



BAZALTLARDA ISIL İLETKENLİK VE ISI DEPOLAMADA OLİVİNİN SERPANTİNLEŞMESİNİN ETKİSİ

Erdoğan TİMURKAYNAK^{*1,3}, Kadir KARAMAN², Hasan KOLAYLI¹, Yaşar Çakır⁴

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 61080, Trabzon

⁴ Trabzon Valiliği Planlama ve Koordinasyon Daire Başkanlığı, Trabzon

Anahtar Kelimeler

*Bazalt,
Isıl İletkenlik,
Isı Depolama,
Porozite,
Serpantinleşme Oranı.*

Öz

Bu çalışmada, artan serpantinleşme oranı ile kayanın ısı iletkenlik katsayısı, ısı geçirgenlik ve porozitesi arasında bir ilişki gözlemlenmiş ve serpantinleşmenin nedenleri araştırılmıştır. Çalışma alanı stratigrafik açıdan farklı kot seviyelerinde bulunmakta olup, örnekleme noktalarına göre üç gruba (A1, M2 ve M3) ayrılmıştır. Ayrıca petrografik ince kesit çalışmaları ve Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) analizleri yapılmıştır. Mineralojik ince kesit analizleri, olivinin serpantinleşmesinin A1, M2 ve M3 bazaltları için sırasıyla ortalama % 8.25, % 24 ve % 75.5 olduğunu göstermiştir. Olivinlerdeki artan serpantinleşme oranı nedeniyle ısı iletkenlik katsayıları ve ısı geçirgenlik değerleri oldukça azalmıştır. TEM analizlerine göre M2 ve M3 bazaltlarında mikro çatlaklar yoğun bir şekilde bulunmaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı ile serpantinleşme oranı ve porozite (%) arasındaki korelasyon oranı hem kuru hem de doymuş numuneler için 0.90-0.99 arasında değişmiştir. Volkan konisi ile fay hattının yakınlığı ve M3'ün stratigrafik olarak daha yüksek kotlardaki konumu serpantinleşmeye neden olan önemli faktörler olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak ısı depolama malzemesi olarak kullanılan kayalara ait büyük ölçekli sahalarda ısı iletkenlik ve ısı geçirgenlik katsayılarındaki değişimler araştırılmalı ve varsa serpantinleşme gibi alterasyon ürünleri kontrol edilmelidir.

EFFECT OF SERPENTINIZATION OF OLIVINE ON THERMAL CONDUCTIVITY AND HEAT STORAGE IN BASALTS

Keywords

*Basalt,
Thermal Conductivity,
Thermal Storage,
Porosity,
Serpentinization Rate.*

Abstract

In this study, a relationship was observed between the increasing degree of serpentinization and the thermal conductivity coefficient, thermal diffusivity and porosity of the rock, and the reasons for the serpentinization were investigated. The study area is located at different stratigraphically levels and is divided into three groups (A1, M2 and M3) according to the sampling points. In addition, petrographic thin section studies and Scanning Electron Microscope (SEM) analyzes were performed. Mineralogical thin section analyzes showed that the serpentinization of olivine averaged 8.25%, 24% and 75.5% for A1, M2 and M3 basalts, respectively. Due to the increasing degree of serpentinization in olivines, the thermal conductivity coefficients and thermal diffusivity values have decreased considerably. According to SEM analysis, microcracks are intense in M2 and M3 basalts. The degree of correlation between the coefficient of thermal conductivity with the degree of serpentinization and porosity (%) varied between 0.90 and 0.99 for both dry and saturated samples. The proximity of the volcanic cone and the fault line and the stratigraphical location of M3 at higher elevations were considered as important factors causing serpentinization. As a result, changes in thermal conductivity coefficients and thermal diffusivity should be investigated in large-scale areas of rocks used as heat storage material and alteration products such as serpentinization should be checked.

* İlgili yazar / Corresponding author: tkaynak@ktu.edu.tr, +90-462-377-2065

Alıntı / Cite

Timurkaynak, E., Karaman, K., Kolaylı, K., Çakıcı, Y., (2023). Bazaltlarda Isıl İletkenlik ve Isı Depolamada Olivinin Serpantinleşmesinin Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(4), 1486-1495.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Timurkaynak / N. Surname, 0000-0001-9311-539X
 K. Karaman / N. Surname, 000-0002-3831-4465
 H. Kolaylı / N. Surname, 0000-0003-3629-7371
 Y. Çakır / N. Surname, 0000-0002-0580-4599

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.08.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.10.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.10.2023
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2023

EFFECT OF SERPENTINIZATION OF OLIVINE ON THERMAL CONDUCTIVITY AND HEAT STORAGE IN BASALTS

Erdoğan TİMURKAYNAK^{†1,3}, Kadir KARAMAN², Hasan KOLAYLI¹, Yaşar Çakır⁴

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 61080, Trabzon

⁴Trabzon Valiliği Planlama ve Koordinasyon Daire Başkanlığı, Trabzon

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- The serpentinization of basalts was investigated.
- The serpentinization degree of basalt was determined and its porosity was determined.
- The thermal conductivity of basalt undergoing serpentinization was investigated.
- The importance of serpentinization in terms of heat storage is indicated

Purpose and Scope

The aim of this study is to evaluate basalts according to their serpentinization degree and thermal conductivity coefficients in terms of heat storage and to consider these variables while these rocks are used for heat storage, in determining the type of basalt to be used.

Design/methodology/approach

Thermal conductivity and apparent porosity of basalt samples were obtained. Serpentinization of olivine minerals was investigated by thin section analysis. The relationships between thermal conductivity with porosity and serpentinization rate were evaluated.

Findings

The thermal conductivity coefficients of basalt with a high degree of serpentinization have decreased considerably. In addition, according to SEM analyzes and mineralogical analyzes M3 rock was found to have the highest porosity and the lowest porosity rock was determined as M1 rock.

Originality

The importance of basalts in terms of heat storage has been examined in previous studies. However, in our study, the fact that the heat storage property of basalt increased or decreased according to the degree of serpentinization was determined by measuring the thermal conductivity coefficients, and basalt was classified in terms of heat storage.

