.755 dır(Tablo 5).

Tablo 2. Kireçtaşı örneklerinin fiziksel özellikleri

Numune No.	Çap (cm)	Boy (cm)	Hacim (cm ³)	Yüzey Alanı (cm ²)	Kuru Kütle (gr)	Yağunluk (g/cm ³)	Kuru BHA (kN/cm ³)
A-1	4.712	15.389	268.356	17.438	581.58	2.167	21.26
A-2	4.667	14.459	247.345	17.107	507.2	2.051	20.116
A-3	4.704	15.119	262.753	17.379	521.56	1.985	19.473
A-4	4.704	15.196	264.091	17.379	548.7	2.078	20.382
A-5	4.11	15.959	211.728	13.267	641.62	3.03	29.728
A-6	4.702	15.699	272.601	17.364	595.21	2.183	21.42
A-7	4.64	14.873	251.492	16.909	516.22	2.053	20.136
A-8	4.715	15.39	268.715	17.46	582.62	2.168	21.27
A-9	4.654	15.155	257.809	17.012	537.94	2.087	20.469
A-10	4.708	14.968	260.571	17.409	583.85	2.241	21.981
A-11	4.717	15.284	267.091	17.475	631.25	2.363	23.185
A-12	4.71	15.39	268.145	17.423	569.98	2.126	20.853
A-13	4.711	15.213	265.174	17.431	578.64	2.182	21.407
A-14	4.708	15.359	267.378	17.409	572.85	2.142	21.018
A-15	4.696	15.968	276.565	17.32	579.43	2.095	20.553
A-16	4.696	15.843	274.4	17.32	559.44	2.039	20
A-17	4.718	14.591	255.088	17.483	537.38	2.107	20.666
A-18	4.718	14.743	257.746	17.483	597.67	2.319	22.748
A-19	4.722	14.563	255.031	17.512	590.87	2.317	22.728
A-20	4.702	15.231	264.474	17.364	528.1	1.997	19.589
A-21	4.711	15.833	275.981	17.431	579.39	2.099	20.595
A-22	4.701	15.569	270.228	17.357	578.22	2.14	20.991
A-23	4.697	15.154	262.578	17.327	538.78	2.052	20.129
A-24	4.694	13.242	229.155	17.305	476.36	2.079	20.393
A-25	4.713	15.53	270.929	17.446	586.99	2.167	21.254
A-26	4.693	15.39	266.213	17.298	553.92	2.081	20.412
A-27	4.711	15.253	265.871	17.431	533.06	2.005	19.669
A-28	4.708	14.315	249.204	17.409	587.76	2.359	23.137
A-29	4.71	15.4	268.32	17.423	628.3	2.342	22.971
A-30	4.673	14.781	253.504	17.151	486.7	1.92	18.834
A-31	4.706	15.301	266.142	17.394	607.74	2.284	22.401
A-32	4.711	14.422	251.386	17.431	592.92	2.359	23.138
A-33	4.696	15.948	276.218	17.32	570.75	2.066	20.27
A-34	4.664	11.858	202.59	17.085	420.45	2.075	20.359
Mak.	4.722	15.968	276.565	17.512	641.62	3.03	29.728
Min.	4.11	11.858	202.59	13.267	420.45	1.92	18.834
Ort.			259.555	17.228	561.866	2.169	21.280
Ss.			16.563	0.714	45.892	0.192	1.889

Tablo 3. Memer örneklerinin fiziksel özellikleri

Numune No.	Çap (cm)	Boy (cm)	Hacim (cm ³)	Yüzey Alanı (cm ²)	Kuru Kütle (gr)	Kuru B.H.A (kN/cm ³)	Yoğunluk (ρ)
B-1	4.933	11.015	210.522	19.112	557.74	25.99	2.649
B-2	4.939	10.642	203.888	19.159	548.85	26.408	2.692
B-3	4.942	11.647	223.414	19.182	598.01	26.258	2.677
B-4	4.937	11.747	224.876	19.143	603.45	26.325	2.683
B-5	4.93	10.535	201.103	19.089	540.49	26.366	2.688
B-6	4.934	10.654	203.705	19.12	539.05	25.96	2.646
B-7	4.935	11.035	211.075	19.128	569.67	26.476	2.699
B-8	4.937	10.267	196.544	19.143	521.18	26.013	2.652
B-9	4.942	13.301	255.141	19.182	680.92	26.181	2.669
B-10	4.9	13.148	247.937	18.857	676.11	26.751	2.727
B-11	4.94	13.108	251.235	19.167	669.14	26.128	2.663
B-12	4.933	13.19	252.091	19.112	672.51	26.17	2.668
B-13	4.922	10.924	207.852	19.027	559.81	26.421	2.693
B-14	4.93	11.126	212.384	19.089	569.9	26.324	2.683
B-15	4.932	11.145	212.92	19.105	565.53	26.056	2.656
B-16	4.938	10.561	202.254	19.151	538.56	26.122	2.663
B-17	4.946	12.36	237.474	19.213	638.79	26.388	2.69
B-18	4.94	13.264	254.225	19.167	684.56	26.416	2.693
B-19	4.944	13.133	252.122	19.198	670.14	26.075	2.658
B-20	4.949	11.867	228.279	19.236	612.8	26.334	2.684
B-21	4.32	10.765	157.787	14.657	541.78	33.684	3.434
B-22	4.937	13.086	250.509	19.143	667.76	26.15	2.666
B-23	4.936	13.324	254.962	19.136	678.76	26.116	2.662
B-24	4.947	13.205	253.812	19.221	680.83	26.315	2.682
B-25	4.941	13.09	250.992	19.174	677.18	26.468	2.698
B-26	4.93	11.263	215	19.089	569.93	26.005	2.651
B-27	4.93	11.022	210.399	19.089	564.44	26.317	2.683
B-28	4.94	10.864	208.225	19.167	552.83	26.045	2.655
B-29	4.911	11.405	216.035	18.942	584.83	26.557	2.707
B-30	4.934	13.133	251.103	19.12	678.35	26.502	2.701
B-31	4.954	12.14	234.003	19.275	614.7	25.77	2.627
B-32	4.939	11.684	223.851	19.159	599.51	26.273	2.678
B-33	4.931	10.684	204.03	19.097	552.27	26.554	2.707
B-34	4.933	11.024	210.694	19.112	569.33	26.508	2.702
B-35	4.936	11.746	224.766	19.136	604.13	26.368	2.688
Mak.	4.954	13.324	255.141	19.275	684.56	33.684	3.434
Min.	4.32	10.267	157.787	14.657	521.18	25.77	2.627
Ort.			224.435	19.003	604.395	26.480	2.699
Ss.			23.047	0.760	54.939	1.271	0.130

Tablo 4. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulu özgül ağırlıkları

Piknometre No.	m2 (gr)	m3 (gr)	m1 (gr)	m4 (gr)	G _s
49	56.85	154.33	48.61	149.23	2.624
57	57.08	154.35	48.84	149.25	2.624
89	56.85	154.06	48.61	148.97	2.615
Ort.					2.621

*m1=piknometre kütlesi; *m2=piknometre+örnek kütlesi; *m3=piknometre+saf su+örnek kütlesi;
*m4=piknometre+ saf su

Tablo 5. Mermer örneklerinin başlangıç koşulu özgül ağırlıkları

Piknometre No.	m2 (gr)	m3 (gr)	m1 (gr)	m4 (gr)	G _s
49	56.85	154.49	48.61	149.23	2.765
57	57.08	154.49	48.84	149.25	2.746
89	56.85	154.22	48.61	148.97	2.755
Ort.					2.755

*m1=piknometre kütlesi; *m2=piknometre+örnek kütlesi; *m3=piknometre+saf su+örnek kütlesi;
*m4=piknometre+ saf su

3.2.1. Örneklerin Boyuna Dalga Hızları

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış kireçtaşı ve mermer örneklerindeki boyuna dalga hızlarındaki değişimi bulmak için başlangıçta tüm örneklerle sonik hız deneyine tabi tutulmuştur. Kireçtaşı örneklerinde boyuna dalga hızı 1410-2617 m/sn arasında (Tablo 6) mermer örneklerinde ise 3895-5486 m/sn arasında değişmektedir (Tablo 7).

