

Orijinal Makale/Research Article

Akdağmadeni (Yozgat) yeraltı kurşun-çinko işletmesinde kayaçların ısıl iletkenliğinin bazı fiziksel özelliklere bağlı olarak değişimi

Yavuz Selim DURUTÜRK¹, Gökhan EROL¹

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, 58140, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Isıl iletkenlik
Isı iletim katsayısı
Kayaçların fiziksel özellikleri

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 05.03.2021
Kabul Tarihi: 06.04.2021

Öz: Kayaçların ısıl iletkenlikleri çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada kayaçların ısıl iletkenliğinde etkili olan faktörlerin ayrıntılı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; kayaçlarda değişik koşullarda ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ısı iletim katsayısının kayaçların gözeneklilik, su emme katsayısı, yoğunluk, kılcal su emme katsayısı, ultrasonik hız ve sıcaklığa bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak; sıcaklık, görünür ve gerçek yoğunluk, su emme katsayısı, kılcal su emme katsayısı ve P-dalga hızı arttıkça ısı iletim katsayısı artmakta, gözeneklilik arttıkça azalmaktadır. Bütün numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletim katsayıları %5-%12 arasında değişen oranlarda artmıştır. Korelasyon katsayısının en yüksek (0,993, K2E) ve en düşük (0,853, K2B) değerleri nemli numunelerde elde edilmiştir. Kayaçların ısıl iletkenliği ile fiziksel özellikleri arasında kesin ilişkiler vardır ve bu ilişkilerde korelasyon katsayısı sıcaklık hariç 0,57-0,93 aralığında değişmektedir.

Atf için/To Cite:

Durutürk, Y.S., Erol, G., Akdağmadeni (Yozgat) yeraltı kurşun-çinko işletmesinde kayaçların ısıl iletkenliğinin bazı fiziksel özelliklere bağlı olarak değişimi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(1),1-13, 2021.

Variation of thermal conductivity of rocks depending on some physical properties in akdağmadeni (Yozgat) underground lead-zinc mine

Keywords

Thermal conductivity
Heat conduction coefficient
Physical properties of rocks

Article history:

Received: 05.03.2021
Accepted: 06.04.2021

Abstract: The thermal conductivity of rocks varies depending on various factors. In this study, it is aimed to examine the factors affecting the thermal conductivity of rocks in detail. For this purpose; thermal conductivity measurements were carried out in different conditions in rocks and changes in thermal conductivity coefficient depending on porosity, water absorption coefficient, density, capillary water absorption coefficient, ultrasonic velocity and temperature were investigated. As a result; as temperature, apparent and true density, water absorption coefficient, capillary water absorption coefficient and P-wave velocity increase, thermal conductivity coefficient increases and decrease with increasing porosity. In all samples, thermal conductivity coefficient increased between 5-12% depending on the temperature increase. The highest (0,993, K2E) and lowest (0,853, K2B) values of the correlation coefficient were obtained in moist samples. There are definite relationships between thermal conductivity and physical properties of rocks and the correlation coefficient in these relationships varies between 0,57-0,93 except temperature.

1. Giriş

İnsanlığın hammadde ve enerji talebinin hızla artması, bu talebi karşılamakla yükümlü bulunan madencilik sektöründe, açık işletme veya sığ yeraltı işletmeciliği ile

gerçekleştirilen üretim faaliyetlerinin artık daha derinlerde gerçekleştirilmesi zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir. Derin yeraltı maden işletmelerinde ise ısı, madencilik faaliyetlerini etkileyen ana problemlerden birini oluşturmaktadır. Bu

* İlgili yazar/Corresponding author: duruturk@cumhuriyet.edu.tr

kapsamda; tüm üretim faaliyetlerinde olduğu gibi madencilik faaliyetlerinde de özellikle son yıllarda meydana gelen vahim olaylar nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği kavramı daha da büyük önem kazanmıştır. Emniyetli ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve bunun devamlılığının sağlanması açısından günümüzde ve gelecekte karşı karşıya kalınabilecek sorunlara çözüm üretilmesi gerekmektedir. Yeryüzünden derinlere doğru gidildikçe artan sıcaklık nedeniyle yeraltında açılan boşluklar boyunca ilerleyen havanın sıcaklığı artmakta ve buna bağlı olarak emniyet koşulları kötüleşmektedir. Oluşan yüksek sıcaklık bir yandan insan vücudunda istenmeyen etkiler meydana getirmekte, diğer yandan sıcaklık ve rutubete bağlı olarak insan gücü verimliliğinde belirgin düşümlere sebep olmakta ve çeşitli hastalıklara yol açmaktadır. Daha da önemli olan husus; bu durumun, işçilerin canlılıklarının ve dikkatlerinin azalması nedeniyle kazaların artması sonucunu beraberinde getireceği gerçektir.

Yukarıda vurgulanan nedenler göz önüne alındığında, yeraltındaki değişik ısı kaynaklarından ocak havasına doğru akan ısı miktarının tespit edilmesi ve istenmeyen ısı fazlalığının ortamdaki uzaklaştırılması amacıyla gerekli tedbirlerin alınması, derin yeraltı maden işletmelerinde önemli madencilik faaliyetleri olarak ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, yeraltı ısı kaynakları içerisinde %35-48 arasında bir orana sahip olan kayaçlardan ocak boşluklarına doğru olan ısı transferi problemlerine çözüm getirilmesi zorunluluğu bulunmaktadır [1, 2]. En uygun çözüm yolu, ocak havasının soğutulması yeraltına gönderilmesi ve hatta çok daha derin işletmelerde yeraltında ara kademe soğutma ünitelerinin kurulmasıdır. Bu husus birçok araştırmacı tarafından farklı yaklaşımlarla ele alınmıştır. Problemin çözümü için gerçekleştirilecek çalışmalarda kullanılacak olan ve bilinmesi gereken en temel parametrelerden biri kayaçların ısı iletim katsayılarıdır.

Günümüzde artan nüfus, şehirleşme ve endüstrileşme sonucunda artan enerji gereksiniminin karşılanması bütün dünya için çözüm bekleyen bir sorun haline gelmiş, sürdürülebilir bir kalkınmanın ancak yeni ve yenilenebilir kaynakların etkin kullanımıyla gerçekleştirilebileceği gerçeği tüm dünya tarafından kabul edilmiş bulunmaktadır. Dünya enerji gereksiniminin %78'ini karşılayan fosil yakıtların tüketiminin olumsuz çevresel etkileri nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra toprak, yüzey, yeraltı ve havada doğal olarak bulunan ısı enerjisinin belirli dönemlerde depolanarak gerektiğinde kullanılabilen olanaklarının araştırılmasının gerekliliği açıktır. Nükleer enerji ise, son yıllarda artan enerji gereksinimini karşılamak adına bütün dünya ülkeleri için önemli bir konuma

sahip bulunmaktadır. Temmuz 2020 itibarıyla; dünyada 31 ülkede 440 nükleer reaktör işletmede, 19 ülkede 54 adet nükleer reaktör de inşa halindedir. Nükleer santrallerde üretilen elektrik dünya elektrik enerjisi talebinin %10'una denk gelmektedir [3]. Isı enerjisi ve nükleer atıkların depolanması olaylarının her ikisi de yeraltı kaya ortamları ile ilişkili olup bu kapsamda kaya ortamlarının özellikleri önem kazanmaktadır [4]. Gerek ısı enerjisinin gerekse nükleer enerji atıklarının (radyoaktif atıkların) depolanacağı alanlarda; hem depolama alanından çevreye olan ısı kaybının azaltılması hem de radyoaktif atıkların biyosferde oluşturacağı zararlı etkilerin önlenmesi açısından ısıl iletkenliği düşük olan kaya ortamlarının kullanılması, gereksinime göre uzun ve/veya kısa süreli ve güvenli bir depolamaya olanak sağlamaktadır. Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere; kayaçların ısı iletim katsayıları, kaya ortamlarının bu tür amaçlarla kullanımında en önemli parametrelerden biridir.

