

**CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYAÇLARIN YERİNDE ve LABORATUVAR ÖLÇÜMLERİ
İLE BELİRLENEN ISIL GEÇİRGENLİKLERİ ARASINDAKİ
FARKLILIKLARIN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Gökhan EROL
(2010FED001)**

Maden İşletme Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Yavuz Selim DURUTÜRK

**SİVAS
EKİM 2016**

GÖKHAN EROL'un hazırladığı ve “**Kayaçların Yerinde ve Laboratuvar Ölçümleri İle Belirlenen Isıl Geçirgenlikleri Arasındaki Farklılıkların Araştırılması**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç. Dr. Y.Selim DURUTÜRK**
Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kazım GÖRGÜLÜ**
Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Ertan BUYRUK
Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Önder UYSAL
Dumlupınar Üniversitesi

Doç.Dr. Ercan ARPAZ
Kocaeli Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İdris ZORLUTUNA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-554 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Gökhan EROL, 2016



Çalışmam sırasında bana destek olan eşime ve çocuklarıma...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

28 /10 /2016

Gökhan EROL

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd.Doç. Dr. Yavuz Selim DURUTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Bu tezin arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla ilgili her türlü lojistik desteği sağlayan MTA Genel Müdürlüğü ve Yıldızlar Holding bünyesinde bulunan Rasih ve İhsan yeraltı maden ocağı çalışanlarına ve ilgili tüm personeline çok teşekkür ederim.



ÖZET

KAYAÇLARIN YERİNDE ve LABORATUVAR ÖLÇÜMLERİ İLE BELİRLENEN ISIL GEÇİRGENLİKLERİ ARASINDAKİ FARKLILIKLARIN ARAŞTIRILMASI

Gökhan EROL

Doktora Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Yavuz Selim DURUTÜRK

2016, 172+xxi sayfa

Bu araştırma kapsamında; kayaçların yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler aracılığıyla belirlenen ısı iletim katsayıları arasındaki farklılıkların ve bu farklılıklara neden olan faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda; öncelikle geniş kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiş ve bu konuda yapılan çalışmalar ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Literatür araştırmasından elde edilen sonuçlar ışığında; öncelikle yeraltında ısı iletkenlik ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için uygun koşulları sağlayabilecek nitelikte bir yeraltı ocağının temin edilmesi gerekliliği doğrultusunda yapılan faaliyetler sonucunda, Yıldızlar Holding bünyesinde bulunan Rasih ve İhsan kurşun-çinko yeraltı maden ocağı model ocak olarak seçilmiştir. Model ocakta farklı derinliklerde ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiş, tezin amacına hizmet edecek şekilde ocak havasının sıcaklık ve nem değerleri ölçülmüş, yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği bölgelerden aynı zamanda laboratuvar ölçümleri için de örnek numuneler alınmıştır. Örnek numuneler üzerinde MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında ısı iletkenlik ölçümleri ve aynı zamanda ısı iletim katsayısının kayaçların fiziksel ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak nasıl değiştiğinin ortaya konulabilmesi amacıyla sıcaklık, basınç, nem, su emme, kılcal su emme ve ultrasonik hız deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Arazi ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar uygun değerlendirme yöntemleri aracılığıyla değerlendirilmiş, söz konusu çalışma bölgesindeki kayaçlara ait yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları belirlenmiştir.

Kayaçların ısı iletim katsayıları ile fiziksel ve mineralojik özellikleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiş ve sonuçlar çizelge ve grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak; kayaçların yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasında, kayaç türüne bağlı olarak 1,546-2,102 kat arasında değişen oranlarda farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kayaçların ısı iletkenliği, Fiziksel özellikler, Isı transferi, Mineralojik özellikler, Yerinde ve laboratuvarında ısı iletimi katsayısı ölçümü



ABSTRACT

A RESEARCH ON DIFFERENCES BETWEEN HEAT CONDUCTIVITIES OF ROCKS DETERMINED BY IN-SITU MEASUREMENTS AND MEASUREMENTS AT LABORATORY