[†] Corresponding author: tkaynak@ktu.edu.tr, +90-462-377-2065

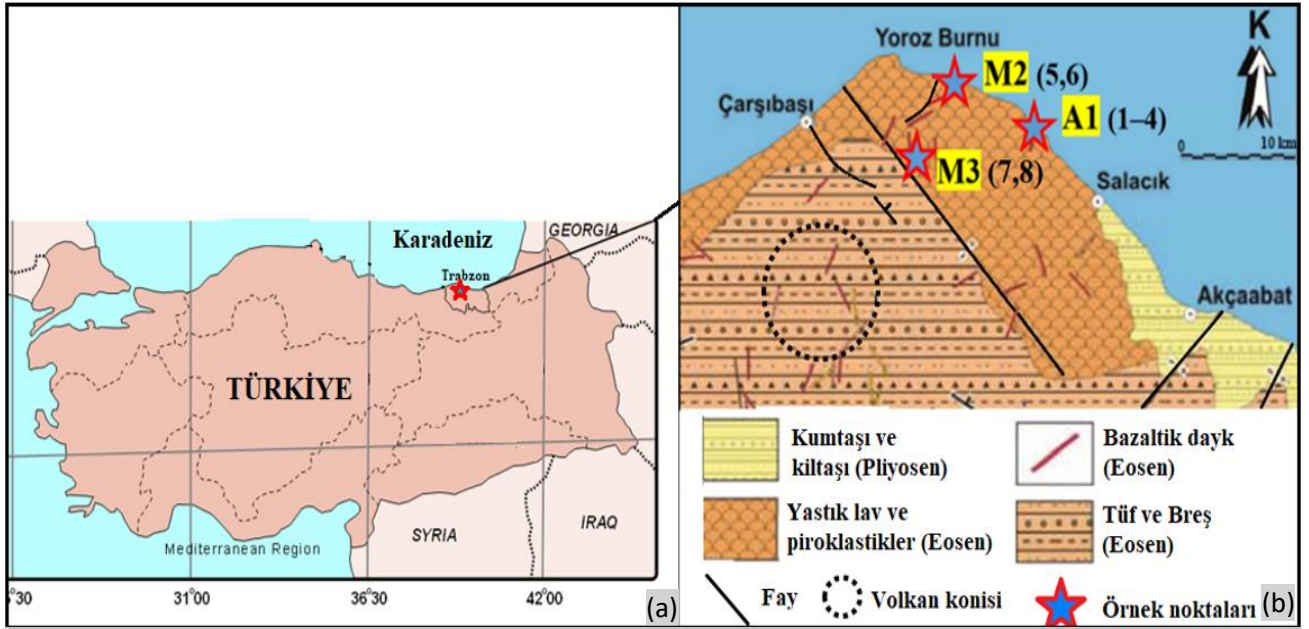
1. Giriş (Introduction)

Isı enerjisi, maddenin iç enerjisindeki farklılaşma ile duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısı ya da bunların birleşimi olarak depolanır. Duyulur ısı depolama yönteminde, ısı depolayan malzemenin mevcut sıcaklığının değişimi ile ortaya çıkan ısıdan yararlanır. Gizli ısı depolamasında, faz değişimi gösteren maddeler (FDM) kullanılır. Depolama maddesinin faz değiştirme esnasında, depolama işlemindeki sıcaklık aralığında ortaya çıkan gizli ısı belirlenir. Bu amaçla belirli sıcaklıklarda ergime, buharlaşma veya diğer faz değişimlerine uğrayan malzemelerden yararlanır. Termokimyasal depolama metodunda ise ısı enerjisi bir bileşiğin bağ enerjisi olarak depolanabilir (Kozak ve Kozak, 2012). Kaya gibi katı malzemeler, metaller, beton, kum, tuğla vb. malzemeler düşük ve yüksek sıcaklıkta termal enerji depolama için kullanılabilir (Hasnain vd., 1996). Genellikle kaya kütleleri veya çakıl yatakları düşük maliyetleri nedeniyle depolama malzemesi olarak tercih edilir. Kaya kütlesi veya çakıl yatağı, gevşek bir şekilde paketlenmiş kaya malzemesinden oluşur. Depolama sisteminde depolanan enerji, malzemenin termofiziksel özellikleri, kaya boyutu ve şekli, paketlenme yoğunluğu, ısı transferi sıvısı gibi parametrelere bağlıdır. Ayrıca ısı enerjisi kaya kütlelerinde veya çakıllarda (yalıtımlı kaplarda paketlenmiş) depolanabilir. Araştırmacılar, kaya dolgulu yatağın ısı transfer özellikleri hakkında çok sayıda çalışma yürütmüşlerdir (Schumann, 1929). (Furnas 1930) ilk ısı depolama malzemesi olarak ideal dolgulu yataklı kayayı önerdi, sonra ısı transferi ile ilgili deneysel ısı transferi çalışmaları yürütmüş olup kayalarla dolu bir yataktan ısı akışı ne kadar fazla olursa kayaların etkili ısı transfer katsayısı o kadar çok yüksek olduğu belirtilmiştir. Termal enerji, hissedilir ısı ve gizli ısı olarak depolanabilir. Duyulur ısı depolama sistemleri genellikle depolama ortamı olarak kayaları veya suyu kullanır. Isı, depolama ortamı sıcaklığı artırılarak depolanır. Gizli ısı depolama sistemleri enerjiyi faz değiştiren malzemelerde depolar. Isı, malzemenin katıdan sıvıya faz değiştirme esnasında depolanır (Dincer, 1999). Gevşek bir şekilde paketlenmiş kaya yatağı ısı depolama ortamı olarak kullanılır ve ısıyı 685 °C'ye kadar depolar (Park vd., 2014). Karakterizasyon deneyleri silikanın potansiyelini göstermiş olup, kayalara termal işlem uygulamakta ve özellikle 250 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda kayaların ısı performansını iyileştirmektedir (Jemmala ve Zari, 2017). Eriterek söndürme yöntemiyle bazalt camları hazırlanmıştır. Bazalt camının yüksek sıcaklıkta ısı depolamaya uygulanabilirliği incelenmiş olup yapılan çalışmada, bazalt camlarının kimyasal bileşimi ve yapısı belirlenmiştir. Bu işlem sırasında sıcaklık ve bileşimin; yoğunluk, ısı kapasitesi, termal difüzyon gibi temel termofiziksel özellikler üzerindeki etkisi incelenmiş olup, iletkenlik ve termal genleşme bir dizi termal döngü sırasında analiz edilmiştir. Bazalt camının son derece yüksek ısı depolama, performansı, termal kararlılığı ve çalışma sıcaklığı 1000 °C kadar uygun, güneş enerjisi ısı depolama malzemesi olarak kullanılabilir olduğu gösterilmiştir (Liu vd., 2020). İnce taneli bazalt kayalarının yüksek enerji depolama uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılma potansiyeli 700 °C ye kadar konsantre güneş enerjisi santrallerinde uygulanmıştır. Düşük maliyet ve kolay bulunabilirliklerine ek olarak, düşük çevresel etkilerde bazalt kayaları yüksek termo-fiziksel özellik ve iyi termal kararlılık göstermiştir (Nahas ve Py, 2019). Günümüzde alternatif termal enerji depolama malzemeleri geliştirmek için yoğun bir araştırma vardır. Konsantre güneş santralleri için 800–1000 °C sıcaklık aralığında bazalt kaya kütleleri seçilir ve bu bazaltların ısıtma işlemi sırasında (1000 °C'ye kadar) mineralojisinin, bileşiminin ve dokusunun termal özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir (Benjamin vd., 2017). Gözenekli ortamda ısı kayıpları ve ısı iletiminde ısı transferinin varlığı şarj ve deşarj sürelerinde artış tespit edilmiştir (Andreozzi vd., 2012). Harry Thomasson yöntemi, suyun kullanıldığı en uygun yöntemlerden biri olup kaya ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sistemde kayalar ve su içeren tank bir izolasyon ile çevrilidir. Bu sistemin avantajı, suyun ve kayaların ısı kapasitesinin çok yüksek olmasıdır. Hava ile temas eden kayanın yüzeyi arttıkça kayanın absorbe edeceği ısı kapasitesinde fazla olacaktır (Dincer, 2002).