Kayaçların ısı iletim katsayısını etkileyen oldukça fazla sayıda değişken söz konusudur. Bu değişkenler; farklı araştırmacılar tarafından değişik şekillerde ifade edilmiştir. Robertson ve Peck, gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı değerinin azaldığını ve bu azalış oranının gözenekleri hava ile dolu olan numunelerde suya doygun numunelere kıyasla daha fazla olduğunu ifade etmiştir [5]. Desai vd.'ne ve Messmer'e göre, gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı değeri azalmaktadır [6, 7]. Kayaçların sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayılarının değişimi; şeffaflık, mineral bileşimi, mineral tane boyutları ve şekilleri, minerallerin dağılımı ve çatlak yapısına bağlıdır [8, 9]. Bu faktörlere bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki azalma normalden daha düşük olabileceği gibi sabit kalabilir veya artabilir [10]. Oda sıcaklığında ısı iletim katsayısı 2 W/mK'den daha az olan kayaçlarda sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısı artarken 2 W/mK'den daha fazla olan kayaçlarda ise katsayı azalmaktadır [11]. Aynı şekilde Kuriyagawa vd. sıcaklıkla ısıl iletkenlik değişiminin kayaç tipine bağlı olduğunu ifade ederek kayaçları; ısıl iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak artan (obsidyen), ısıl iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişmeyen (sabit kalan) ve ısıl iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak azalan kayaçlar (granit) olmak üzere 3 gruba ayırmışlardır [12]. Ayrıca; sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığı kayaçlara feldspat [13], azaldığı kayaçlara ise anortozit [13], obsidyen-şeyl [14] ve kumtaşı [15, 16] örnek olarak verilebilir. Brigaud ve Vasseur sedimanter kayaçların ısıl iletkenlikleri üzerinde mineraloji, porozite ve akış kontrolünün etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir [17]. Ashworth'a göre nem ısı iletim katsayısını yaklaşık olarak iki kat arttırmaktadır [18]. Durutürk; basınca bağlı olarak kayaçların ısı iletim katsayılarının arttığını, suya doygun numunelerin ısı iletim katsayısı değerlerinin, özellikle gözenekli

kayaçlarda, normal koşullardaki değerlere kıyasla daha yüksek olduğunu vurgulamıştır [19, 20]. Demirci vd.; kayaçların ısı iletim katsayısının gerek tek eksenli gerekse üç eksenli gerilmenin etkisine bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir [21]. Görgülü vd. ve Görgülü; kayaçların mineralojik ve petrografik özellikleri, tek eksenli basınç dayanımı, elastik modülü, kohezyonu, birim ağırlığı, sertliği, dolaylı çekme dayanımı, nokta yükü dayanımı, darbe dayanımı, nem oranı, gözenekliliği, eksenel ve üç eksenli gerilme altında bulunma durumu gibi oldukça fazla sayıda değişkenin kayaçların ısı iletim katsayısı üzerinde etken olduğunu ifade etmişlerdir [22, 23]. Giraud vd.'ne göre; anizotropi, gözeneklilik ve mikro çatlak yapısı ısı iletim katsayısı üzerinde etkili olan parametrelerdir [24]. Görgülü vd., kayaçların ısı iletim katsayısının eksenel gerilmelere ve nem içeriğine bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir [25]. Sundberg vd.; ısı iletim katsayısının kayacın mineral bileşimi ve dokusal koşullarına bağlı olarak değiştiğini, su içeriği ve gözenekliliğinin de önemli olduğunu vurgulamışlardır [26]. Abdulagatova vd.; ortamın sıcaklığının ve basıncının, kayaçların mineralojik bileşiminin ve mineral dağılımının, matris yapısının, tabakalaşmanın, mikro çatlak yapısının, tane boyutu ve şeklinin, porozite, gözeneklilik ve su içeriğinin kayaç malzemelerinin ısı özelliklerini belirleyen faktörler olduğunu ifade etmişlerdir. Kumtaşının ısı iletim katsayısı basınca bağlı olarak artmakta ve sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır [27]. Cho vd.; gözenekliliğinin ve su içeriğinin ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerine yönelik yaptıkları araştırmada, kayaç gözeneklerinde bulunan hava ve suyun ısı iletkenlikleri arasında var olan önemli farklılığın yansımalarının bir sonucu olarak, suya doymun numunelerin kuru numunelerden daha büyük ısı iletkenlik değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir [28]. Zhao vd.'ne göre; sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısında lineer olmayan bir artış, 10 Pa'a kadar olan basınç değerlerinde çok az ve 1×10^2 Pa- 5×10^3 Pa aralığındaki değerlerde hızlı bir artış söz konusudur. 5×10^4 Pa'nın üzerindeki değerlerde ise ısı iletim katsayısı kısmen sabit kalmaktadır [29]. Abdulagatova vd.; düşük basınç değerlerinde (0,1-100 MPa) yağa doymun kumtaşının ısı iletim katsayısında keskin bir artış, yüksek basınçlarda ($P > 100$ MPa) ise zayıf bir doğrusal bağımlılık gözlemlemişlerdir. Basıncın etkisi 100 MPa basınç değerinden sonra ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Yağa doymun kumtaşının ısı iletkenliği, sıcaklıkla birlikte kuru kumtaşı için olan orandan yaklaşık olarak %20 daha az bir oranda azalmaktadır [30]. Osako vd.; serpantinin ısı özelliklerinde basınç ve sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişimi belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, 5 GPa basınç ve 300 K ve 800 K sıcaklık değerlerinde serpantinin ısı kapasitesini belirlemişlerdir. Serpantinin ısı kapasitesinin basınçtan bağımsız ancak sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [31]. Kukkonen ve Lindberg; ısı iletim

katsayısının kuvars içeriğindeki artışa bağlı olarak arttığını, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesinin artışına bağlı olarak azaldığını ve ölçüm ve tabakalanma yönü arasındaki açının artışına bağlı olarak ise azaldığını ifade etmişlerdir. En düşük ısı iletkenlik tabakalanmaya dik yönde (ortalama 2,4 W/mK) ve en yüksek ise tabakalanma boyunca (ortalama 3,4 W/mK) ölçülmüştür [29]. Kwon vd.'ne göre, kuru numunelerin ısı iletim katsayısı derinliğe bağlı olarak artmaktadır [32, 33]. Kim vd.; ısı iletim katsayısının elastisite modülü ve P-dalga hızı arttıkça arttığını belirlemişlerdir [34]. Merriman vd., ısı iletim katsayısının litolojiye bağımlılığının zayıf olduğu sonucuna ulaşmışlardır [35]. Barry-Macaulay vd.; zemin ve kayaçların ısı iletkenliklerinin yoğunluk, nem içeriği, doyma derecesi, mineralojik kompozisyon, tane büyüklüğü ve anizotropi gibi faktörlerin etkisi altında olduğunu ifade etmişler ve yoğunluk, doyma derecesi, kuvars içeriği ve tabakalanma yönündeki artışa bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığını belirlemişlerdir [36]. Eppelbaum vd.; ısı iletim katsayısının materyalin kimyasal bileşimine, fiziksel yapısına, su içeriğine ve sıcaklığına göre değişim gösterdiğini ifade etmişlerdir [37]. Nagaraju ve Roy, etkili gözeneklilikleri %1'den büyük olan kayaçların kuru duruma kıyasla suya doymun koşullarda genellikle daha yüksek ısı iletkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir [38]. Pasquale vd.; kayaçların ısı iletim katsayısının yoğunluk artışı ile siyalitik kayaçlar için azaldığını, ultrabazik kayaçlar için arttığını ve gözeneklilik artışına bağlı olarak ise azaldığını ifade etmişlerdir [39].