Gökhan EROL

PhDThesis

The Department of Mining Engineering

Supervisor: As.Prof.Dr. Yavuz Selim DURUTÜRK

2016, 172+xxi pages

Within the scope of this research; it is aimed to determine the differences between the heat transfer coefficients determined by in situ measurements and the laboratory measurements and the factors that cause these differences. For this purpose; a comprehensive literature search has been carried out and the studies previously carried out in this regard have been examined in detail. In the light of the results obtained from the literature research, and as a result of the activities carried out in the direction of the necessity of providing an underground oven which can provide suitable conditions for the underground thermal conductivity measurements to be carried out, Rasih ve İhsan lead-zinc underground mine, which is appurtenant to Yıldızlar Holding Company, was selected as a model quarry. Thermal conductivity measurements were performed at various depths in the model quarry, the temperature and humidity values of the quarry air were measured to serve the purpose of the thesis, and samples were taken for laboratory measurements from the areas where on-site measurements were carried out. Thermal conductivity measurements and temperature, pressure, humidity, water absorption, capillary water absorption and ultrasonic velocity tests were performed on the sample specimens in MTA General Directorate laboratories in order to determine how the heat transfer coefficient changes with the physical and mineralogical properties of the rocks.

The results obtained from the experiments carried out in the field and in the laboratory were evaluated by means of appropriate evaluation methods and In-situ and laboratory heat transfer coefficients for the rocks in the study area were determined. Relations between heat transfer coefficients and physical and

mineralogical properties of rocks were evaluated and the results were presented in charts and graphs. As a result; It has been determined that there are differences between the rock heat transfer coefficients and the laboratory heat transfer coefficients, ranging from 1,546-2,102 times depending on the rock type.

Keywords: Thermal conductivity of rocks, physical properties, heat transfer, mineralogical properties, Measurement of heat conduction coefficient in situ and in the laboratory



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	vii
ABSTRACT	x
ŞEKİLLER	xiv
DİZİNİ	
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Isı İletim Katsayısının Önemi.....	4
2.2 Isı Transferi Mekanizması.....	7
2.2.1 Isı iletimi (kondüksiyon).....	7
2.2.2 Isı taşınımı (konveksiyon).....	9
2.2.3 Isı ışınımı (radyasyon).....	10
2.3 Isıl Özellikler.....	13
2.3.1 Özgül ısı kapasitesi.....	13
2.3.2 Isı iletim katsayısı.....	16
2.3.2 Isı yayılım katsayısı (termal difüzyon).....	19
2.4 Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri.....	20
2.4.1 Prob yöntemi.....	20
2.4.2 Bölünmüş bar yöntemi.....	22
2.4.3 Muhafazalı sıcak plaka yöntemi.....	24
2.4.4 Muhafazalı (veya muhafazasız) ısı akış ölçer yöntemi.....	25
2.4.5 Sıcak tel yöntemi.....	27
2.4.6 Lazer flaş yöntemi.....	29
2.5 Kayaçların Isı İletim Katsayılarının Laboratuvar Ortamında Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar.....	32
2.6 Kayaçların Isı İletim Katsayılarının Yerinde Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar.....	40
2.7 Kayaçların Isı İletim Katsayılarını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar.....	48
2.8 Yeraltı Kaya Yapılarının Depolama Amaçlı Kullanımına Yönelik Çalışmalar.....	81
3. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI.....	91
3.1 Arazi Çalışmaları ve Sonuçları.....	91
3.1.1 Çalışma alanının konumu.....	91
3.1.2 Çalışma alanının jeolojisi.....	92
3.1.3 Yerinde ısıl iletkenlik ölçüm prosedürü.....	93
3.1.4 Yerinde ölçüm sonuçları.....	96
3.1.4.1 Sıcaklık-nem ölçümleri ve sonuçları.....	96
3.1.4.2 Yerinde ısı iletim katsayısı ölçümleri ve sonuçları.....	98

3.2 Laboratuvar Çalışmaları ve Sonuçları.....	120
3.2.1 Numunelerin hazırlanması.....	120
3.2.2 Isı iletim katsayısı ölçümleri ve sonuçları.....	120
3.2.3 Numunelerin tanımlanmasına yönelik fiziksel testler.....	123
3.2.3.1 Örneklerin kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları....	124
3.2.3.2 Yoğunluk ve gözeneklilik (porozite) belirleme deney sonuçları.....	127
3.2.3.3 Su emme katsayısı belirleme deney sonuçları.....	129
3.2.3.4 Kılcal su emme katsayısı belirleme deney sonuçları....	130
3.2.3.5 Ultrasonik hız deneyi sonuçları.....	131
4. ARAZİ VE LABORATUVAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	133
4.1 Sıcaklığa Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi.....	133
4.2 Mineralojik ve Kimyasal Özelliklerin Isı İletim Katsayısına Etkileri.....	135
4.3 Yoğunluk ve Gözenekliliğe Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi.....	136
4.4 Su Emme ve Isı İletim Katsayıları Arasındaki İlişkiler.....	140
4.5 Kılcal Su Emme ve Isı İletim Katsayıları Arasındaki İlişkiler.....	141
4.6 P Dalga Hızına Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi.....	143
4.7 Kayaçların Yerinde ve Laboratuvarda Ölçülen Isı İletim Katsayıları Arasındaki Farklılıklar.....	144
4.8 Kayaçların Yerinde ve Laboratuvarda Ölçülen Isı İletim Katsayıları Arasındaki Farklılıkların Nedenleri Üzerine Bir Analiz.....	147
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	155
KAYNAKLAR.....	163