Tablo 6. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulları P- dalga hızı değerleri

Örnek No.	Boy (cm)	Geçiş Süresi (μs)	P-dalga Hız (m/s)
A-1	15.389	70.500	2183
A-2	14.459	60.200	2402
A-3	15.119	74.100	2040
A-4	15.196	58.300	2607
A-5	15.959	65.100	2451
A-6	15.699	61.400	2557
A-7	14.873	72.500	2051
A-8	15.390	78.200	1968

Tablo 6'nın devamı

Örnek No.	Boy (cm)	Geçiş Süresi (μs)	P-dalga Hız (m/s)
A-9	15.155	62.800	2413
A-10	14.968	57.200	2617
A-11	15.284	64.300	2377
A-12	15.390	61.800	2490
A-13	15.213	73.300	2075
A-14	15.359	64.400	2385
A-15	15.968	63.500	2515
A-16	15.843	66.600	2379
A-17	14.591	58.200	2507
A-18	14.743	58.200	2533
A-19	14.563	103.300	1410
A-20	15.231	79.200	1923
A-21	15.833	62.000	2554
A-22	15.569	63.000	2471
A-23	15.154	62.400	2429
A-24	13.242	55.300	2395
A-25	15.530	77.200	2012
A-26	15.390	63.200	2435
A-27	15.253	67.400	2263
A-28	14.315	59.600	2402
A-29	15.400	69.400	2219
A-30	14.781	89.000	1661
A-31	15.301	59.400	2576
A-32	14.422	59.000	2444
A-33	15.948	61.300	2602
A-34	11.858	50.300	2357
Mak.	15.968	103.3	2617
Min.	11.858	50.3	1410
Ort.	15.070	66.224	2314.794
Ss.	0.797	10.267	279.3476

Tablo 7. Mermer örneklerinin başlangıç koşulları P- dalga hızı değerleri

Örnek No.	Boy (cm)	Geçiş Süresi (μs)	P-Dalga Hızı (m/s)
B-1	11.015	25.1	4388
B-2	10.642	19.4	5486
B-3	11.647	23.2	5020
B-4	11.747	21.7	5413
B-5	10.535	24.2	4353
B-6	10.654	25.7	4146

Tablo 7'nin devamı

Örnek No.	Boy (cm)	Geçiş Süresi (μs)	P-Dalga Hızı (m/s)
B-7	11.035	25.8	4277
B-8	10.267	24.1	4260
B-9	13.301	25.7	5175
B-10	13.148	26.7	4924
B-11	13.108	25.3	5181
B-12	13.19	26.7	4940
B-13	10.924	25.1	4352
B-14	11.126	25.7	4329
B-15	11.145	26.7	4174
B-16	10.561	23.2	4552
B-17	12.36	26.4	4682
B-18	13.264	26.1	5082
B-19	13.133	25.2	5212
B-20	11.867	27.2	4363
B-21	10.765	25.6	4205
B-22	13.086	26.6	4920
B-23	13.324	24.8	5373
B-24	13.205	27.9	4733
B-25	13.09	26.7	4903
B-26	11.263	26.2	4299
B-27	11.022	26.4	4175
B-28	10.864	24.1	4508
B-29	11.405	25.1	4544
B-30	13.133	25.3	5191
B-31	12.14	29.7	4088
B-32	11.684	30	3895
B-33	10.684	26.2	4078
B-34	11.024	27.1	4068
B-35	11.746	23.3	5041
Mak.	13.324	30	5486
Min.	10.267	19.4	3895
Ort.	11.803	25.549	4638
Ss.	1.048	1.978	456.579

3.2.2. Örneklerin Leeb Sertliği Değerleri

Yüksek sıcaklıkla leeb sertliği değişimlerine bakılacak olan kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklık kademelerine tabi tutulmadan önce her birine yirmi vuruş yapılarak leeb sertliği değerleri ölçülmüştür. Kireçtaşı örneklerinin ortalaması 392, standart sapması

42.479 ve değerler 335-475 arasında değişmektedir. Mermer örneğinde ise; ortalama 615, standart sapması, 45.565 ve değerler 581-852 arasında değişmektedir (Tablo 8).

Tablo 8. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin başlangıç koşulu için Leeb sertliği ortalamaları

Kireçtaşı Örnek No.	Ortalama Değer	Mermer Örnek No.	Ortalama Değer
A-1	433	B-1	852
A-2	364	B-2	628
A-3	335	B-3	581
A-4	361	B-4	619
A-5	431	B-5	632
A-6	403	B-6	616
A-7	355	B-7	581
A-8	394	B-8	585
A-9	357	B-9	619
A-10	423	B-10	598
A-11	458	B-11	608
A-12	379	B-12	613
A-13	404	B-13	631
A-14	385	B-14	640
A-15	366	B-15	588
A-16	358	B-16	585
A-17	369	B-17	606
A-18	441	B-18	598
A-19	423	B-19	601
A-20	344	B-20	618
A-21	382	B-21	583
A-22	373	B-22	595
A-23	349	B-23	623
A-24	368	B-24	593
A-25	399	B-25	628
A-26	350	B-26	638
A-27	361	B-27	585
A-28	472	B-28	640
A-29	467	B-29	638
A-30	342	B-30	628
A-31	468	B-31	581
A-32	475	B-32	588
A-33	352	B-33	603
A-34	370	B-34	598
Mak.	475	B-35	606
Min.	335	Mak.	852
Ort.	392	Min.	581
Ss.	42.479	Ort.	615
		Ss.	45.565

3.3. Kayaçların Dayanım Özellikleri

Hazırlanan numunelerin dayanımlarındaki değişimi incelemek için kireçtaşı ve mermer örneklerinde herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmayan başlangıç koşulu grubuna tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Kireçtaşı örneğinin tek eksenli basınç dayanımı 20-26 Mpa arasında değişmektedir. Ortalaması 23.75 ve standart sapması 2.6'dır (Tablo 9). Mermer örneklerinin ise basınç dayanımı 56-112 Mpa arasında değişmektedir. Ortalaması 76.4 ve standart sapması 19.4'tür (Tablo 10).

Tablo 9. Kireçtaşı örneklerinin başlangıç koşulu tek eksenli basınç dayanımı

Örnek no	Yüzey alanı (cm ²)	Yenilme yükü (kn)	σ_c (Mpa)
A-1	17.438	44.94	26
A-2	17.107	40.24	24
A-3	17.379	34.32	20
A-4	17.379	44.13	25
Mak.	17.438	44.94	26
Min.	17.107	34.32	20
Ort.	17.326	40.908	23.75
Ss.	0.148	4.847	2.6