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada kullanılan bazaltlar, Trabzon ili, Akçakale-Mersin mahalle sınırları içinde 3 ayrı sahadan temin edilmiştir. Eosen yaşlı bazaltlar yine aynı yaşlı piroklastitler içinde kalınlığı 12-15 metre arasında olan prizmatik dayk şeklinde bulunurlar (Şekil 1). 3 farklı sahadan alınan bazaltlar; Akçakale 1 (A-1), Mersin 2 (M-2), Mersin 3 (M-3) şeklinde kodlanmıştır.

Bu çalışmada, farklı gözenek ve alterasyon özelliklerine sahip bazaltların termal iletkenlik katsayısı araştırılmış ve ayrıca gözenek ve alterasyonun ısı depolama üzerindeki etkisi irdelenmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahasının yer bulduru (a) ve jeolojik haritası (b) (Yücel vd., 2014'ten değiştirilmiştir)
(Location (a) and geological map of the study area (b) (modified from Yücel 2013))

2.1. Deneysel çalışmalar (Experimental studies)

Farklı serpantinleşme oranına sahip A1, M2, M3 lokasyonlarındaki bazalt örneklerinin termal iletkenlikleri ısı iletim katsayısı ölçme cihazı ile belirlenmiş olup termal geçirgenlikleri ise bazalt örneklerinin adyabatik sistem içerisinde özgül ısı sabitlerinin (c_p , bazalt) bulunması ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Melzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. A1, M2 ve M3 lokasyonlarına ait bazalt örnekleri için kuru ve doymuş bazalt numuneleri olarak ölçümler toplamda 106 adet olacak şekilde yapılmıştır.

Her test üç kez tekrarlandı ve değerlerin ortalaması alınarak termal iletkenlik değerleri hesaplandı. Bu çalışmada termal iletkenlik ölçümlerinde kullanılan sensör 0-2 °C arasında hassas olup, bazaltlar için sıcaklık farkı 1 °C olarak alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan numunelerin boyutları yaklaşık 6x4x1.5 cm³'tür. Ölçümler sırasında plakalar arasında boşluk kalmayacak şekilde yüzeyler düzleştirilmiş ve parlatılmıştır. Bu nedenle plakalar arası ısı transfer katsayısını ölçmek için kullanılan prob her iki yüzeyle tam temas halindedir.

Porozite (% n) deneylerinde toplam 40 adet silindirik şekilli örnekler kullanılmıştır. Ölçümlerde aşağıdaki eşitlikler'den yararlanılmıştır.

$$\text{Gözenek hacmi, cm}^3 = (W_D - W_K) \quad (1)$$

$$\text{Porozite (n) \%} = ((W_D - W_K) / V_T) \times 100 \quad (2)$$

Eşitlikte; W_D = doymuş ağırlık, W_K = kuru ağırlık ve V_T = toplam hacmi göstermektedir.

Porozite ve serpantinleşme oranının etkisini görebilmek için 3 farklı lokasyondan (A1, M2 ve M3) 1, 5 ve 8 nolu örneklerde özgül ısı ve termal geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Etüvde 80 °C'ye kadar ısıtılmış temsili bazalt numuneleri strfordan yapılmış adyabatik bir hazne içerisinde sıcaklığı 20 °C olan saf su içerisine bırakılmış ve denge sıcaklığı termokupullar ile ölçülmüştür. Buradan hareketle aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bazalt numunelerinin özgül ısı ve termal geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır.

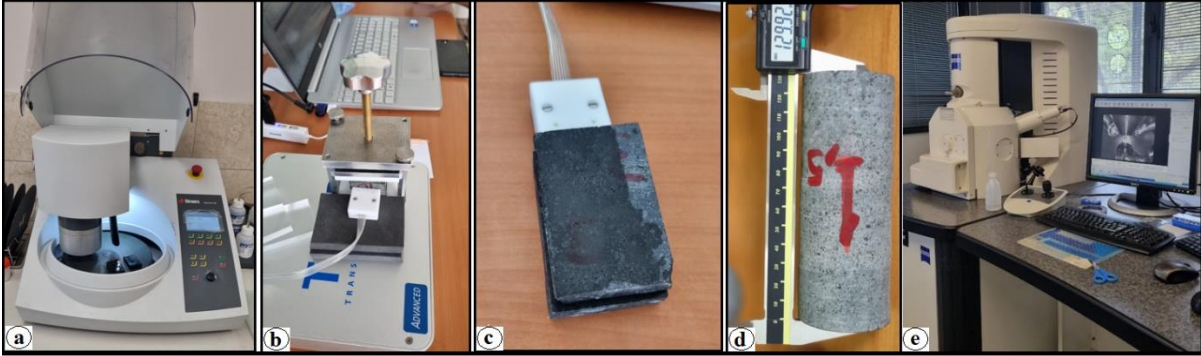
$$Q_{\text{Alınan}} = -Q_{\text{Verilen}} \quad (3)$$

$$m_{\text{su}} c_{p,\text{su}} (T_{\text{denge}} - T_{1,\text{su}}) = -m_{\text{bazalt}} c_{p,\text{bazalt}} (T_{1,\text{bazalt}} - T_{\text{denge}}) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\text{iletlenen ısı}}{\text{depolanan ısı}} = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (5)$$

Burada, α termal geçirgenlik, k ısıl iletkenlik katsayısı, ρ yoğunluk, c_p özgül ısı değeridir.