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Isı akısının yönü (Yüncü ve Kakaç, 1999) 9
Şekil 2.2	Sıcaklığa bağlı olarak özgül ısı kapasitesinin değişimi (Scharli ve Rybach, 2001) 15
Şekil 2.3	Kayaçlarda sıcaklığa bağlı özgül ısı kapasitesi değişimi (Vosteen ve Schellschmidt, 2003) 15
Şekil 2.4	Kayaçlardan ocak havasına doğru olan ısı akışının nihai sıcaklık değişimi ile birlikte idealize edilmiş gösterimi (Hartman, 1997) 18
Şekil 2.5	Sıcaklığa bağlı olarak ısı yayılım katsayısının değişimi (Vosteen ve Schellschmidt, 2003) 20
Şekil 2.6	Isı iletim katsayısı ölçüm probu (Liu vd., 2007) 21
Şekil 2.7	Bölünmüş bar yöntemi ölçüm düzeneği (Url-1) 23
Şekil 2.8	Muhafazalı sıcak plaka ölçüm düzeneği (Url-2) 24
Şekil 2.9	Muhafazalı ısı akış ölçer düzeneği (Url-3) 26
Şekil 2.10	Sıcak tel yöntemi ölçüm düzeneği (ASTM C1113) 27
Şekil 2.11	Lazer flaş yöntemi ölçüm düzeneği (Url-4) 30
Şekil 2.12	Değişik deneysel koşullar için sıcaklık artış grafikleri (Url-5) 30
Şekil 2.13	Muhafazasız plaka düzeneği (Ashworth ve Ashworth, 1979) 32
Şekil 2.14	Laboratuvarda ısı iletkenliğinin belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği (Barla vd., 1983) 33
Şekil 2.15	Muhafazasız plaka kolonu (Mousset-Jones ve McPherson, 1986) 34
Şekil 2.16	Bazı malzemelerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan düzenek (Henry ve Coumou, 1991) 35
Şekil 2.17	Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Güyağüler ve Önder, 1995) 36
Şekil 2.18	Bölünmüş bar yöntemi ile ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Kukkonen ve Lindberg, 1995) 37
Şekil 2.19	Geçici düzlem ısı kaynağı yöntemi (Transient Plane Source-TPS) (Liou ve Tien, 2016) 39
Şekil 2.20	Isı transferi deneyleri için hazırlanan granit blok ve blok üzerindeki delik düzeni (Liou ve Tien, 2016) 39
Şekil 2.21	Yerinde ısı iletkenlik ölçüm düzeneği (Kuriyagawa vd., 1983) 41
Şekil 2.22	Yerinde ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Mousset-Jones ve McPherson, 1986) 42
Şekil 2.23	Isıl tepki deney düzeneği (TRT) (Lhendup vd., 2014) 44
Şekil 2.24	Kuyu ısı değiştirgeci aracılığıyla ısı iletkenlik deney düzeneği ve delik logu (BHE: Borehole Heat Exchanger, TRT: Thermal Response Test) (Choi ve Ooka, 2015) 46
Şekil 2.25	Yerinde ısı iletim katsayısı ölçümü için delik düzeneği (Habibi vd., 2015) 47
Şekil 2.26	Yerinde ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Habibi vd., 2015) 48
Şekil 2.27	Isı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimi (Hawai bazaltı için) (Bütün veriler Robertson ve Peck'ten (1974) alınmıştır.) (Clauser & Huenges, 1995) 49
Şekil 2.28	Isı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimi (Kuarşlı kumtaşı için) (Veriler Messmer, 1965 ve Desai vd., 1974'den alınmıştır.) (Clauser & Huenges, 1995) 50