Tablo 10. Mermer örneklerinin başlangıç koşulu tek eksenli basınç dayanımı

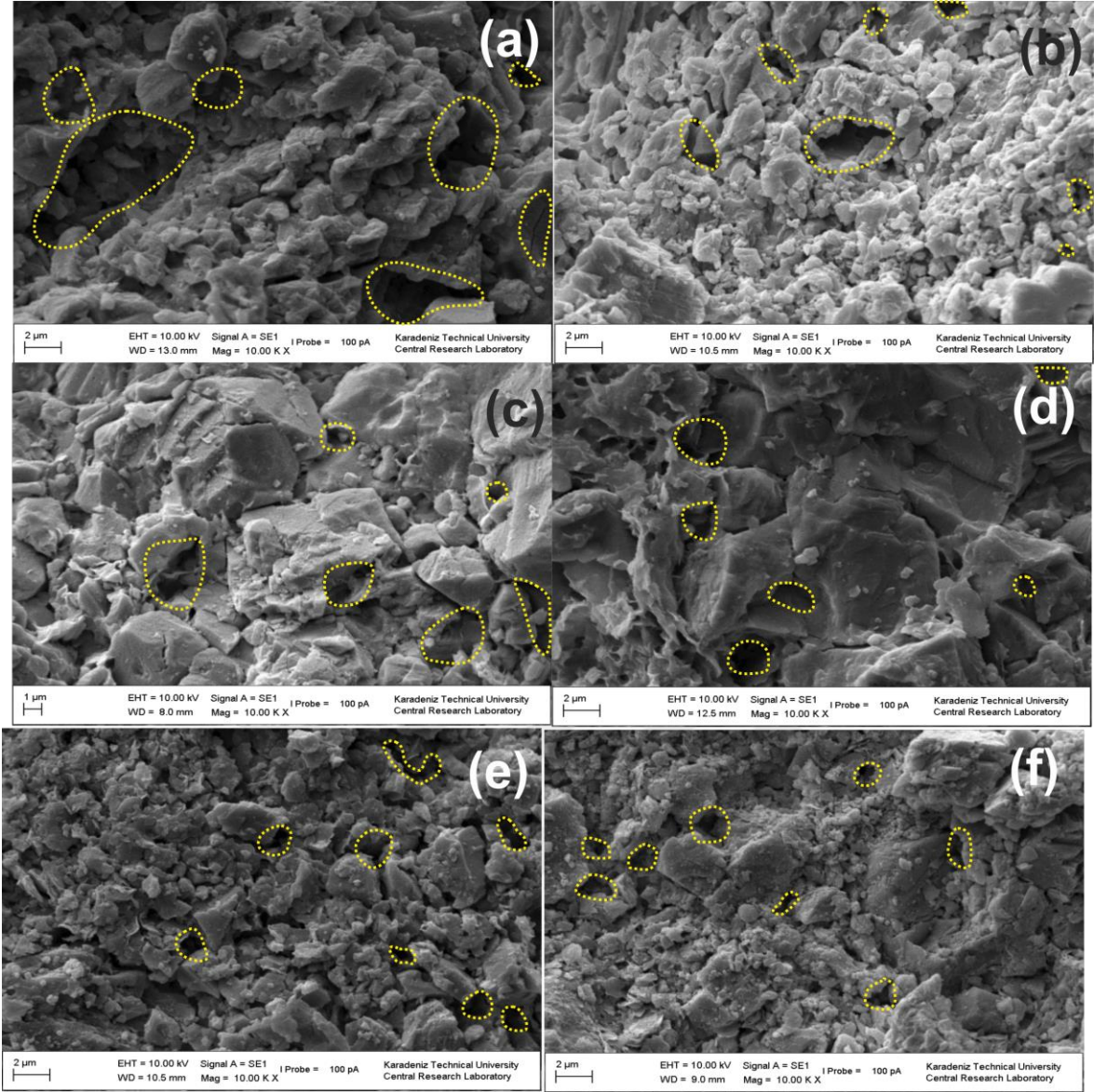
Örnek no	Yüzey alanı (cm ²)	Yenilme yükü (kn)	σ_c (Mpa)
B-1	19.112	106.7	56
B-2	19.159	215.41	112
B-3	19.182	139.27	73
B-4	19.143	148.7	78
B-5	19.089	119.86	63
Mak.	19.182	215.41	112
Min.	19.089	106.7	56
Ort.	19.137	145.988	76.4
Ss.	0.037	42.125	19.4

3.4. Sıcaklıkla Değişim

3.4.1. Mineralojik ve Mikro-Yapısal Özelliklerin Değişimi

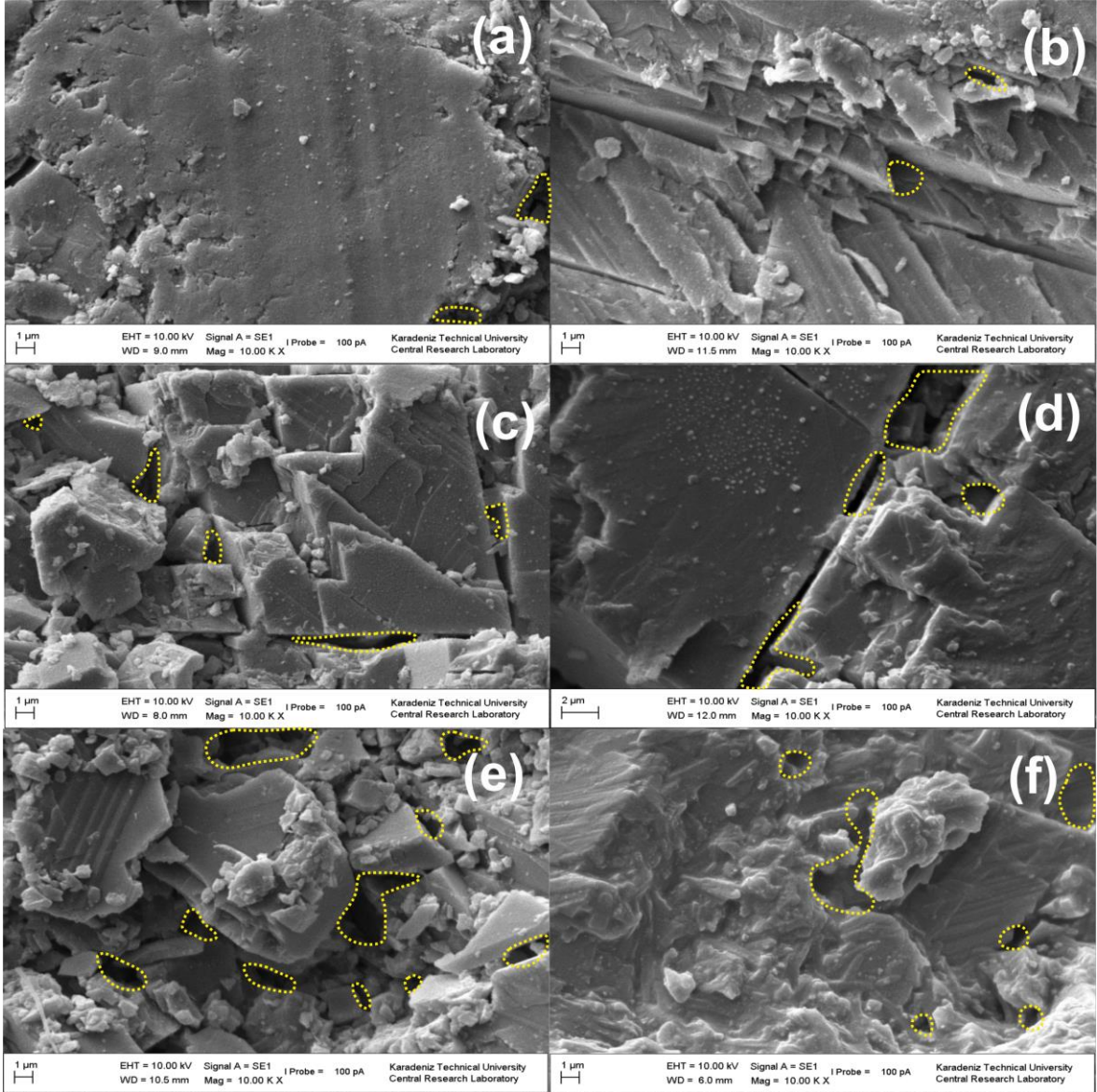
3.4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Kireçtaşı örneklerinin her bir sıcaklık kademesinde x1000 çekilmiş olan SEM görüntülerine bakıldığında artan sıcaklığa bağlı olarak gelişen topaklaşma nedeniyle boşluk yapısında bir azalma görülmektedir. Bu durum kısmen porozitenin azalmasına neden olmuştur. Ancak topaklaşmaya paralel olarak, topaklaşan taneler arasında gelişen mikrokırıklar ikincil boşlukları arttırmış, bu durum porozitedeki azalmayı dengelemiştir. Benzer sonuçlar, Ersoy vd. (2021a) tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür. Çalışmada, yüksek sıcaklıkların ancak 800 °C den sonra karbonat kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. (a) Kireçtaşı 200°C sıcaklık SEM görüntüsü, (b) kireçtaşı 300°C sıcaklık SEM görüntüsü, (c) kireçtaşı 400°C sıcaklık SEM görüntüsü, (d) kireçtaşı 500°C sıcaklık SEM görüntüsü, (e) kireçtaşı 600°C sıcaklık SEM görüntüsü, (f) kireçtaşı 680°C sıcaklık SEM görüntüsü

Mermerlere ait SEM görüntülerinde, artan sıcaklığa bağlı olarak kırık açıklıklarının arttığı, ancak 600 °C ve üstü sıcaklıklarda kırık bağımsız boşlukların geliştiği görülmüştür. Özellikle 400 °C den sonra kireçtaşlarında olduğu gibi topaklaşmanın hakim olduğu görülmektedir (Şekil 18).