Bazalt örneklerinin A1, M2 ve M3 için TEM analizleri de ayrıca yapılmış olup, her numune doku, mikro çatlakların varlığı vb. açısından değerlendirilmiştir. Tablo 1'de kuru ve doymuş koşullar için ortalama termal iletkenlik, ve porozite değerleri ile üç örnek için termal geçirgenlik ve özgül ısı değerleri listelenmektedir. Termal geçirgenlik parametresinin hesaplanmasında kullanılan örnekler için yoğunluk değerleri A1 (1), M2 (5) ve M3 (8) için sırasıyla 2.90, 2.80 ve 2.78 gr/cm³' tür. 1'den 4'e kadar olan bazalt örnekleri A1'e, 5 ve 6 numaralı örnekler M2'ye, 7 ve 8 numaralı örnekler M3'e aittir. Laboratuardaki bazı deneysel çalışmaların bir görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Deneyle tabi tutulan bazı örnekler; yüzey düzeltme işlemi (a), ısı iletkenlik ölçümleri (b, c), porozite için hacim hesaplama (d), TEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizi (e) Some examples classified according to experiments; surface smoothing process (a), thermal conductivity measurements (b, c), volume programming for porosity (d), TEM (Scanning Electron Microscope) analysis (e)

Tablo 1. Bazaltların ısı iletkenlik ve porozite değerleri (Strength and apparent porosity values of basalts)

Kaya kodu	Isıl İletkenlik _{Kuru} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Isıl İletkenlik _{Doymuş} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Isıl geçirgenlik (m ² / s)	Özgül ısı (J / kg °K)	n (Porozite) (%)
1	1.5870	1.6260	0.89 x 10 ⁻⁶	615	0.65
2	1.5602	1.6058	-	-	0.66
3	1.5022	1.5144	-	-	0.84
4	1.5276	1.5338	-	-	0.75
5	1.0499	1.2215	0.62 x 10 ⁻⁶	600	2.48
6	0.5207	0.9867	-	-	3.11
7	0.4042	0.7830	-	-	4.22
8	0.3685	0.4045	0.23 x 10 ⁻⁶	583	5.29