2. Malzeme ve Yöntem

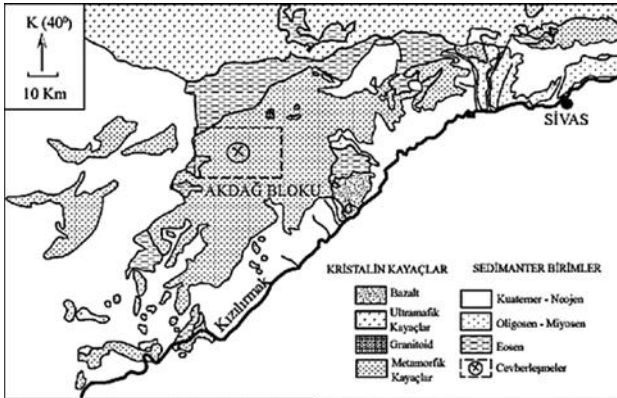
2.1. Çalışma alanının konumu ve jeolojisi

Çalışma alanı Yozgat İli Akdağmadeni İlçesi'nin kuzeydoğusunda ilçe merkezine 13 km uzaklıkta bulunan Rasih ve İhsan Yeraltı Kurşun-Çinko İşletmesi'dir. İşletmenin yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Akdağmadeni yer bulduru haritası.

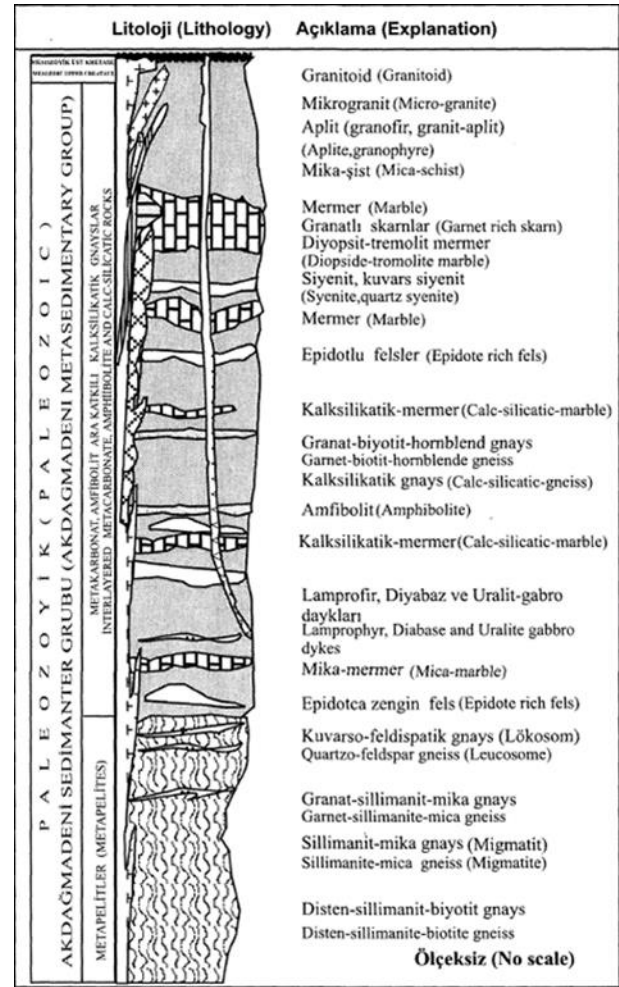
Yeraltı maden işletmesinin de içinde bulunduğu çalışma alanında yer alan litolojik birimler metamorfik ve magmatik kayaçlardan oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda; bu tür kayaçlarda yer alan cevherleşmelerin bölgede yer alan granitlerle ilişkili olarak, skarn tipinde oldukları belirtilmiştir. Çolakoğlu vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda ise; Akdağmadeni Pb-Zn yatağının jeolojik, petrografik, mineralojik ve yapı-doku özellikleri açısından hem skarn hem de metamorfik yataklara özgü özellikler gösterdikleri belirlenmiştir. Cevherleşmelerin bugüne kadar kabul edildiği gibi sadece granitlerin varlığıyla açıklanabilecek basit bir skarn yatağı olmadığı hem bölgesel hem de kontakt metamorfik özelliklerin ve/veya etkilerinin bir arada gözlemlendiği kompleks bir yatak olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Metamorfik kayaçlar, tabanda metapelitik kayaçların saf türleriyle temsil edilmekte ve üstlerinde metakarbonat ve amfibolit ara katlı kalsilikatik gnayslar yer almaktadır. Bu kayaçlar tabandan tavana uyumlu bir dizilim göstermektedirler. Granitlerin direk olarak mermerlerle olan bağlantı kesimleri skarn zonları olarak tanımlanırken sondajlarda farklı seviyelerde, kalsilikatik gnays ve kalsilikatik mermerlerle geçişli ve yer yer aralanmalı epidot, klinopiroksen, tremolit, kuvars, kalsit ± granat içeren minerallerin görüldüğü yönlenme göstermeyen kayaçlar ise fels olarak adlandırılmıştır [40]. Çalışma alanının da içinde bulunduğu bölgeyi içeren Akdağmadeni genel jeoloji haritası Şekil 2'de ve genelleştirilmiş dikme kesiti ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Akdağmadeni genel jeoloji haritası [41].

2.2. Numunelerin hazırlanması

Yeraltı işletmesinde; yüzeyden itibaren 157 m derinlikte ve 1615 kotundaki K2 Panosunda 2 (K2B/K2E), 185 m derinlikte (1590 Anayol) ve 215 m derinlikte (1560 Anayol) birer ölçüm noktası olmak üzere 3 farklı derinlikte ve farklı kayaç türlerinde 4 ölçüm noktası belirlenmiştir (Tablo 1).



Şekil 3. Akdağmadeni genelleştirilmiş dikme kesiti [40].

Tablo 1. Çalışma bölgelerinin özellikleri.

Ölçüm Bölgelerinin			
Adı	Kotu	Yüzeyden itibaren derinliği (m)	
K2B	(K2 Panosu)	1615	157
K2E	(K2 Panosu)	1615	157
1590	Anayol	1590	185
1560	Anayol	1560	215

Tablo 1'de verilen ölçüm bölgelerinden alınan örneklerden kimyasal ve mineralojik analiz, ısı iletim katsayısı, yoğunluk, su emme, kılcal su emme ve ultrasonik hız deneyleri için uygun numuneler hazırlanmıştır. Kimyasal analiz için numuneler toz haline getirilmiş, mineralojik analiz için örneklerden ince kesitler alınmıştır. Kılcal su emme katsayısı tayini için 5x5x5 cm ölçülerinde 6 adet kayaç numunesi ve ultrasonik hız deneyleri için ise 5x5 cm'lik 24 adet karot numunesi hazırlanmıştır.