Şekil 2.29	Kuvars içeriğine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen vd., 1998)	50
Şekil 2.30	Kayaç yoğunluğuna bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen ve Lindberg, 1998)	51
Şekil 2.31	Özgül ısı kapasitesine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen ve Lindberg, 1998)	51
Şekil 2.32	Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Durutürk, 1999)	52
Şekil 2.33	Kayaçlarda tek eksenli basınç dayanımına bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Durutürk, 1999)	52
Şekil 2.34	Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Demirci vd., 2004)	54
Şekil 2.35	Bazı kayaçların ısı iletim katsayısının tek ve üç eksenli gerilmelere bağlı olarak değişimi (Demirci vd., 2004)	54
Şekil 2.36	Dolaylı çekme dayanımı, Schmidt sertliği, nokta yük dayanımı, kohezyon, Shore sertliği, darbe dayanımı, birim ağırlık, ve elastik modülü ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiler (Görgülü, 2004)	56
Şekil 2.37	Tek eksenli basınç dayanımı ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki (Görgülü, 2004)	57
Şekil 2.38	Konglomera için basınç ve nemin bir fonksiyonu olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2004)	57
Şekil 2.39	Eksenel gerilme ile ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2004)	57
Şekil 2.40	Bazı kayaçlarda basınca bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Tüf, sarı traverten, Akköy ve Zile bej, piroksen, diyabaz, serpantin, kumtaşı ve beyaz traverten) (Görgülü vd., 2008)	58
Şekil 2.41	Bazı kayaçlarda basınca bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Jips, siyah kireçtaşı, Afyon gök mavi, killi kireçtaşı, Muğla beyaz, Divriği mermer, monzonit, konglomera ve Afyon şeker) (Görgülü vd., 2008)	59
Şekil 2.42	Konglomera için basınç ve su içeriğine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2008)	59
Şekil 2.43	Yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği 1- elektriksel özelliklerin ölçümü için numune 2- yay 3 ve 8- soğutucu 4 ve 7- numuneler 5-ısıtıcı 6- yanal ısıtıcı T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ - termokupllar (Abdulagatova vd., 2009)	60
Şekil 2.44	Basınç ve sıcaklığa bağlı olarak kumtaşının ısı iletim katsayısının değişimi (Kesikli çizgiler hesaplanan değerler, düz çizgiler ise sıfır basınca doğru doğrusal kestirimdir.) (Abdulagatova vd., 2009)	60
Şekil 2.45	Suya doymun granit numunelerinde etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Cho vd., 2009)	61
Şekil 2.46	Kuru granit numunelerinde etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Cho vd., 2009)	62
Şekil 2.47	Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Zhao vd., 2009)	63
Şekil 2.48	Lifli yalıtım malzemeleri için sıcaklığa ve basınca bağlı olarak etkili ısı iletim katsayısının değişimi (Zhao vd., 2009)	63
Şekil 2.49	Lifli yalıtım malzemeleri için basınca bağlı olarak etkili ısı iletim katsayısının değişimi (Zhao vd., 2009)	64

Şekil 2.50	Yağa doymun kumtaşı numunesinde basınç ve sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (Abdulagatova vd., 2009)	65
Şekil 2.51	Isı yayınım, ısı iletim katsayılarının ve ısı kapasitesinin basınçla değışimi (Osako vd., 2010)	66
Şekil 2.52	Isı yayınım, ısı iletim katsayılarının ve ısı kapasitesinin sıcaklıkla değışimi (Osako vd., 2010)	66
Şekil 2.53	Burdur bej numunesinde sıcaklığa bağlı olarak efektif porozitenin değışimi (Yavuz vd., 2010)	67
Şekil 2.54	Burdur bej numunesinde sıcaklığa bağlı olarak P dalga hızının değışimi (Yavuz vd., 2010)	67
Şekil 2.55	Blok düzeneği (Akınyemi vd., 2011)	68
Şekil 2.56	KD-2 pro cihazı (Akınyemi vd., 2011)	68
Şekil 2.57	Ana kayaçlarda yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (PGR, pegmatitik granit; TGG, tonalitık–granodiyoritık–granitik gnays) (Kukkonen vd., 2011)	69
Şekil 2.58	Ana kayaçlarda yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (VGN, damarlı gnays; DGN, diatexitik gnays; MGN, mikalı gnays; KFP, potasyum-feldspat porfiri; QGN, kuvarslı gnays) (Kukkonen vd., 2011)	70
Şekil 2.59	Ana kayaçlarda ölçüm yönü-tabakalanma yönü arasındaki açığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (VGN, damarlı gnays; TGG, tonalitık–granodiyoritık–granitik gnays) (Kukkonen vd., 2011)	70
Şekil 2.60	Yönsel karot alımı aracılığıyla numune hazırlama (Cho vd., 2012) ...	71
Şekil 2.61	Bölünmüş bar yöntemi ile ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Beardsmore ve Cull, 2001'den geliştirilmiştir.) (Kim vd., 2012)	71
Şekil 2.62	Anizotropi açısına göre elastisite modülü (E), P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısının (k) değışimi (Kim vd., 2012)	72
Şekil 2.63	Elastik modülü (E) ile P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısı (k) arasındaki ilişki (Kim vd., 2012)	72
Şekil 2.64	P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısı (k) arasındaki ilişki (Kim vd., 2012)	73
Şekil 2.65	Üç farklı kayaç grubu ve olivin için ısı özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değışimi (Merriman vd., 2013)	74
Şekil 2.66	Bölünmüş bar düzeneği ile ısı iletim katsayısı ölçümü (Barry-Macaulay vd., 2013)	75
Şekil 2.67	Doyma derecesine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (Barry-Macaulay vd., 2013)	76
Şekil 2.68	Kuru ve suya doymun koşullarda etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (Nagaraju ve Roy, 2015)	78
Şekil 2.69	Laboratuvarda ısı iletkenliğin belirlenmesi için kullanılan bölünmüş bar düzeneği (Pasquale vd., 2015)	79
Şekil 2.70	Marn ve siltli marn için gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (Pasquale vd., 2015)	79
Şekil 2.71	Kristalen kayaçlarda yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değışimi (Pasquale vd., 2015)	79
Şekil 2.72	Stripa BHT ölçüm düzeneği (Jeffrey vd., 1979)	81
Şekil 2.73	Yeraltı araştırma tünelinin şematik görünümü (Kwon vd., 2006)	84