Şekil 18. (a) Mermer 200°C sıcaklık SEM görüntüsü, (b) mermer 300°C sıcaklık SEM görüntüsü, (c) mermer 400°C sıcaklık SEM görüntüsü, (d) mermer 500°C sıcaklık SEM görüntüsü, (e) mermer 600°C sıcaklık SEM görüntüsü, (f) mermer 680°C sıcaklık SEM görüntüsü

3.4.2. Fiziksel Özelliklerin Değişimi

SEM görüntüleri üzerinde yapılan değerlendirmeler sadece görsel gözlemlere dayalıdır. Bu nedenle özellikle deneysel olarak fiziksel özelliklerinin değişiminin belirlenmesi ve SEM görüntüleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında artan sıcaklıkların özgül ağırlık ve porozite gibi fiziksel özellikler üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

Kireçtaşı ve mermer örneklerinde her sıcaklık kademesinde özgül ağırlıklarında oluşan değişimlere bakıldığında, kireçtaşlarında en yüksek değer 400°C 'de 2.794 iken en düşük değer başlangıç koşulunda 2.621 olduğu gözlenmiştir. Kireçtaşlarının başlangıç koşulundaki porozite değeri ise; %24 iken sıcaklık artışıyla çok fazla bir değişim olmadığı, değerlerin, %21-25 arasında değiştiği gözlenmiştir (Tablo 11). Mermer örneklerine bakıldığında ise; özgül ağırlıkları en yüksek 300°C' de 2.831 iken en düşük değer başlangıç koşulunda 2.755 olduğu gözlenmiştir. Mermer örneklerinin başlangıç koşulunda porozite değeri %2.8 iken artan sıcaklıkla beraber porozitelerinde çok bir değişim olmadığı, değerlerin %4.4-5.1 arasında değiştiği gözlenmiştir (Tablo 12).

Tablo 11. Artan sıcaklığa bağlı olarak kireçtaşı örneklerinin porozite ve özgül ağırlık değerlerindeki değişim

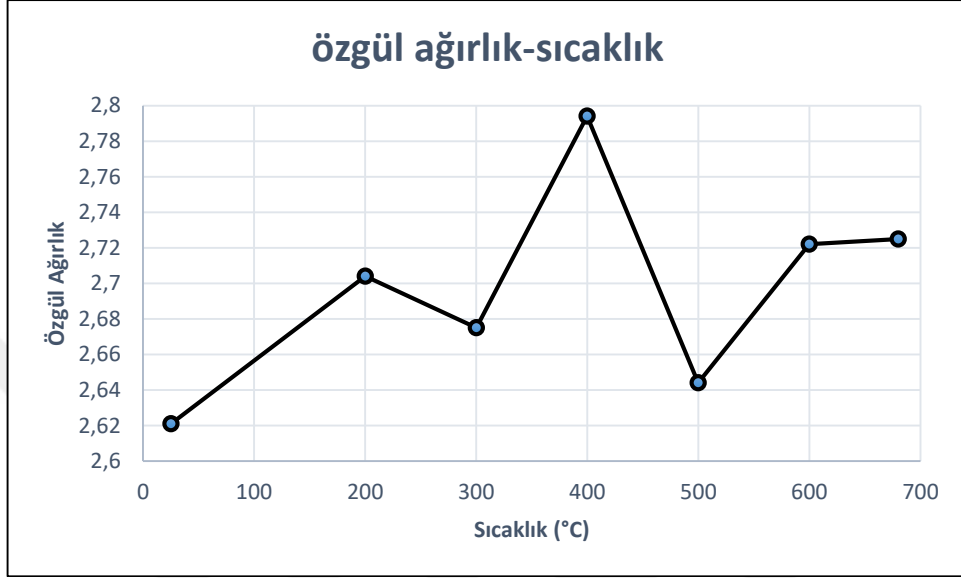
Sıcaklık	Kuru Yoğunluk (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık	Porozite (%)
25°C	1.985	2.621	24
200°C	2.098	2.704	22
300°C	2.113	2.675	21
400°C	2.094	2.794	25
500°C	2.038	2.644	23
600°C	2.338	2.722	23
680°C	2.034	2.725	22

Tablo 12. Artan sıcaklığa bağlı olarak mermer örneklerinin porozite ve özgül ağırlık değerlerindeki değişim

Sıcaklık	Kuru Yoğunluk (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık	Porozite (%)
25°C	2.677	2.755	2.8
200°C	2.651	2.796	5.1
300°C	2.682	2.831	5.2
400°C	2.683	2.815	4.6
500°C	2.664	2.799	4.8
600°C	2.680	2.812	4.6
680°C	2.702	2.828	4.4

Şekil 19 ve 20'de özgül ağırlık değerleri değerlendirildiğinde sıcaklığa bağlı bir artışın olduğu bu kısmi artışın örnek heterojenliğinde mi yoksa sıcaklık etkisiyle mi geliştiği anlaşılamamıştır. Bu nedenle bu denli küçük değişimlerin sıcaklıktan kaynaklanmadığını,

yüksek sıcaklıkların (680 °C ye kadar) bu tip karbonat kayaçların özgül ağırlıkları üzerinde etkin olmadığı anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar Ersoy vd. (2021a) tarafından yapılan çalışmada verilmiştir.



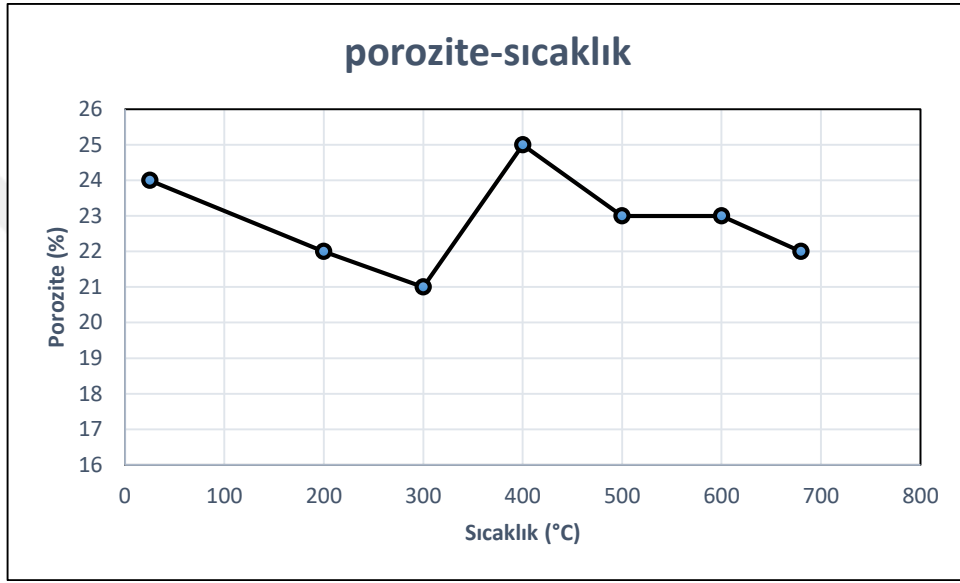
Şekil 19. Kireçtaşı örneklerinin özgül ağırlık-sıcaklık değişimi