Isı iletim katsayısı ölçümü için karotiyer cihazı ile alınan 50,8 mm (2 inç) çapındaki silindirik numuneler, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan kontak direnç etkisi nedeniyle oluşabilecek ısı iletimlik farklarının ortaya

çıkması veya mümkün olduğu kadar azaltılabilmesi için yüzey düzeltme cihazı aracılığıyla düzeltme işlemlerinden geçirildikten sonra boyutlandırılmışlardır. Kayaç numunesinde yataklanmaya paralel ve dik olarak gerçekleştirilen ısı iletim katsayısı ölçümlerinden elde edilen değerler arasında %5 fark olabileceği ve ısı iletim katsayısını etkileyen asıl önemli parametrenin kayaç içindeki kil tabakalanmaları olduğu hususları silindirik karot numunelerinin düzeltme ve boyutlandırma işlemlerinde dikkate alınmıştır [42-44]. Sonuç olarak numuneler; yataklanmaya paralel, yaklaşık 1 cm kalınlığında ve 50,8 mm çapındadır. Şekil 4'de ısı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler görülmektedir.



Şekil 4. Isı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler.

2.3. Yöntem

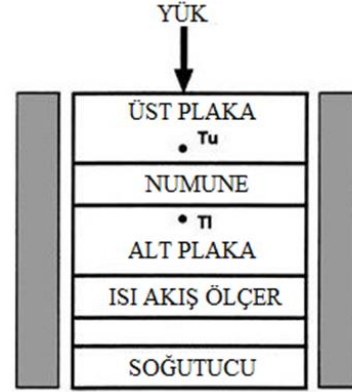
Yeraltında ilgili ölçüm noktalarından alınan örnekler üzerinde ASTM ve/veya TSE standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler ve ilgili standartlar aşağıda tablo halinde verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Laboratuvar deneyleri ve ilgili standartlar.

Deney Adı	Standart
Isı iletim katsayısı	ASTM E1530-11
Yoğunluk ve gözeneklilik	ASTM D 5550-06 ve TS EN 1936
Su emme	TS EN 13755
Kılcal su emme	TS EN 1925
Ultrasonik hız	ASTM C597

Kayaçların ısı iletim katsayısını ölçmek için muhafazalı ısı akış ölçme yöntemini kullanan bir cihaz kullanılmıştır. Muhafazalı ısı akış ölçer yönteminde ısı miktarını ölçmek için bir ısı akış ölçeri kullanılmakta olup ısı iletimlik ölçümü ASTM E1530-11 standardına göre yapılmaktadır. Yöntem karşılaştırmalı kesme çubuk yöntemine (bölünmüş bar) oldukça benzerdir. Uygulamada referans numune çok düşük ısı iletimliğe

sahip olduğundan dolayı numune çok ince olabilir. Test edilen malzemeye ait küçük bir örnek; her biri farklı sıcaklıkta kontrol edilen iki parlak metal yüzey arasında, bir basınç yükü altında tutulur (Şekil 5). En alt yüzey, kalibre edilmiş bir ısı akış dönüştürücüsünün (transducer) bir parçasıdır. Isı; numunenin en üst yüzeyinden en alt yüzeyine doğru akarken, yığına bir sıcaklık gradyanı tesis olur. Isıl dengeye ulaşıldıktan sonra, ısı akış dönüştürücüsünden çıkan ısı ile birlikte numunenin her iki yüzeyi arasında (alt ve üst) oluşan sıcaklık farkının ölçülmesi suretiyle kalınlığı bilinen bir numunenin ısı iletimliği hesaplanabilir.



Şekil 5. Muhafazalı ısı akış ölçer düzeneği [45].

Genellikle referans plakanın iki yanı arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olan bir elektrik sinyalinin elde edilebilmesi amacıyla, diferansiyel olarak irtibatlandırılmış çok sayıda termokupl çiftleri referans plakanın her iki yanına yerleştirilmiştir. Numunenin her iki tarafındaki yüksek iletkenliğe sahip metal yüzey tabakalarındaki bu sıcaklık sensörleri aracılığıyla numune boyunca oluşan sıcaklık düşüşü ölçülür. Kontak direnç, test yığına tekrarlanabilir, pnömomatik bir yük uygulanması aracılığıyla ve eğer gerekirse ısı iletim bir ara yüz bileşiği kullanmak suretiyle küçük değerlerde muhafaza edilebilir.

Benzer şekilde; ısı akış ölçerler, malzemenin ısı iletimliğine bağlı olarak hemen hemen her malzemenin (ince veya kalın) imal edilebilirler. Bütün akış ölçerler için ortak gereksinim, ölçme bölgesi için ısı döngüden etkilenmeyen kararlı bir malzemenin kullanılması ve ölçüm aletinin bağımsız olarak diğer bazı yöntemler aracılığıyla kalibre edilebilir olması gerektiği hususlarıdır.

Numunenin köşeleri boyunca akan ısı ölçümlerde bir hataya neden olabilir. Bu etkiyi azaltmak için, muhafazalı sıcak bir bölüm, test yığınına çevreler. Sadece oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde muhafazalı sıcak bir bölüme gereksinim yoktur.

Örnek numunenin ısı iletim katsayısı aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$R_s = \frac{N(T_1 - T_2)}{Q} - R_0 \quad (1)$$

$$C_s = \frac{1}{R_s} \quad (2)$$

Homojen malzemeler için:

$$R_s = \frac{\Delta x}{k} \quad (3)$$

Q : Isı miktarı (W)

Δx : Numunenin kalınlığı (mm)

N : Isı akış dönüştürücüsü kalibrasyon sabiti (W/m²mV)

k : Isı iletim katsayısı (W/mK)

C_s : Örnek numunenin ısı geçirgenlik katsayısı (W/m²K)

R_s : Isıl direnç (m²K/W)

R₀ : Temas yüzeylerindeki kontak direnç

T₁ : Numunenin yüzey sıcaklığı (°C)

T₂ : Numunenin diğer yüzey sıcaklığı (°C)

3. Laboratuvar Deney Sonuçları

3.1. Kimyasal ve mineralojik analiz

Toz haline getirilen numuneler kimyasal analize, örneklerden alınan ince kesitler ise mineralojik analize tabi tutulmuşlardır. Bölgeler bazında mineralojik analiz sonuçları Tablo 3'de, kimyasal analiz sonuçları Tablo 4'de ve ince kesit görünümüne ise Şekil 6'da verilmiştir.

3.2. Isı iletim katsayısı

Isı iletim katsayısı ölçümü için; yataklanmaya paralel, yaklaşık 1 cm kalınlığında ve 50,8 mm çapında hazırlanan numuneler kotlara göre sınıflandırılmıştır. Her bir kotu temsilen 5 ve toplamda 20 farklı numune üzerinde, her bir numune için 8 farklı sıcaklık

noktasından ölçüm alınmak suretiyle toplam 160 ölçüm verisi elde edilmiştir. Bu işlem; numunelerin kuru ve suya doymun haldeki ve ortam koşullarındaki (%30-50 nemli) ısı iletim katsayılarının belirlenebilmesi için 3 grup halinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ortam koşullarında deneyler yapılmış, bu gruba ait deneylerin tamamlanmasından sonra numuneler 70°C sıcaklığındaki etüvde 24 saat bekletilerek kuru hale getirilmişler ve 2. grup deneyler gerçekleştirilerek kuru haldeki ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Son aşamada ise numuneler 24 saat su içerisinde bekletilerek suya doymun hale getirilmiş ve suya doymun haldeki ısı iletim katsayıları ölçülmüştür. Isı iletim katsayısı tayini için laboratuvarında mevcut olan ve birçok araştırma ve proje çalışmalarında kullanılmış olan Unitherm 2022 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 7). Cihaz ile yaklaşık 5 cm çapında ve minimum 3 mm kalınlığında (-) 20 °C - (+) 300 °C sıcaklık aralığında ve ASTM 1530'da verilen muhafazalı ısı akış ölçer yöntemi aracılığıyla bütün malzemelerin ısı iletim katsayılarının ölçümü yapılabilmektedir. Cihaz, ölçüm sırasında numune üzerine 60 psi'ye kadar bir basınç uygulayabilir. Ancak üretici tarafından önerildiği şekliyle numune üzerine 25 psi (0,172 MPa) basınç uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kuru ve suya doymun haldeki ve ortam koşullarındaki ısı iletim katsayısı değerleri Tablo 5'de verilmiştir.