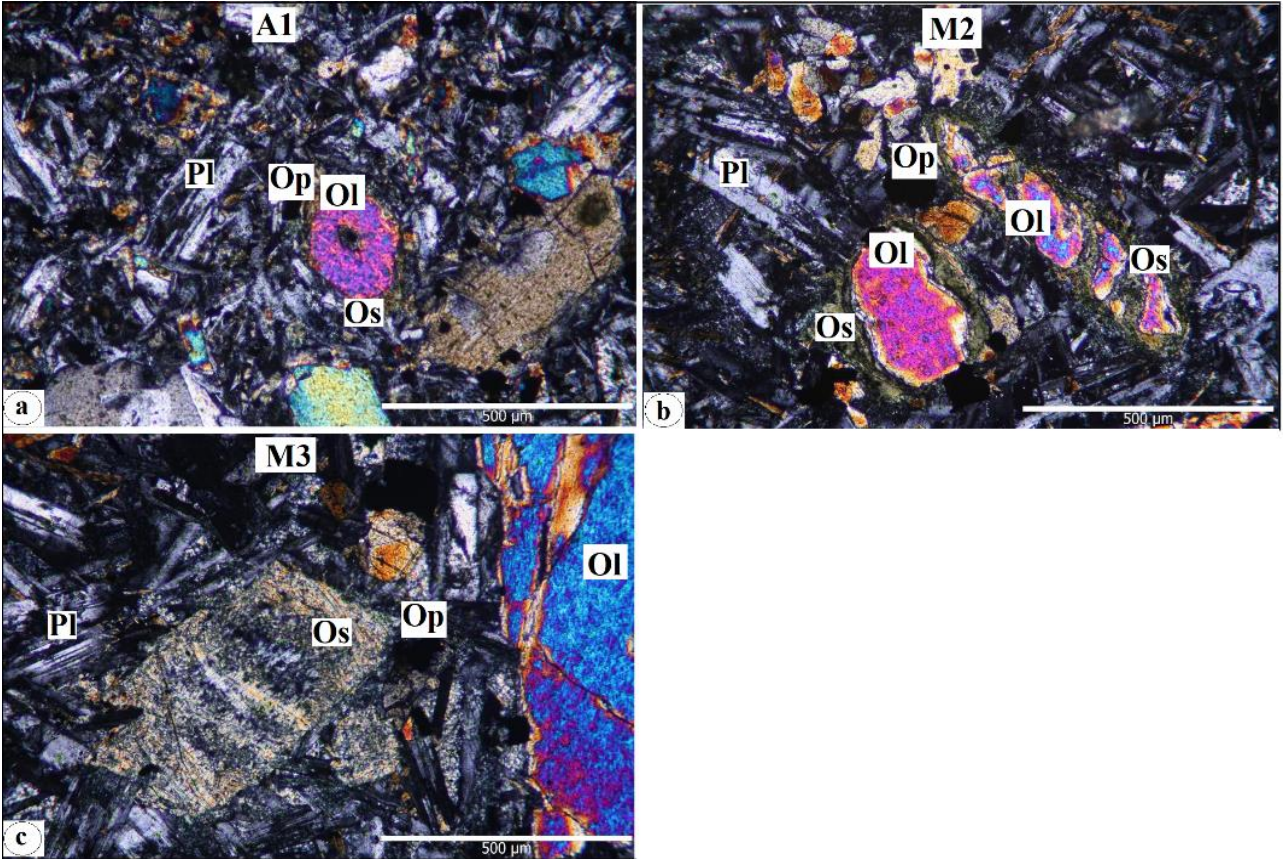
A1: 1-4, M2: 5-6, M3=7-8 nolu örnekler

2.3. Petrografik ince kesit analizleri (Petrographic thin section analyses)

İnce kesit analiz sonuçlarına göre her üç bölgeden alınan kayaların adı olivin ojit bazalt olup mikrogronü-mikrolitik porfirik dokuya sahiptirler. Ana mineral olarak çalışılan bazaltlarda labradorit, ojit, biyotit, olivin ve opak (magnetit) mineraller gözlemlenmiştir. A1 bazaltlarında ortalama mineral yüzdeleri labradorit % 48.5, ojit % 26.25, olivin % 19, biyotit % 2.25, gözeneklilik % 1.5 olarak belirlenmiştir. Olivinlerde serpantinleşme oranı % 8.25'tir. M2 bazaltlarında ortalama mineral yüzdeleri labradorit % 47, ojit % 25.5, olivin % 19.5, biyotit % 3, gözeneklilik % 2 olarak belirlenmiştir. Olivinlerde serpantinleşme oranı % 22'dir. M3 bazaltlarında ortalama mineral yüzdeleri labradorit % 46.5, ojit % 27.5, olivin % 19.5, biyotit % 2.5, gözeneklilik % 2 olarak belirlenmiştir. Olivinlerde serpantinleşme oranı % 75.5'tir. A1, M2 ve M3 bazaltlarının mikrogronü-mikrolitik hamuru içerisindeki olivinlerin serpantinleşme oranı toplam kayadaki serpantinleşme oranına yaklaşık olarak eşittir. A1, M2 ve M3 bazaltlarına ait en düşük ve en yüksek mineral yüzdeleri ve serpantinleşme oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bazaltların ince kesit analiz sonuçları (Thin section analysis results of basalts)

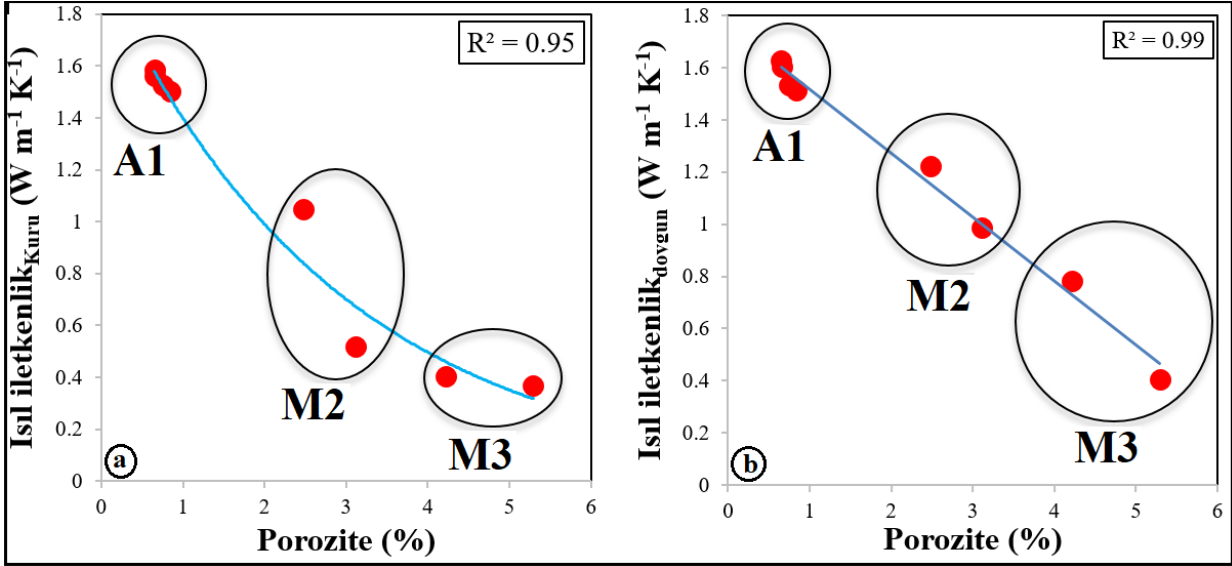
Mineraller	Ortalama mineral içeriği (%)		
	A1	M2	M3
Labradorit	47-50	46-48	46-47
Ojit	25-28	26-27	27-28
Opak	2-3	3	2
Olivin	18-20	19-20	19-20
Biyotit	2-3	3	2-3
Boşluk	1-2	2	2
Os	5-15	15-35	70-80



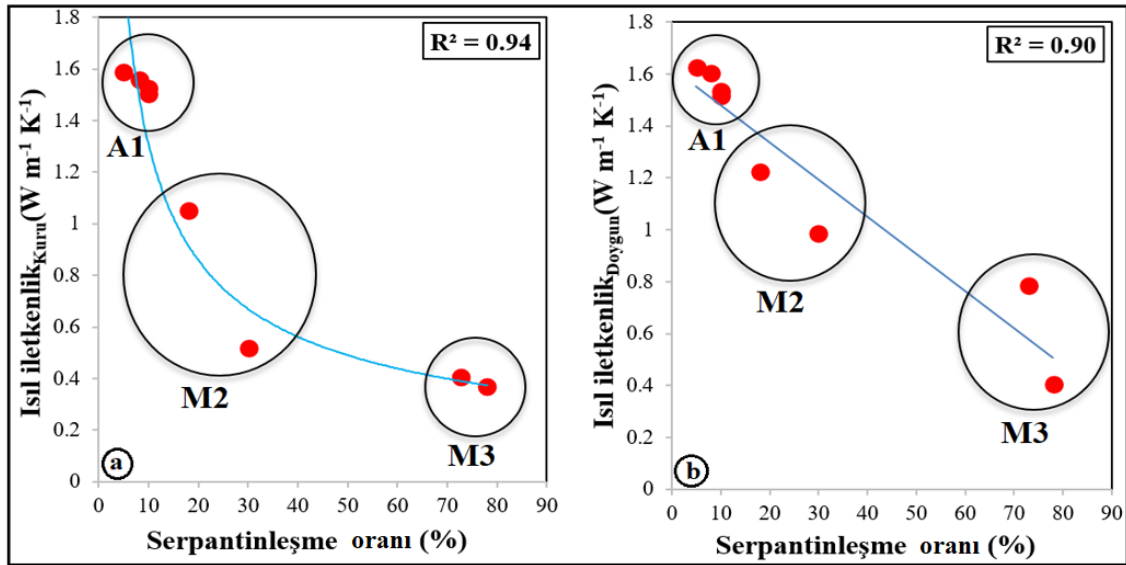
Şekil 2. Bazaltların mikroskop görüntüleri, A1 (a), M2 (b) ve M3 (c), Pl: Plajiyoklaz, Ol: Olivin, Op: Opak mineral, Os: Olivinin serpantinleşme oranı (Microscope camera of basalts, A1 (a), M2 (b) and M3 (c), Pl: Plagioclase, Ol: Olivine, Op: Opaque mineral, Os: Serpentinization rate of olivine)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