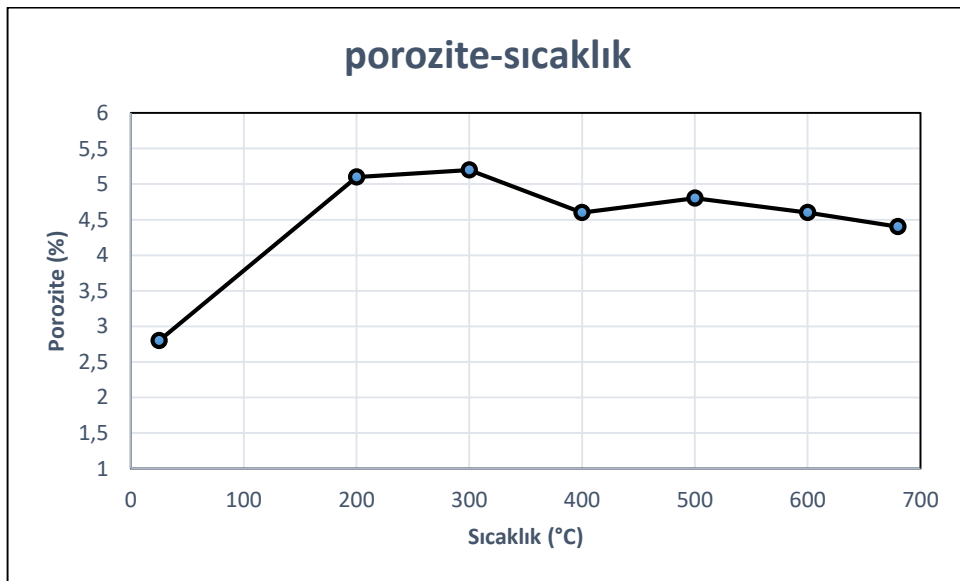
Şekil 20. Mermer örneklerinin özgül ağırlık-sıcaklık değişimi

Artan sıcaklıklara bağılı olarak kireçtaşlarının porozite değerlerinde kısmi bir azalma görülmüştür. Belli sıcaklık kademelerinde yüksek değerler görülse de eğilim genel olarak azalış göstermektedir. Bu durum SEM görüntülerinde de izlenmiştir (Şekil 21)

Kireçtaşlarından farklı olarak mermerlerde artan sıcaklık porozite değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum SEM görüntülerinde özellikle 600 °C ve sonrasında net olarak izlenmektedir (Şekil 22).



Şekil 21. Kireçtaşı örneklerinin porozite-sıcaklık değişimi



Şekil 22. Mermer örneklerinin porozite-sıcaklık değişimi

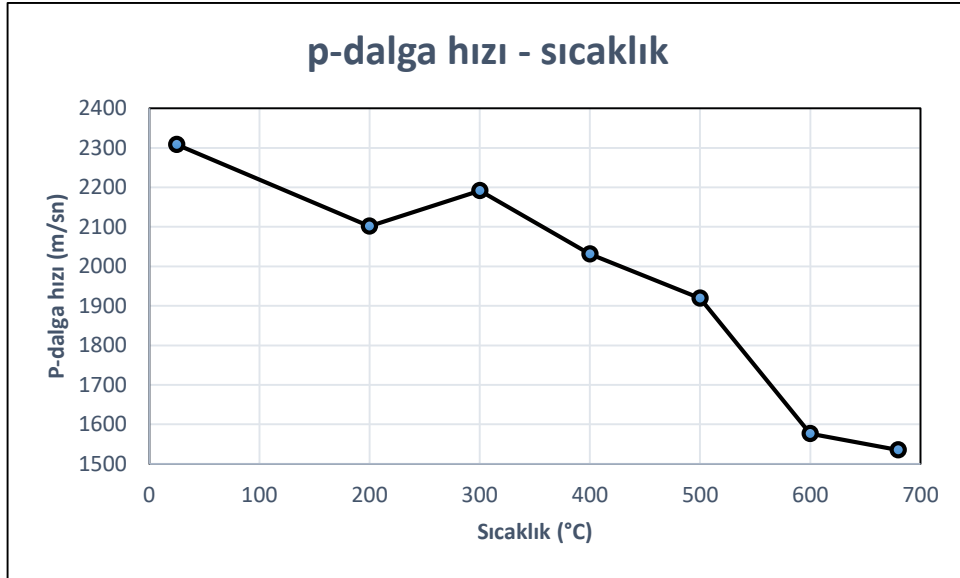
Çalışmada sıcaklık artışına bağlı olarak gelişen küçük değişimlerin sıcaklıktan kaynaklanmadığını, yüksek sıcaklıkların (680 °C ye kadar) bu tip karbonat kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde etkin olmadığı görülmüştür. Benzer sonuçlar Ersoy vd. (2021a) tarafından yapılan çalışmada verilmiştir. Çalışmada ancak 400-600 °C sıcaklıklara kadar karbonat kayaçların fiziksel özelliklerinde değişimin olmadığı, 800 °C ye kadar kısmi, 800 °C den sonra ise ani bir değişimin olduğu belirtilmiştir.

3.4.2.1. Boyuna Dalga Hızı

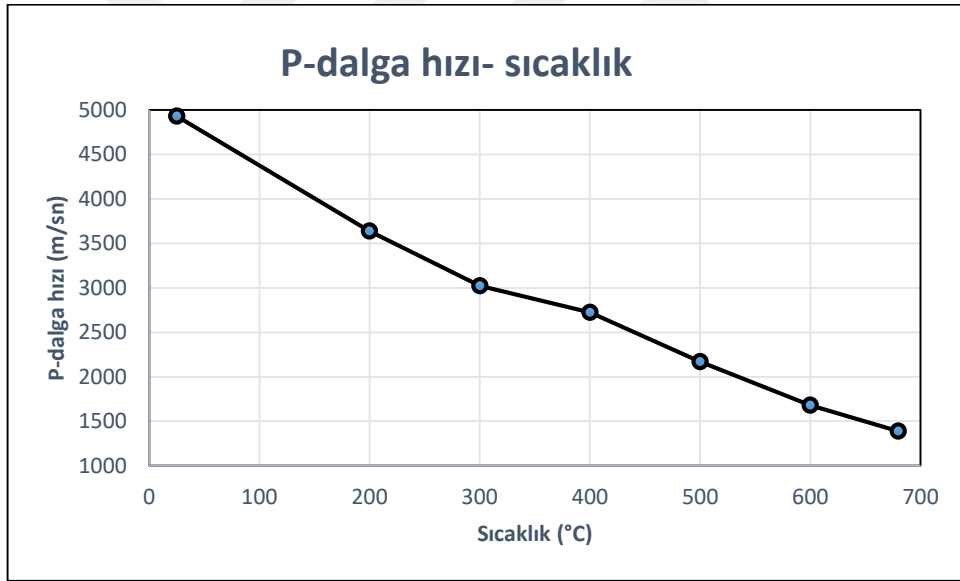
Kireçtaşı ve mermer örneklerinin boyuna dalga hızlarının sıcaklık ile değişimleri incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla kireçtaşında ve mermerlerde kademeli olarak bir azalma olduğu gözlenmektedir. Kireçtaşı örneklerine ait V_p değerlerinin başlangıçta 2308 m/sn iken 680°C’de 1535 m/sn’ye kadar azaldığı (Tablo 13), mermer örneklerinde ise başlangıçta V_p değeri 4932 m/sn iken 680°C’de 1387 m/sn’ye kadar azaldığı gözlenmiştir (Tablo 13).