3.3. Yoğunluk

Kayaçlarda gerçek (ρ_r) ve görünür yoğunluk (ρ_b) olmak üzere iki tür yoğunluk kavramı söz konusudur. Gerçek yoğunlukta açık (ρ_0) ve kapalı gözenekliliğinin toplamı olan toplam porozite (ρ) değeri göz önüne alınırken görünür yoğunlukta toplam porozite hesaplamalarda dikkate alınmamaktadır. Söz konusu deneyler ASTM D 5550 ve TS EN 1936 standartlarına göre yapılmış olup sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 3. Mineralojik analiz sonuçları.

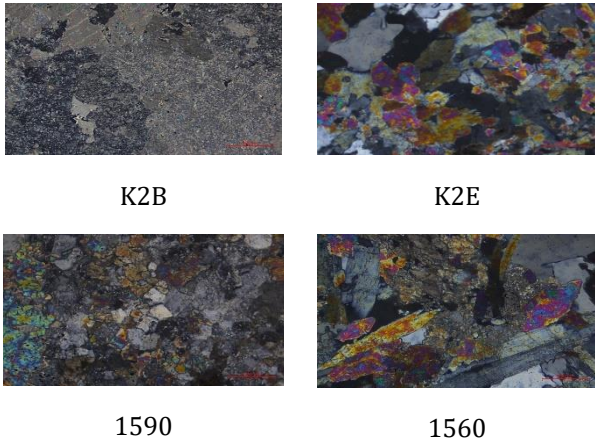
Çalışma Bölgesi	Mineralojik Adı	Kayaç Dokusu	Mineral Bileşimi
K2B	Mermer	Granoblastik doku	Kalsit, Dolomit ve eser miktarda Amfibol grubu mineraller
K2E	Kalksilikatik Gnays	Granoblastik doku	Epidot, Kalsit, Feldspat ve Piroksen olup mineral kompozisyonu %60 Epidot ağırlıklıdır.
1590	Kalksilikatik Gnays	Granoblastik doku	Feldspat, Epidot, Titanit (Sfen), Silimanit, Piroksen ve Kalsit olup kayaçta killeşme ve %10-15 arasında Epidot minerali gözlenmiştir.
1560	Kalksilikatik Gnays	Granoblastik doku	Epidot, Kuvars, Kalsit, Feldspat, Piroksen ve Opak mineralleri olup ağırlıkça %50-60 oranında Epidot ve %15 civarında Kuvars'tır.

Tablo 4. Kimyasal analiz sonuçları.

	K2B	K2E	1590	1560
Na ₂ O	0,0429	0,367	1,34	0,0587
MgO	9,2	3,23	5,04	5,75
Al ₂ O ₃	0,413	9,27	11,11	10,44
SiO ₂	11,83	61,63	54,96	45,52
CaO	40,67	12,59	14,08	20,67
Fe ₂ O ₃	1,34	6,17	5,85	12,87
K ₂ O	0,0549	2,18	3,31	0,0198
TiO ₂	0,0213	0,662	0,952	0,935
MnO	0,212	0,532	0,444	0,946
P ₂ O ₅	0,029	0,16	0,219	0,204
Toplam	63,8131	96,791	97,305	97,4135



Şekil 7. Anter Unitherm 2022 model muhafazalı ısı akış ölçer cihazı.



Şekil 6. Numunelerin ince kesit görüntüleri.

Tablo 5. Suya doymun, nemli ve kuru numunelerin laboratuvarında ısı iletim katsayısı ölçüm sonuçları (W/mK).

		28°C	38°C	48°C	58°C	68°C	78°C	88°C
K2B	Suya doymun	1,934	1,958	1,992	1,981	2,059	2,049	2,072
	Nemli	1,890	1,882	1,924	1,928	2,012	1,982	2,014
	Kuru	1,769	1,772	1,802	1,813	1,873	1,866	1,900
K2E	Suya doymun	2,115	2,147	2,197	2,205	2,254	2,286	2,281
	Nemli	2,002	2,018	2,063	2,100	2,138	2,167	2,198
	Kuru	1,861	1,900	1,937	1,973	2,030	2,050	2,065
1590	Suya doymun	1,845	1,856	1,904	1,892	1,962	1,949	1,971
	Nemli	1,801	1,803	1,846	1,839	1,900	1,891	1,903
	Kuru	1,701	1,696	1,765	1,763	1,801	1,792	1,825
1560	Suya doymun	1,885	1,902	1,922	1,951	1,968	2,020	2,075
	Nemli	1,832	1,838	1,854	1,867	1,887	1,921	1,963
	Kuru	1,764	1,766	1,798	1,801	1,829	1,855	1,870

Tablo 6. Yoğunluk ve gözeneklilik sonuçları.

Numune	Görünür Yoğunluk (gr/cm ³)	Gerçek Yoğunluk (gr/cm ³)	Açık Gözeneklilik (%)	Toplam Gözeneklilik (%)
K2B	2,80	2,83	0,23	0,84
K2E	3,03	3,18	0,55	4,88
1590	2,97	3,03	0,66	1,93
1560	2,98	3,17	0,69	5,97

3.4. Su emme katsayısı

Kayaçlarda su emme katsayısı kayaç türüne, açık gözenekliliğe ve çatlak yapısına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle sedimanter kayaçlarda su emme katsayısı metamorfik ve magmatik kayaçlara göre oldukça yüksektir. Çalışma bölgesindeki numuneler üzerinde TS EN 13755 standartına uygun olarak yapılan su emme katsayısı deney sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Su emme katsayısı sonuçları.

Numune	Su emme katsayısı (%)
K2B	0,07
K2E	0,24
1590	0,29
1560	0,26

3.5. Kılcal su emme katsayısı

Seçilen 5x5x5 cm uzunluğundaki 6 kayaç numunesi ilk önce yıkanır, 70 °C'lik etüvde 24 saat kurumaya bırakılır. Birbirini izleyen 24 saat aralıklarda kütle tartımları yapılır ve ağırlığın %1'i aşmadığı durumda numune sabit kütleye (Md) gelmiş kabul edilir. Daha sonra numune alt yüzeyinden itibaren 3 mm yükseklikte suya daldırılır. Kayaçların su emmiş kütleleri (Mi); 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 ve 4320 dakika ara ile tartılır. Bu süreler % 5 yaklaşımla ölçülür. Minimum 7 ölçüm gereklidir. Ardışık iki tartım arasındaki fark, numunenin emdiği su kütlesinin %1'inden az ise deneyin sona erdiği kabul edilir. Deneyin amacı bu sürelerle bağlı olarak kayacın emdiği su miktarından kayacın içindeki mikro çatlak yapısını tayin edebilmektir. Elde edilen sonuçlarda değerler ne kadar büyük ise kılcal çatlak yapısı o kadar fazladır. Çalışma bölgesindeki numuneler üzerinde TS EN 1925 standardına uygun olarak yapılan su emme katsayısı deney sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Kılcal su emme katsayıları.