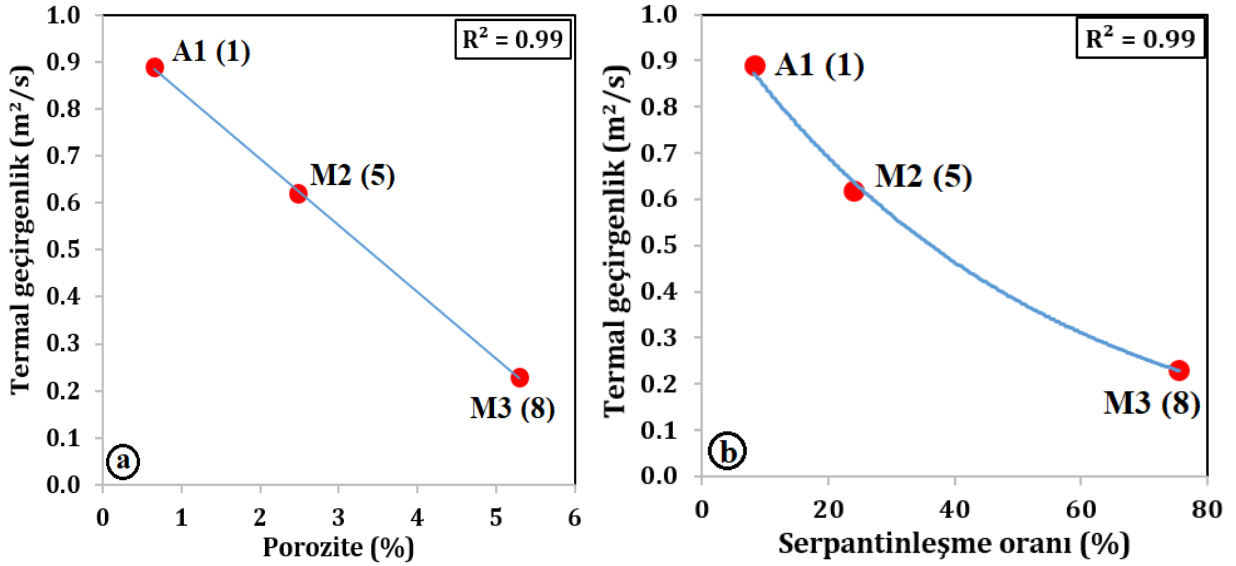
Tablo 1 değerlendirildiğinde ısı iletkenlik, ısı geçirgenlik ve porozite değerlerinin A1, M2 ve M3 bölgeleri için farklılık arz ettiği anlaşılmaktadır. Bu farklılığı daha iyi anlamak ve parametreler arasındaki ilişkiyi görebilmek için korelasyon grafikleri çizilmiştir (Şekil 4a ve b). Grafikler incelendiğinde doymun ve kuru ısı iletkenlik değerleri ile porozite arasında çok yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir ($R^2 > 0.90$). Porozite değerlerinin artmasıyla kuru ve doymun ısı iletkenlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Tablo 2 incelendiğinde ise bazaltların mineral içeriği genel olarak eş değerdir. Ancak, bazaltlar içerisinde yaygın olarak bulunan olivin minerallerinde 3 bölge için değişen oranlarda serpantinleşmeye rastlanmıştır. Söz konusu ısı iletkenlik ve porozite değerlerindeki değişime neden olan en önemli faktörün artan serpantinleşme oranı olduğu kanaatine varılmıştır. Serpantinleşme oranı ve doymun ve kuru ısı iletkenlik değerleri arasındaki ilişki bütün kayalar için araştırılmıştır (Şekil 5a, b). Grafiklere göre serpantinleşme oranı arttıkça doymun ve kuru ısı iletkenlik değerleri düşmüştür. Isı geçirgenlik ile porozite ve serpantinleşme oranı arasındaki ilişkiler Şekil 6 a ve b'de gösterilmiştir. Isı iletkenliğe benzer olarak ısı geçirgenlik değerleri arttıkça hem porozite de hem de serpantinleşme oranında düşüş görülmüştür.



Şekil 3. Serpantinleşme oranı ve görünür porozite arasındaki ilişki, bütün örnekler (a), kuru ve doymun durum (b) (The relationship between the degree of serpentinization and the apparent porosity, all samples (a), dry and saturated state (b))