Tablo 13. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklık P-dalga hız değişimi

Sıcaklık (°C)	Ortalama P-Dalga Hızı (m/sn)	
	Kireçtaşı	Mermer
25°C	2308	4932
200°C	2101	3639
300°C	2191	3024
400°C	2031	2725
500°C	1919	2169
600°C	1576	1679
680°C	1535	1387



Şekil 23. Kireçtaşı örneklerinin p-dalga hızı-sıcaklık değişimi grafiği



Şekil 24. Mermer örneklerinin p-dalga hızı-sıcaklık değişimi grafiği

Kireçtaşı ve mermer örneklerinin p-dalga hızlarının sıcaklık ile değişimleri grafiğine bakıldığında her iki grafikte de sıcaklık artışı ile birlikte azalmanın olduğu çok net görülmektedir (Şekil 23, Şekil 24).

3.4.2.2. Equotip (Leeb Sertliği)

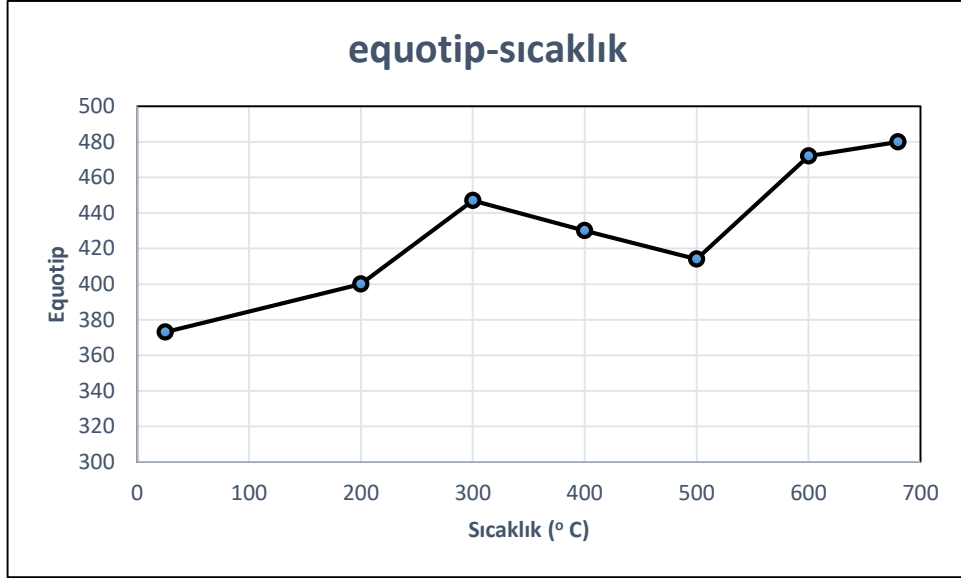
Kireçtaşı ve mermer örnekleri üzerinde 20 vuruş yaparak ortalamalar alınmış ve her sıcaklık kademesinde tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler sonucunda; sıcaklığa bağlı olarak kireçtaşı örneklerinin sıcaklık arttıkça leeb sertlik değeri arttığı (Şekil 25), mermer örneklerinde ise sıcaklık arttıkça leeb sertlik değeri azalma olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 26).

Kireçtaşı örneklerine ait leeb değeri incelendiğinde, genel olarak sıcaklık arttıkça leeb değeri artışı olmasına rağmen bazı sıcaklıklarda dalgalanmalar gözlenmiştir. Kireçtaşlarının en yüksek leeb değeri 680°C sıcaklıkta 480 olarak bulunmuştur (Tablo 14).

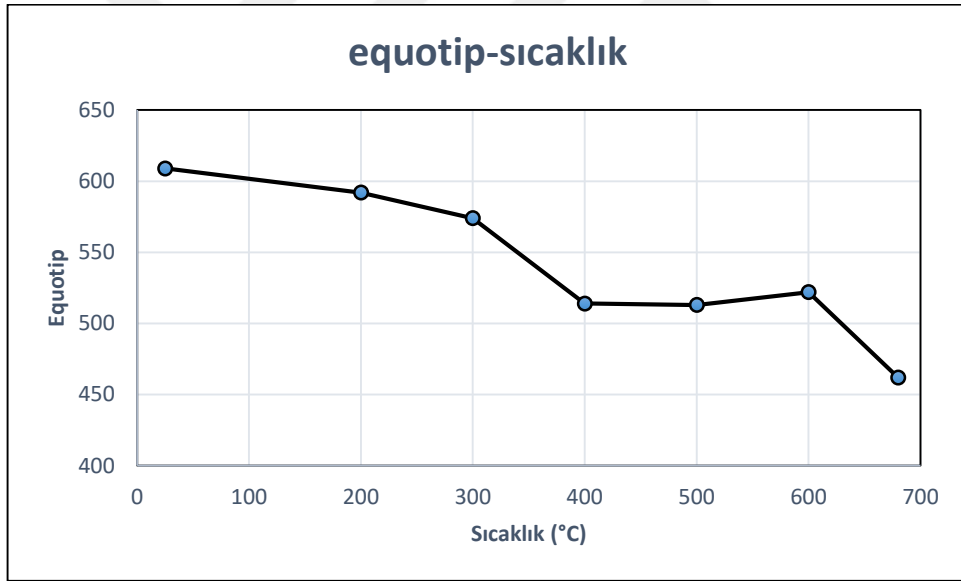
Mermer örneklerine ait leeb değeri incelendiğinde; ilksel duruma göre sıcaklığın artmasıyla leeb değeri azalma olduğu görülürken, bazı sıcaklık kademelerinde küçük de olsa bir artış olduğu görülmektedir. Mermer örneklerinin en yüksek leeb değeri ilksel durumda 609 iken en düşük değeri ise 680°C’ de 462 olarak bulunmuştur (Tablo 14).

Tablo 14. Kireçtaşı ve mermer örneklerinin sıcaklık-equotip değeri

Sıcaklık (°C)	Ortalama değeri	Ortalama değeri
	Kireçtaşı	Mermer
25°C	373	609
200°C	400	592
300°C	447	574
400°C	430	514
500°C	414	513
600°C	472	522
680°C	480	462



Şekil 25. Kireçtaşı örneklerinin equotip-sıcaklık değişim grafiği



Şekil 26. Mermer örneklerinin equotip-sıcaklık değişim grafiği

3.4.3. Dayanım Özelliklerinin Değişimi

Kireçtaşı ve mermer örneklerinin artan sıcaklıkla dayanımlarındaki değişimin incelenmesi amacıyla tek eksenli basınç dayanımı değerlerindeki değişimler değerlendirilmiştir. Kireçtaşı örneklerinde sıcaklığa bağlı olarak örneklerin dayanımında bir artış gözlenirken (Şekil 15), mermer örneklerinde ise sıcaklığın artmasıyla dayanımının

azaldığı gözlenmiştir (Şekil 16). Kireçtaşı ve mermer örneklerindeki bu artış ve azalış düzenli olmamakla birlikte bazı sıcaklık kademelerinde değişkenlik göstermektedir.

Kireçtaşı örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin artan sıcaklıkla değişimine bakıldığında, ilksel değer 23.61 MPa iken en yüksek değer 600°C’de 40.16 MPa olduğu görülmektedir (Tablo 15).