Numune No	1590	1560	K2E	K2B
K _{cs} Katsayısı	0,69	0,66	0,56	0,23

3.6. Ultrasonik hız deneyi

Akustığın bir kolu olan ultrasonik, insan kulağının işitemeyeceği kadar yüksek frekanslı (>20 Khz) ses dalgaları olarak tanımlanmaktadır. Ultrasonik P

(boyuna) ve S (enine) dalga hızları, ölçümü yapılan numunenin yoğunluğuna ve dokusal özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Ultrasonik hızlar homojen ve heterojen malzemelerde farklılık gösterir [46]. Kayaçlarda ultrasonik hız değerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan önemli olanları; kayacın tipi, dokusu, tane boyutu ve şekli, gözenekliliği, yoğunluğu, su içeriği, sıcaklığı ve anizotropisidir. Anizotropik kayaçlarda dalga hızı; dalganın yönü, geçiş mesafesi ve jeofonların çapları gibi faktörlerle etkilenebilmektedir. Bunların dışında ayrışma ve alterasyon zonları, eklem özellikleri (su, dolgu malzemesi, pürüzlülük, doğrultu, eğim vb.) gibi faktörler ultrasonik hız değerini etkileyen önemli parametrelerdir.

Ultrasonik hız deneyleri 5x5 cm'lik 24 adet karot numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik test cihazı ve ölçümde kullanılan numuneler Şekil 8'de ve ASTM C597 standardına uygun olarak yapılan deney sonuçları Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Ultrasonik test cihazı ve ölçümde kullanılan numuneler.

Tablo 9. P ve S dalga hızları.

Numune	V _p (m/s)	V _s (m/s)
K2B	6720	6493
K2E	7069	6846
1590	6878	6341
1560	6962	6764

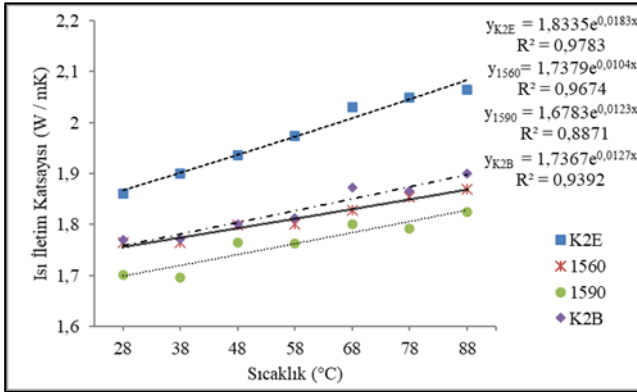
4. Sonuçların Değerlendirilmesi

K2B, K2E, 1590 ve 1560 çalışma bölgelerinden alınan numuneler üzerinde laboratuvarında gerçekleştirilen ısı iletkenlik ölçümlerinden, mineralojik ve kimyasal analizlerden ve yoğunluk ve gözeneklilik, su emme, kılcal su emme ve ultrasonik hız deneylerinden elde edilen sonuçların ısı iletim katsayısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir. 70°C sıcaklığındaki etüvde 24 saat bekletilen numuneler kuru durumu, sıcaklığı 24-30°C ve nem oranı %30-50 olan ortam şartlarında bekletilen numuneler nemli

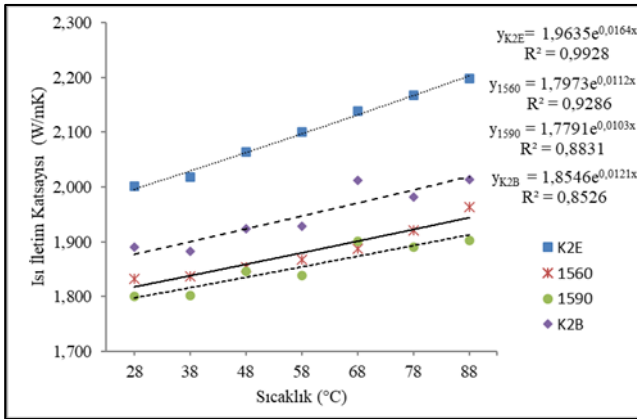
durumu ve 24 saat su içinde bekletilerek suya doymun hale getirilen numuneler ise suya doymun durumu tanımlamaktadır. Yoğunluk ve gözeneklilik, su emme, kılcal su emme ve ultrasonik hız için verilen ilişkilerde 60°C sıcaklıktaki ısı iletim katsayısı değerleri baz alınmıştır.

4.1. Sıcaklık

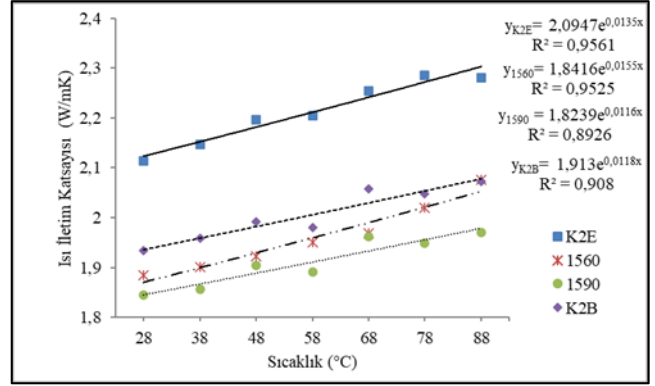
Kayaçların ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimini görebilmek amacı ile kuru, nemli ve suya doymun haldeki numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deney sonuçları, kayaçların ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak arttığını göstermektedir (Şekil 9-11).



Şekil 9. Sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi (Kuru).



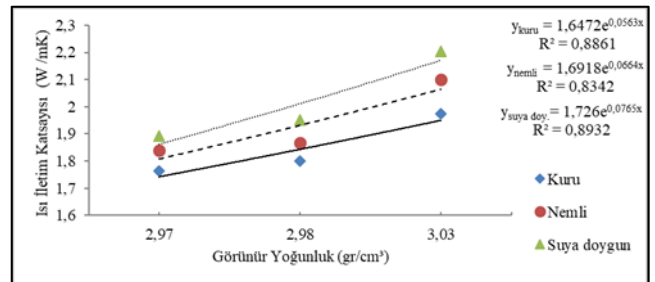
Şekil 10. Sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi (%30-50 nemli).



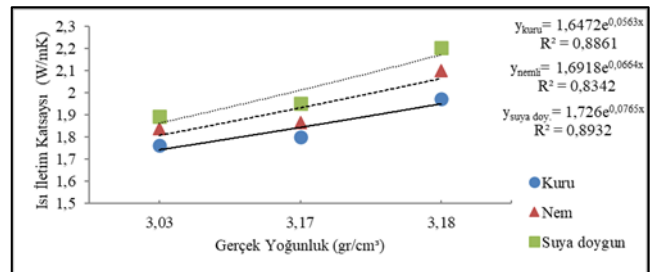
Şekil 11. Sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi (Suya doymun).

4.2. Yoğunluk ve gözeneklilik

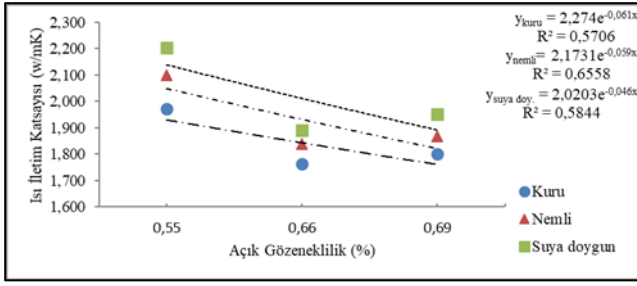
Isı iletimi mekanizmasında fiziksel özellikler kadar mineralojik özellikler de önemlidir. Bu nedenle değerlendirme yapılırken K2B numunesinin mineralojik yapısı diğer numunelerden farklı olduğu için değerlendirmeye alınmamış, değerlendirmeler mineralojik yapı açısından benzer özellikler gösteren K2E, 1590 ve 1560 numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). Yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi aracılığıyla elde edilen görünür yoğunluk, gerçek yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri, laboratuvarında kuru, nemli ve suya doymun numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda grafikler halinde verilmiştir (Şekil 12-14).