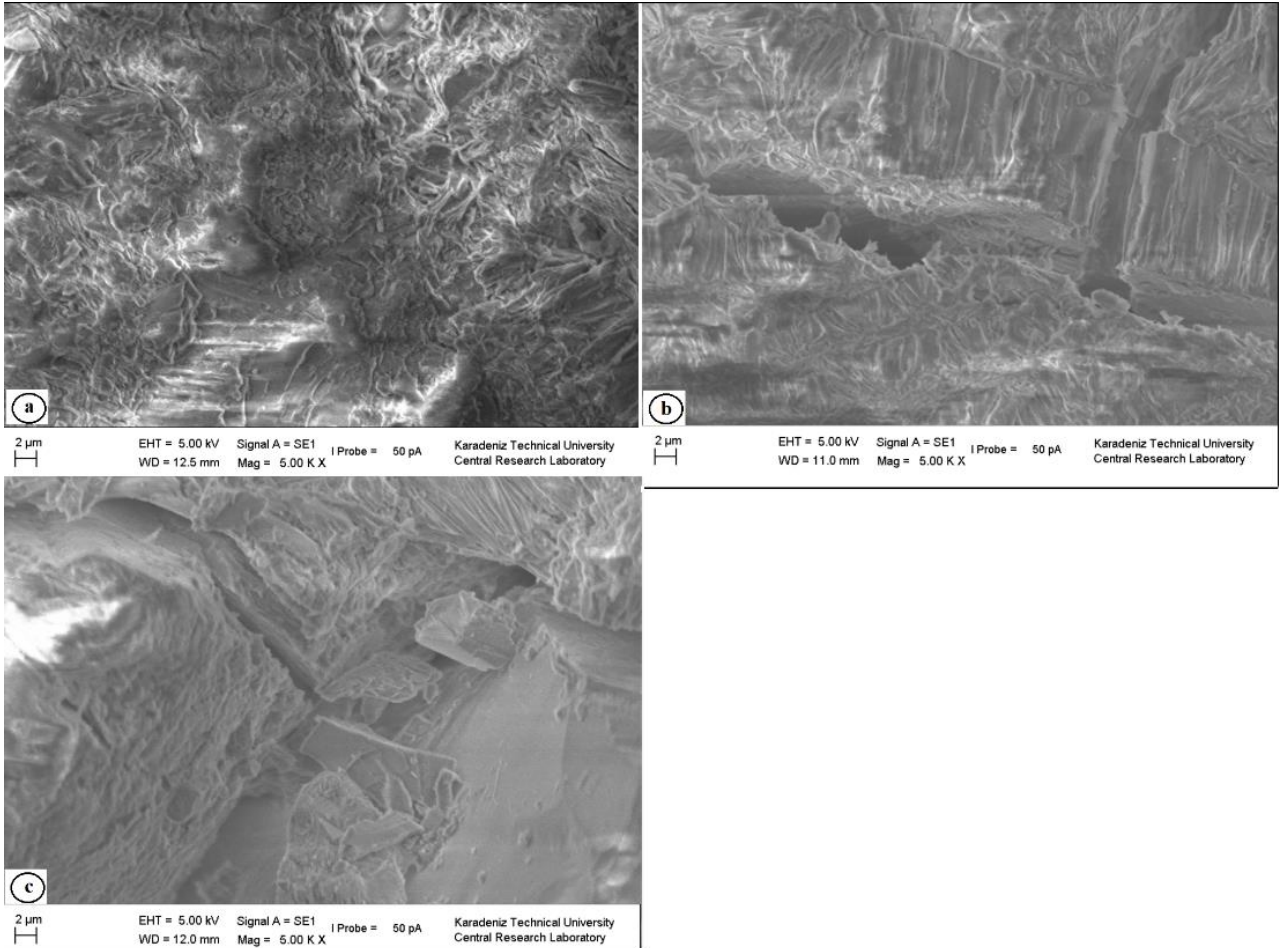


Şekil 4. Serpantinleşme oranı ve görünür porozite arasındaki ilişki, bütün örnekler (a), kuru ve doymun durum (b) (Relationship between degree of serpentinization and apparent porosity, all samples (a), dry and saturated state (b))



Şekil 5. Termal geçirgenlik ($\times 10^{-6}$) ile porozite (a) ve serpantinleşme oranı arasındaki ilişki (b) (Relationship between thermal diffusivity ($\times 10^{-6}$) with porosity (a) and rate of serpentinization (b))

Bazaltlara ait TEM (Taramalı Elektron Mikroskop) görüntüleri A1, M2 ve M3 için Şekil 6'da yer almaktadır. TEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizlerine göre mikro çatlaklar özellikle M2 ve M3 bazaltlarında yaygındır. A1 bazaltlarının dokusal özellikleri açısından daha sağlam olduğu ve yapısal kusurlardan diğerlerine göre daha uzak olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla TEM (Taramalı Elektron Mikroskop) analizleri ile A1'in ısı iletkenlik değerlerinin yüksek olması ve porozitesinin düşük olmasını sağlayan içsel yapısı ortaya çıkmıştır.



Şekil 6. Bazaltların TEM görüntüleri; A1 bazalt (a), M2 bazalt (b), M3 bazalt (c) SEM (Scanning Electron Microscope) images of basalts; A1 basalt (a), M2 basalt (b), M3 basalt (c))

Literatürde serpantinleşme oranı ile kayaçların bazı mühendislik parametreleri arasında ilişki kurulmuştur. Diamantis vd. (2016) serpantinleşme oranı % 3 ila % 92 arasında değişen kayaçlar kullanmışlar ve serpantinleşme oranı ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasında korelasyon analizleri yapmışlardır. Giannakopoulou vd. (2018) ofiyolit kompleksine ait, lerzolit, harzburjit ve dunit içeren peridotitlerdeki serpantin yüzdesi ile kaya dayanımı arasında orta derecede bir ilişki ($R^2=0.62$) bulmuşlardır. Bu çalışmada ise ısı iletkenlik değerleri ile serpantinleşme oranı arasında güçlü bir ilişki elde edilmiştir.

Aynı yaşa (Eosen) ait aynı litolojiye ait bazaltlardan elde edilen değerler oldukça farklıdır. Bunun nedeni ilk başta porozite değerlerindeki farklılık gibi görünmektedir. Ancak porozitenin farklı olmasına neden olan etkenlerden biri de şüphesiz farklı bölgedeki bazaltları etkileyen olivinlerin serpantinleşmesidir. Serpantinleşme kayaçların iç genişlemesine yol açmakta, meydana gelen basınç nedeniyle özellikle M2 ve M3 bazaltlarında mikro çatlakların geliştiği kanaatine varılmıştır. Aynı litolojiye sahip olmasına rağmen serpantinleşme derecelerinin oldukça farklı olmasının nedenleri ise sahada bulunan bazı jeolojik unsurlardır. Şekil 1b'de çalışma sahasına ait jeolojik harita incelendiğinde çalışma sahası yakın civarında bir volkan konisi ve 2 adet fay bulunmaktadır. Bunlar alterasyondan sorumlu başlıca jeolojik unsurlar olarak düşünülmüştür. M3 grubu bazaltlar volkan konisine en yakın (< 1 km) iken, A1 grubu bazaltlar en uzak (10 km) noktada bulunmaktadır. Ayrıca M3 bazaltlarına yakın mesafede orta boy bir fay mevcuttur. M2 grubu bazaltlar, fay konağına yakın ancak, M3 grubuna oranla volkan konisinden uzaktadır. A1 bazaltları ise her iki yapısal unsurdan (fay ve volkan konisi) daha uzakta yer almaktadır. Ayrıca stratigrafik olarak A3 grubu bazaltların en üstte bulunması, A2 grubu olanların M3'ün alt seviyesinde ve A1 bazaltlarının ise en alt konumda bulunması yüzeysel alterasyondan etkilenme durumlarını değiştirmektedir.