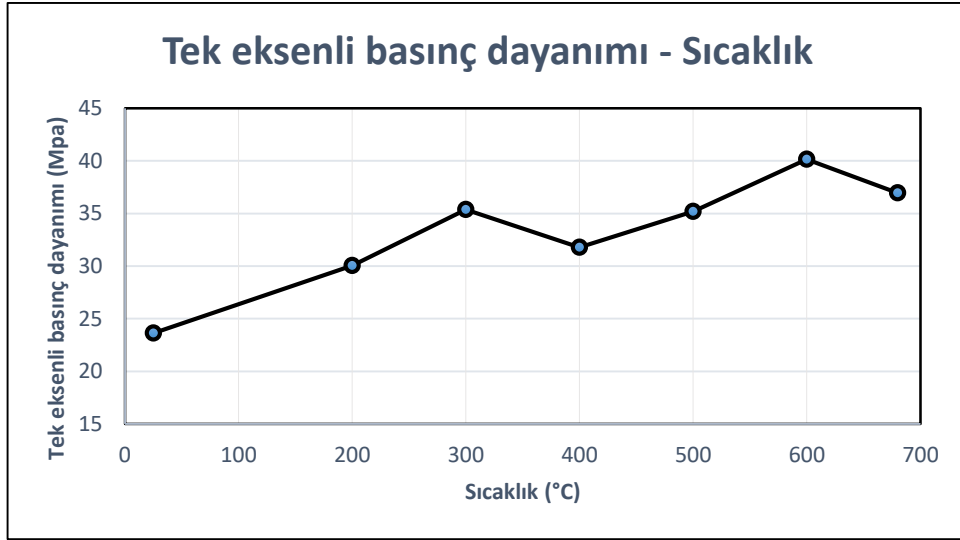
Mermer örneklerinin sıcaklık-tek eksenli basınç dayanımı ilişkisi incelendiğinde ise, ilksel durumda tek eksenli basınç dayanım değeri 76.27 MPa iken sıcaklığın artmasıyla dayanımda bir azalma meydana geldiği ve en düşük tek eksenli basınç dayanım değerinin 680°C’de 41.45 MPa olduğu görülmektedir (Tablo 16).

Tablo 15. Kireçtaşları örneklerinin sıcaklık- tek eksenli değişimi

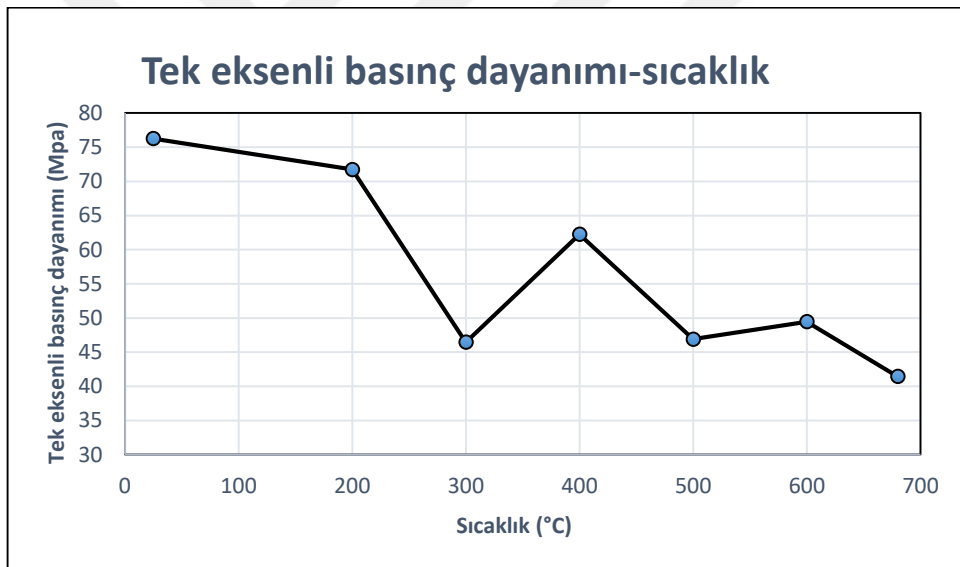
Sıcaklık (°C)	σ_c (Mpa)
25°C	23.61
200°C	30.06
300°C	35.37
400°C	31.78
500°C	35.2
600°C	40.16
680°C	36.95

Tablo 16. Mermer örneklerinin sıcaklık-tek eksenli değişimi

Sıcaklık (°C)	σ_c (Mpa)
25°C	76.27
200°C	71.73
300°C	46.45
400°C	62.24
500°C	50.55
600°C	49.46
680°C	41.45



Şekil 27. Kireçtaşı örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı-sıcaklık değişimi grafiği



Şekil 28. Mermer örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı-sıcaklık değişimi grafiği

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklar etkisinde kalan karbonat kayaçların mineralojik, mikro-yapısal, fiziksel ve dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiş, bu amaçla örnekler Eurocode (2002) tarafından önerilen dış yangın zaman-sıcaklık eğrisi dikkate alınarak 200, 300, 400, 500, 600 ve 680 °C de 2 saat süre ile yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Uygulamada Eurocode (2002) tarafından verilen sıcaklık-zaman grafiği kullanılmış, soğuma işlemi örneklerin termal şoka uğramaması için fırın içinde kendiliğinden gerçekleştirilmiştir. Kayaçların mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla ince kesit ve SEM görüntüleri ile XRD analiz sonuçlarından yararlanılmış, fiziksel özelliklerindeki değişimler birim hacim ağırlık, görünür porozite, özgül ağırlık ve boyuna dalga hızı değerleri, dayanım özelliklerindeki değişimler ise LEEB sertlik ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Çalışma kapsamında kireçtaşı ve mermer örnekleri seçilmiştir. Örneklerde yapılan ince kesitlerde kalsit mineralinin hâkim olduğu görülmüş, SEM görüntülerinde ise kristal boyutlarının kireçtaşlarında daha küçük mermerlerde ise daha büyük yapıda olduğu, mikro-çatlak oranının ise kireçtaşlarında mermerlere göre daha fazla olduğu görülmüştür.
2. Örneklere ait XRD analiz sonuçlarında; kireçtaşı örneklerinde genel olarak kalsit, muskovit, montmorillonit ve albit minerallerinin mevcut olduğu, mermer örneklerinde ise kalsit, dolomit, muskovit ve kuvars minerallerin mevcut olduğu görülmüştür.
3. SEM görüntüleri artan yüksek sıcaklıklar karşısında kireçtaşı örneklerinde topaklaşmanın meydana geldiğini göstermiştir. Bu durum boşluk yapısında bir azalmaya, dolayısıyla porozitede azalmaya neden olmuştur. Ancak topaklaşma sonucu taneler arasında yeni mikro-kırıklar oluşmuş ve ikincil boşluklar artmıştır. Bu durum porozitedeki azalmayı dengelemiştir. Mermerlere ait SEM görüntülerinde ise, artan sıcaklığa bağlı olarak yeni mikro-kırık oluşumundan ziyade mevcut kırıkların açıklıklarının arttığı, ancak 600 °C ve üstü sıcaklıklarda kırıklardan bağımsız boşlukların geliştiği görülmüştür.

4. Sıcaklığa bağılı olarak porozite değerlerindeki değişimler laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş, SEM görüntüleri dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Artan sıcaklıklara bağılı olarak kireçtaşlarının porozite değerlerinde genel eğilimin çok az miktarda olsa bile azalış olduğu, kireçtaşlarından farklı olarak mermerlerde ise artış olduğu g r lm ştir. Ancak bu artış ve azalış değerleri çok küçük yüzdelerde olduğu için bu duruma örnek heterojenliğinin de yol açabileceği dikkatten kaçmamalıdır.
5. Yüksek sıcaklıkların kayaçların fiziksel özellikleri üzerindeki değişimin belirlenmesi için özgül ağırlık değerlerinden de yararlanılmıştır. Ancak artan sıcaklıklara bağılı olarak özgül ağırlık değerlerindeki kısmi artışın örnek heterojenliğinde mi yoksa sıcaklık etkisiyle mi geliştiği belirlenememiştir.
6. Çalışmada sıcaklık artışına bağılı olarak gelişen küçük değişimlerin sıcaklıktan kaynaklanmadığını, yüksek sıcaklıkların (680  C ye kadar) bu tip karbonat kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde etkin olmadığı belirlenmiştir. Benzer sonuçlar, Ersoy vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada da g r lm ştir. Bu çalışmada 680  C dış yangın sıcaklığının porozite ve özgül ağırlık üzerinde fazla etkili olmadığı, bu değerlerin belirgin olarak ancak 800  C sıcaklıklardan sonra porozitenin arttığı ve özgül ağırlık değerinin bir hayli azaldığı belirtilmiştir.
7. Fiziksel özelliklerden farklı olarak kireçtaşı ve mermer  rneklerinin P-dalga hızlarının sıcaklık artışına bağılı olarak her sıcaklık kademesinde azaldığı g r lm ştir. Bu durum P-dalga hızı değerinin sıcaklık etkisinde diğer fiziksel özelliklerden çok farklı davranış göstermektedir. Literatür değerlendirildiğinde bu durum çok net olarak ifade edilmekte, artan sıcaklığa bağılı olarak P-dalga hızının sürekli azaldığı, dayanımın veya fiziksel özelliklerdeki değişimin bu terende paralel olabildiği gibi, tam tersi sonuçların da elde edildiği belirtilmiştir (Ersoy vd. 2021a, Ersoy vd. 2021b).
8. Çalışmada fiziksel özelliklere ek olarak sıcaklık artışının dayanım üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Özellikle LEEB sertlik değerleri dikkate alındığında, mermerlerde sıcaklık artışı ile genel olarak sertlik değerlerinde bir azalma kaydedilmiştir. Bu durum ise özellikle 680  C dış yangın sıcaklığının örneklerin yüzey kesimlerinde bir bozunmaya neden olduğunu göstermektedir. Kireçtaşı örneklerinde ise mermerlerden farklı olarak LEEB değerlerindeki artış üzerinde,