Şekil 12. Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi.



Şekil 13. Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi.

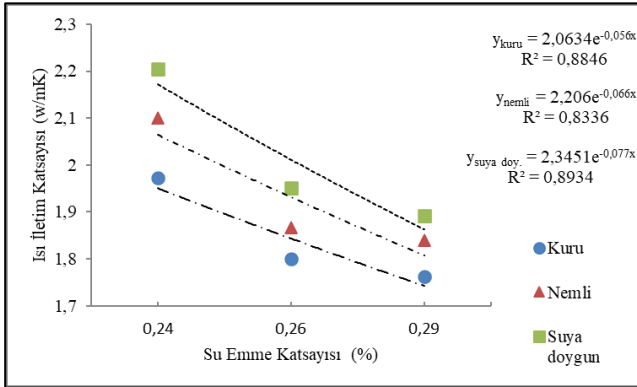


Şekil 14. Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi.

Grafiklerden de görüleceği üzere; görünür yoğunluk ve gerçek yoğunluk değerleri arttıkça ısı iletim katsayısı artmakta açık gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.

4.3. Su emme

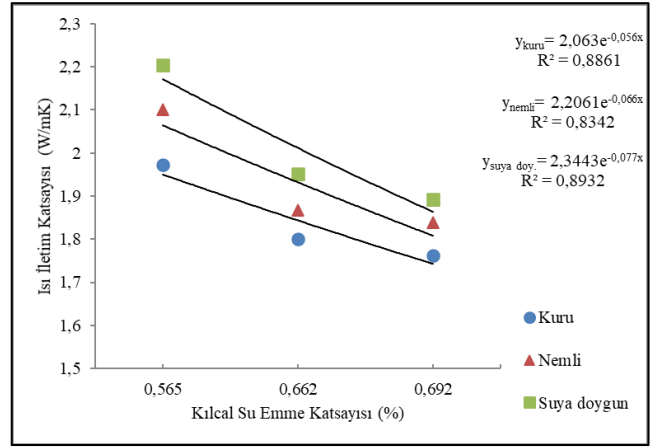
K2E, 1590 ve 1560 bölgelerinden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen su emme katsayısı belirleme deneylerinden elde edilen verilerin ısı iletim katsayısı değerleri ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen ilişki Şekil 15'de verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere su emme katsayısı arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.



Şekil 15. Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi.

4.4. Kılcal su emme

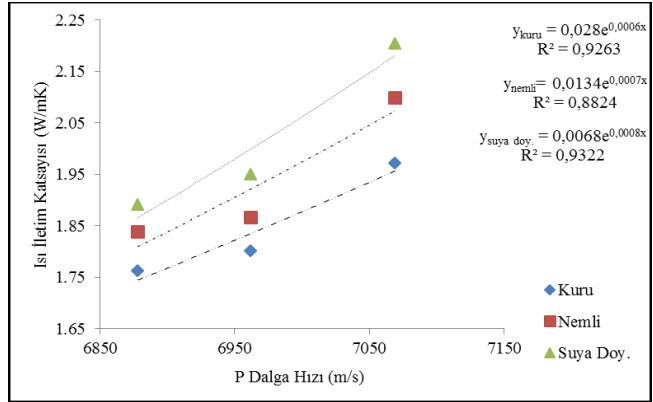
Kılcal su emme katsayısı numunede çatlak yapısının ne kadar hakim olduğunun bir göstergesi olup çatlaklı numunelerde kılcal su emme katsayısı çok daha yüksek değerlerdedir. TS EN 1925 standardına göre K2E, 1590 ve 1560 çalışma bölgelerinden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kılcal su emme katsayıları ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki Şekil 16'da verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere kılcal su emme katsayısı arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.



Şekil 16. Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi.

4.5. P Dalga Hızı

Ultrasonik hız deneyleri sonucu elde edilen P-dalga hızları ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki Şekil 17'de verilmiş olup P-dalga hızı arttıkça ısı iletim katsayısı da artmaktadır.



Şekil 17. P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi.

5. Sonuçlar

Kayaçların ısı iletim katsayısını etkileyen oldukça fazla sayıda değişkenin varlığından söz edilebilir. Bu faktörler; kayaçların cinsi, mineral bileşimi, mineral dağılımı, kuvars içeriği, matris yapısı, dokusal koşulları, tabakalaşma, mikro çatlak yapısı, tane boyutu ve şekli, kohezyon, sertlik, derinlik ve basınç, ortam sıcaklığı ve nem oranı, dolaylı çekme dayanımı, darbe dayanımı, nokta yükü dayanımı, kimyasal bileşimi, yoğunluk, birim ağırlık, gözeneklilik, su içeriği, nem içeriği, doyma derecesi, özgül ısı kapasitesi, sıcaklık, P-dalga hızı, anizotropi, elastisite modülü, tek eksenli ve üç eksenli gerilme durumudur.

Kayaçların görünür ve gerçek yoğunluğu, su emme katsayısı, kılcal su emme katsayısı, P-dalga hızı değerleri ve sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayısı artmakta, gözeneklilik arttıkça azalmaktadır.

Kuru, nemli (%30-50) ve suya doymun numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deney sonuçları kayaçların ısı iletim katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak arttığını göstermiştir. Bütün numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletim katsayıları %5-%12 arasında değişen oranlarda artmıştır. Korelasyon katsayısının en yüksek (0,993, K2E) ve en düşük (0,853, K2B) değerleri nemli numunelerde elde edilmiştir. Çalışma bölgesini temsil eden Kalksilikatik Gnayslar ve Kalsit, Dolomit ve Amfibol grubu minerallerden oluşan granoblastik dokuya sahip Mermer sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığı kayaçlar grubunda değerlendirilebilir.

Yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi literatürde farklılıklar arz etmekte olup bu çalışmada yoğunluk artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Gözeneklilik açısından ise diğer çalışmalarla tam bir uyum söz konusu olup gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.

Araştırmacılar tarafından da sıkça vurgulandığı gibi; suya doymun numuneler, kayaç gözeneklerinde bulunan hava ve suyun ısı iletkenlikleri arasında var olan önemli farklılığın yansımalarının bir sonucu olarak kuru numunelerden daha büyük ısı iletkenlik değerlerine sahiptirler. Suyun oda sıcaklığındaki ısı iletim katsayısı 0,6 W/mK iken havanın aynı koşullardaki ısı iletim katsayısı 0,03 W/mK'dir. Kayacın su içeriği arttıkça, kayaç boşluklarında daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olan su daha düşük ısı iletkenliğe sahip olan havanın yerini almakta ve bu durum numunelerin ısı iletim katsayısının artışına yol açmaktadır.

Kayaçların ısı iletkenliği ile fiziksel özellikleri arasında kesin ilişkiler vardır ve bu ilişkilerde korelasyon katsayısı sıcaklık hariç 0,57-0,93 aralığında değişmektedir. Laboratuvar deneylerinden elde edilen bu sonuçlar, kayaçların bazı fiziksel özelliklerinin önceden belirlenmesi koşuluyla ısı iletkenlik hakkında bazı tahminlerin yapılabilmesini de olanaklı hale getirmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] Döver, D.H., 1991. Güney Afrika Cumhuriyeti'nde West Driefontein ve Kloof işletmelerinde ocak ikliminin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, p. 213.
- [2] Hartman, H.L., 1997. Mine Ventilation and Air Conditioning, 3rd ed., Wiley and Sons, New York, p.

730.