Görüldüğü gibi kayaçlar özellikle bazaltlarda serpantinleşmeden dolayı gözenekliliğin artması ısı depolamanın azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda bulunan ısı iletim katsayısı ve termal geçirgenlik değerleri, artan serpantinleşmeden dolayı azalma eğilimi göstermiştir. Buradan hareketle serpantinleşmeden doğan gözeneklilik hem ısı iletim katsayısı ile hem de ısı depolama ile doğrudan bağlantılıdır. A. Andreozzi vd. (2012) yaptıkları çalışmada porozite n (%) değeri 0.2 den 0.6 ya artarken ısı depolama değerinde düşme olduğu görülmüştür. Sunulan bu çalışmada da porozite n (%) değeri 0.65 ile 5.29 arasında artarken, kuru ısı iletim katsayısı $1.6260-0.4045$ ($Wm^{-1}K^{-1}$), Doygun ısı iletim katsayısı $1.5870-0.3685$ ($Wm^{-1}K^{-1}$) değerleri arasında azalma eğilimi göstermiştir. Bazaltlarda gözenekliliğin düşmesiyle ısı iletim katsayısının ve ısı depolamanın arttığı yapılan çalışma ile görülmüştür.

Kaya kaynaklı ısı depolama sistemleri su bazlı sistemlere göre çok daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. Örneğin; Konut uygulamalarında yaygın olarak algılanan ısı depolama malzemeleri için gerekli parametrelerden biri de termal iletkenlik katsayı değeridir. Söz konusu değer 0,3 $Wm^{-1}K^{-1}$ den yüksek olması durumunda iyi termal iletkenlik kapsamında değerlendirilebilmektedir (Yalçınkaya, 2022) . Bu çalışmada kullanılan bazaltlarda özellikle taze olanların ve serpantinleşme oranları düşük olanların termal iletkenlik katsayıları mühendislik uygulamaları açısından tatmin edici görünmektedir. Ancak kaya malzemelerin ısı depolama malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda sahanın büyüklüğüne bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri oldukça değişkenlik gösterecektir. ısı depolamak amacıyla kullanılan kayaçlar, ocağın büyüklüğüne bağlı olarak fay hattına ve volkan konisi gibi jeolojik yapılarla yakınlığına bağlı olarak alterasyona maruz kalabilmektedir. Dolayısıyla ısı depolama özelliği ile doğrudan ilişkili olan ısı iletkenlik katsayılarında düşüşler yaşanabilmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, kayaçların ısı iletkenlik, ısı geçirgenlik ve buna bağlı ısı depolama özelliklerinin incelenmesi açısından aynı sahanın farklı noktalarından alınan bazalt örnekleri kullanılmıştır. Mineralojik ince kesit analizleri, olivinin serpantinleşmesinin A1, M2 ve M3 bazaltları için sırasıyla ortalama % 8.25, % 24 ve % 75.5 olduğunu göstermiştir. Olivinlerdeki artan serpantinleşme oranı nedeniyle ısı iletkenlik katsayıları oldukça azalmıştır. Bu çalışmada bazaltların ısı iletkenlik, ısı geçirgenlik ile porozite ve serpantinleşme oranı arasında güçlü ilişkiler görülmüştür. Serpantinleşme kayaçların iç genişlemesine neden olacağından oluşan basınç nedeniyle özellikle M2 ve M3 bazaltlarında mikro çatlakların geliştiği dolayısıyla porozite değerlerini artırdığı düşünülmektedir. Bazaltlarda aynı sahadan alınsa bile birbirinden oldukça farklı serpantinleşme oranı görülmüştür. Özellikle M3 bazaltlarındaki serpantinleşmeye volkan konisi ile fay hattına yakınlık ve M3'ün stratigrafik olarak daha yüksek kotlarda bulunmasının neden olabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak ısı depolama malzemesi olarak kullanılan kayaçlara ait büyük ölçekli sahalarda ısı iletkenlik ve ısı geçirgenlik katsayılarındaki değişimler araştırılmalı ve varsa serpantinleşme gibi alterasyon ürünleri kontrol edilmelidir. Bu nedenle ısı depolama amacıyla kaya içinde yapılan mühendislik çalışmalarının düşük alterasyonlu bölgelerde yürütülmesi, ısı depolama, üretim ve ekonomi açısından bir kazanımdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, Prof. Dr. Mehmet Emin ARICIYA'ya, Prof. Dr Ahmet SARI'ya, Isı ölçümlerinde Arş. Gör. Serhat Berk AKÇAY, TEM analizlerindeki yardımları için Öğr. Gör. Ümit ÖZSANDIK'a teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Mesoella, P., Tamburrino, S., (2012). Numerical investigation on sensible thermal energy storage with porous media for high temperature solar systems. *Journal of Physics*, 395
- Benjamin Bouvry, B., Carrion, A.J.F., Banda, E.J.K., (2017). Mediterranean basin basalts as potential materials for thermal energy storage in concentrated solar plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 50-59.
- Okello, D., Fonng, C.W., Niydal, O.J., (2014). An experimental investigation on the combined use of phase change material and rock particles for high temperature (350 0C) heat storage. *Energy Conversion and Management*, 1-8.
- Yalçınkaya, D.Y., Günerhan, H., Hepbaşlı, A., Bayramian, H., (2022). Duyulur Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Enerji Yönünden İncelenmesi. *Engineer and Machinery*, 159-185.
- Dincer, I. (1999). Evaluation and selection of energy storage systems for solar thermal applications. *International Journal of Energy Research*, 1017-1028.
- Dincer, I. (2002). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*, 377-388.
- Furnas, C.C., (1930). Heat transfer from a gas stream to a bed of broken solids-II. *Industrial and Engineering Chemistry*, 721-731.
- Hasnain, S.M., Smiai, M., Al-Saedi, Y., Al-Khaldi, M., (1996). Energy Research Institute-Internal Report, KACST, Riyadh, Saudi Arabia.
- Liu, J., Chang, Z., Wang, L., Xu, J., Kuang, R., Z Wu, Z., (2020). Exploration of basalt glasses as high-temperature sensible heat storage materials. *ACS OMEGA*, 19236-19246.
- Park, J-W., Park, D., Choi, B-H., Park, E-S., (2014). Analysis on heat transfer and heat loss characteristics of rock cavern thermal energy storage. *Engineering Geology*, 142-156.
- Kozak, M., Kozak, Ş., (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *Mechanical Technology*, 17-29.
- Schumann, T., (1929). Heat Transfer. A liquid flowing through a porous prism. *Journal of the Franklin Institute*, 405-416.
- Nahhas, T., Py, X., (2019). Experimental investigation of basalt rocks as storage material for high-temperature concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226-235.
- Jemmala, Y., Zari, N., (2017). Experimental characterization of siliceous rocks to be used as filler materials for air-rock packed beds thermal energy storage systems in concentrated. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 33-42.