yüzeyde meydana gelen ancak örneklerin iç kesimlerinde etkili olamayan sinterlenmenin etkili olduğu düşünülmektedir.

9. Artan sıcaklığa bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerindeki değişim LEED sertlik değerlerindeki değişimle benzer eğilim göstermektedir. Kireçtaşı örneklerinde sıcaklığa bağlı olarak dayanımda bir artış gözlenirken mermer örneklerinde ise sıcaklığın artmasıyla dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum tamamıyla kil içeriğine bağlıdır. Kil içeren kayalarda belli sıcaklık kademelerinde dayanımın arttığı, ancak özellikle 800 °C den sonra dayanımın azaldığı birçok çalışmada belirtilmiştir. Çalışmada da kireçtaşlarında yapılan XRD analizlerinde kil minerallerinin varlığına rastlanmıştır.
10. Çalışma kapsamında elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklıkların kayalar üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde litolojik özelliklerden farklı olarak mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerinin çok etkili olduğu, özellikle kil içeriğinin büyük önem taşıdığı belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- ASTM D4644-16, 2016. Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Beck, K., Janvier-Badosa, S., Brunetaud, X., Török, Á., Al-Mukhtar, M., 2016. Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 20, 643–655. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1035804>
- Chaki, S., Takarli, M., Agbodjan, W.P., 2008. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. *Constr. Build. Mater.* 22, 1456–1461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.002>
- Corkum, A.G., Asiri, Y., El Naggar, H. ve Kinakin, D., 2018. The Leeb Hardness Test for Rock: An Updated Methodology and UCS Correlation. *Rock Mech. Rock Eng.* 51, 665–675. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1372-2>
- Desarnaud, J., Kiriya, K., Bicer Simsir, B., Wilhelm, K., Viles, H., 2019. A laboratory study of Equotip surface hardness measurements on a range of sandstones: What influences the values and what do they mean? *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 1419–1429. <https://doi.org/10.1002/esp.4584>
- Ersoy, H., Kolaylı, H., Karahan, M., Harputlu Karahan, H., & Sünnetci, M. O. (2019). Effect of thermal damage on mineralogical and strength properties of basic volcanic rocks exposed to high temperatures. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1515-1525.
- Ersoy, H., Atalar, C., Sünnetci, M. O., Kolaylı, H., Karahan, M. ve Ersoy, A. F. (2021a). Assessment of damage on geo-mechanical and micro-structural properties of weak calcareous rocks exposed to fires using thermal treatment coefficient. *Engineering Geology*, 284, 106046.
- Ersoy, H., Karahan, M., Kolaylı, H., & Sünnetci, M. O. (2021b). Influence of mineralogical and micro-structural changes on the physical and strength properties of post-thermal-treatment clayey rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(2), 679-694.
- EN 1991-1-2, 2002. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- Garrido ME, Petnga FB, Martínez-Ibáñez V, Serón JB, Hidalgo-Signes C. ve Tomás R (2021). Predicting the Uniaxial Compressive Strength of a Limestone Exposed to

- High Temperatures by Point Load and Leeb Rebound Hardness Testing. *Rock Mech Rock Eng* 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02647-0>
- Harpurlu, H., 2016. Sarraftepe(Trabzon) Tefritinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Sıcaklık Etkisiyle Değişiminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Heldal, T., Storemyr, P. (2015). Fire on the Rocks: Heat as an Agent in Ancient Egyptian Hard Stone Quarrying. In: Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_56.
- ISRM. 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) *Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group*
- Koca, M.Y., Ozden, G., Yavuz, A.B., Kincal, C., Onargan, T. ve Kucuk, K., 2006. Changes in the engineering properties of marble in fire-exposed columns. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.09.007>.
- Kawanishi, T., Hirata, T., Yashiro, T. ve Kawai, K., 2019. A simple method to evaluate the depth of concrete degradation by fire. *J. Adv. Concr. Technol.* 17, 639–647. <https://doi.org/10.3151/jact.17.639>
- Leeb D, 1979.“Dynamic hardness testing of metallic materials”. *Non Destructive Testing International*, 12(6), 274-278.
- Li Z, Fortin J, Nicolas A et al (2019) Physical and mechanical properties of thermally cracked andesite under pressure. *Rock Mech Rock Eng* 52:3509–3529. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01785-w>
- Li, Q., Yin, T., Li, X., Zhang, S., 2020. Effects of rapid cooling treatment on heated sandstone: a comparison between water and liquid nitrogen cooling. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 79, 313–327. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01571-6>.
- Meng, Q. Bin, Wang, C.K., Liu, J.F., Zhang, M.W., Lu, M.M., Wu, Y., 2020. Physical and micro-structural characteristics of limestone after high temperature exposure. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 79, 1259–1274. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01620-0>
- Ozguven, A., & Ozcelik, Y. (2014). Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. *Engineering Geology*, 183, 127–136.
- Török, Á., Hajpál, M., 2005. Effect of temperature changes on the mineralogy and physical properties of sandstones: a laboratory study *TT - Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege: eine internationale Zeitschrift. Restor. Build. Monum. an Int. J. = Bauinstandsetz. und Baudenkmalpfl. eine Int. Zeitschrift* 11, 211–218.

- Ulusay, R., 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. ve Binal, A., 2011. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, JMO yayınları, Ankara.
- Wang, P., Xu, J.Y., Liu, S., 2015. Ultrasonic method to evaluate the residual properties of thermally damaged sandstone based on time-frequency analysis. Nondestruct. Test. Eval. 30, 74–88. <https://doi.org/10.1080/10589759.2014.1002838>
- Wu, G., Wang, Y., Swift, G., Chen, J., 2013. Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone. Geotech. Geol. Eng. 31, 809–816. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9614-x>
- Yang, J., Fu, L.Y., Zhang, W., Wang, Z., 2019. Mechanical property and thermal damage factor of limestone at high temperature. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 117, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.012>
- Yavuz, H., Demirdag, S., Caran, S., 2010. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47, 94-103.
- URL-1, <https://www.ntv.com.tr/dunya/notre-dame-katedralindeki-yanginin-nedenine-iliskin-aciklama,HholcRkmVE2iDZGEEi2uuw>. (07/01/2022)
- URL-2, <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-45392558>. (07/01/2022)
- URL-3, <https://www.aa.com.tr/tr/dunya/japonyanin-tarihi-shuri-kalesi-yandi/1631591>. (07/01/2022)

ÖZGEÇMİŞ

Seda İNALTUN, ilköğretim ve ortaokulu Turhan Feyzioğlu ilköğretim okulu'nda, liseyi Ayrancı Aysel Yücetürk Anadolu lisesinde tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2019-20 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başladı.