- [3] enerji.gov.tr; IEA, 2019
- [4] Kukkonen, I., & Lindberg, A., 1998. Thermal properties of rocks at the investigation sites: measured and calculated thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity. Working Report.
- [5] Robertson, E. C., & Peck, D. L., 1974. Thermal conductivity of vesicular basalt from Hawaii. Journal of Geophysical Research, 79(32), 4875-4888.
- [6] Desai, P. D., Navarro, R. A., Hasan, S. E., Ho, C. Y., & DeWitt, D. P., 1974. Thermophysical properties of selected rocks (No. CINDAS-TPRC-23). Thermophysical and Electronic Properties Information Analysis Center Lafayette In.
- [7] Messmer, J. H., 1965. The thermal conductivity of porous media. IV Sandstones. The effect of temperature and saturation. In Proceedings of the 5th Conference on thermal conductivity, Vol. 1, pp. 1-29.
- [8] Buntebarth, G., 1991. Thermal properties of KTB-Oberpfalz V B core samples at elevated temperature and pressure, ci. Drill., 2, 73-80.
- [9] Clauser, C., and E. Huenges., 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals, in rock physics and phase relations: A Handbook of Physical Constants, GU Ref. Shelf, vol. 3, edited by T. J. Ahrens, pp. 105-126, A GU, Washington D, .C.
- [10] Somerton, W. H., 1992. Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluids systems 2, Elsevier, New York, p.57
- [11] Lee, Y., Deming, D., 1998. Evaluation of thermal conductivity temperature corrections applied in terrestrial heat flow studies. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 103(B2), 2447-2454.
- [12] Kuriyagawa, M., Matsunaga, I., Yamaguchi, T., 1983. An in-situ determination of the thermal conductivity of granitic rock. 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia, s. E147-E150.
- [13] Birch, F., and H. Clark., 1940. The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition A, m. J. Scoe, 2 38,529-558, 613-635.
- [14] Cermak, V., & Rybach, L., 1982. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. Physical Properties of Rocks, Sub Vol. a, Geophysics and Space Research, Group V, Springer-Verlag, Berlin, 305-341.
- [15] Anand, J., Somerton, W.H. and Goma, E., 1973. Predicting thermal conductivities of formations from other known properties. Soc. Pet. Eng. J., 13, 267-273.
- [16] Sugawara, A., & Yoshizawa, Y., 1962. An experimental investigation on the thermal

- conductivity of consolidated porous materials. *Journal of Applied Physics*, 33(10), 3135-3138.
- [17] Brigaud, F., Vasseur, G., 1989. Minaralogy, porosity and fluit control of thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal*, Vol. 98, 525-542.
- [18] Ashworth, E. K., 1992. The variation of the thermal conductivity of tuff with moisture experimental results and proposed model. In *The 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- [19] Duruturk, YS., 1999. The variation of thermal conductivity with pressure in rocks and the investigation of its effect in underground mines (PhD thesis), Cumhuriyet University, Sivas, Turkey, p. 188.
- [20] Durutürk, Y.S., Demirci, A., Keçeciler, A., 2002. Variation of thermal conductivity of rocks with pressure. *CIM Bulletin*, Vol. 95, 67-71.
- [21] Demirci, A., Görgülü, K., Durutürk, Y.S., 2004. Thermal conductivity of rocks and its variation with uniaxial and triaxial stress, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41/7, pp. 1133-1138.
- [22] Görgülü, K., 2004. Determination of the relationships between the thermal conductivity and material properties of rocks. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, Vol. 11, Num. 4, pp. 297-301.
- [23] Görgülü, K., Durutürk, Y. S., & Demirci, A., 2004. Kayaçların ısı iletkenliklerini etkileyen faktörler. *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekanikliği Sempozyumu*, Sivas.
- [24] Giraud, A., Gruescu, C., Do, D. P., Homand, F., & Kondo, D., 2007. Effective thermal conductivity of transversely isotropic media with arbitrary oriented ellipsoidal inhomogeneities. *International Journal of Solids and Structures*, 44(9), 2627-2647.
- [25] Görgülü, K., Durutürk, Y. S., Demirci, A., & Poyraz, B., 2008. Influences of uniaxial stress and moisture content on the thermal conductivity of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 1439-1445.
- [26] Sundberg, J., Back, P. E., Ericsson, L. O., Wrafter, J., 2009. Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 1023-1028.
- [27] Abdulagatova, Z., Abdulagatov, I. M., and Emirov, V. N., 2009. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 1055-1071.
- [28] Cho, W. J., Kwon, S., & Choi, J. W., 2009. The thermal conductivity for granite with various water contents. *Engineering Geology*, 107(3), 167-171.
- [29] Zhao, X., Lee, Y. Y., & Liew, K. M., 2009. Mechanical and thermal buckling analysis of functionally graded plates. *Composite Structures*, 90(2), 161-171.
- [30] Abdulagatova, Z. Z., Abdulagatov, I. M., & Emirov, S. N., 2010. Effect of pressure, temperature, and oil-saturation on the thermal conductivity of sandstone up to 250MPa and 520K. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 73(1), 141-155.
- [31] Osako, M., Yoneda, A., & Ito, E., 2010. Thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of serpentine (antigorite) under high pressure. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183(1), 229-233.
- [32] Kwon, S., Cho, W. J., & Choi, J. W., 2011. Initial thermal conditions around an underground research tunnel at shallow depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 86-94.
- [33] Kwon, S., Lee, C., Yoon, C. H., & Cho, W. J., 2013. In situ borehole heater test at the KAERI Underground Research Tunnel in granite. *Annals of Nuclear Energy*, 62, 526-535.
- [34] Kim, H., Cho, J. W., Song, I., & Min, K. B., 2012. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea. *Engineering Geology*, 147, 68-77.
- [35] Merriman, J. D., Whittington, A. G., Hofmeister, A. M., Nabelek, P. I., & Benn, K., 2013. Thermal transport properties of major Archean rock types to high temperature and implications for cratonic geotherms. *Precambrian Research*, 233, 358-372.
- [36] Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R. M., Wang, B., & Ranjith, P. G., 2013. Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131-138.
- [37] Eppelbaum, L., Kutasov, I., & Pilchin, A., 2014. Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. In *Applied Geothermics*. Springer Berlin Heidelberg, 99-149.
- [38] Nagaraju, P., & Roy, S., 2014. Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements. *Tectonophysics*, 626, 137-143.
- [39] Pasquale, V., Verdoya, M., & Chiozzi, P., 2015. Measurements of rock thermal conductivity with a Transient Divided Bar. *Geothermics*, 53, 183-189.
- [40] Çolakoğlu, A., Genç, Y., 2001. Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yatağının makro-mikro dokusal özellikleri ve kökensel yorumu, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44,1.
- [41] Whitney, D., Teyssier, C., Dilek, Y., Fayan, K., 2001. Metamorphism of the central anatolian crystalline complex, Turkey.: Influence of orogen-normal collision vs. wrench-dominated tectonics on P-T paths: *J. Metamorphic Geol.*, v.19, pp. 411-432.

- [42] Higashi, A., 1952. Thermal Conductivity of Frozen Soil. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Ser. 2, Physics, 4(2), 95-106.
- [43] Kersten, M. S., 1949. Thermal properties of soils.
- [44] Penner, E., 1963. Anisotropic thermal conduction in clay sediments.
- [45] Url-3
<<http://nptel.ac.in/courses/105103025/module5/lec39/2.html/>>, alındığı tarih: 24.09.2015.
- [46] Babacan, A. E., Ersoy, H., & Gelişli, K., 2012. Kayaçların Fiziksel, Mekanik ve Elastik Özelliklerinin Ultrasonik Hız Tekniği ve Zaman-Frekans Analiziyle Belirlenmesi: Bej Kireçtaşları (KD Türkiye) Üzerine Örnek Bir Çalışma. Geological Engineering Journal/Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 36(1).