Şekil 2.74	Kazı hasar bölgesi etkilerinin incelenmesi çalışmaları (Kwon vd., 2008)	85
Şekil 2.75	Yeraltı araştırma tüneli tasarımı (Kwon vd., 2011)	85
Şekil 2.76	BHT deney bölgesi (Kwon vd., 2013)	86
Şekil 2.77	Yeraltı araştırma tüneline derinliğe bağlı olarak çekme ve tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi (Kwon vd., 2011)	86
Şekil 2.78	Yeraltı araştırma tüneline derinliğe bağlı olarak gözenekliliğin değişimi (Kwon vd., 2011)	87
Şekil 2.79	Derinliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kwon vd., 2011)	87
Şekil 2.80	BHT delik düzeni (Kwon vd., 2013)	88
Şekil 2.81	BHT duvarı ve karşı taraftaki duvarda ölçülen hava ve kayaç yüzey sıcaklıkları arasındaki ilişki (Kwon vd., 2013)	89
Şekil 2.82	BHT alanındaki kayaçlarda görülen eklem (Kwon vd., 2013)	89
Şekil 2.83	Eklem açıklığı ve A tipi gözlem deliklerindeki ortalama kayaç sıcaklığının mesafeye bağlı olarak değişimi (Kwon vd., 2013)	90
Şekil 2.84	Zamana bağlı olarak ısı gerilme değişimi (Kwon vd., 2013)	90
Şekil 3.1	Akdağmadeni yerbuldu haritası	91
Şekil 3.2	Akdağmadeni genel jeoloji haritası (Whitney vd, 2001)	92
Şekil 3.3	El tipi sıcaklık-nem ölçer cihazı	97
Şekil 3.4	K2B sıcaklık-nem ölçümleri	97
Şekil 3.5	K2E sıcaklık-nem ölçümleri	97
Şekil 3.6	1590 Ana Yol sıcaklık-nem ölçümleri	98
Şekil 3.7	1560 ana yol sıcaklık-nem ölçümleri	98
Şekil 3.8	BHT yönteminin 1560 Ana Yol'da uygulaması	99
Şekil 3.9	K2B BHT ölçüm düzeneği	100
Şekil 3.10	K2B ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	100
Şekil 3.11	K2B-2 numaralı prob okuma grafiği	101
Şekil 3.12	K2B-3 numaralı prob okuma grafiği	101
Şekil 3.13	K2B-5 numaralı prob okuma grafiği	101
Şekil 3.14	K2B-7 numaralı prob okuma grafiği	102
Şekil 3.15	K2B-9 numaralı prob okuma grafiği	102
Şekil 3.16	K2E BHT ölçüm düzeneği	102
Şekil 3.17	K2E ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	103
Şekil 3.18	K2E ısıtıcıya 60 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	103
Şekil 3.19	K2E-1 numaralı prob okuma grafiği	103
Şekil 3.20	K2E-2 numaralı prob okuma grafiği	104
Şekil 3.21	K2E-3 numaralı prob okuma grafiği	104
Şekil 3.22	K2E-4 numaralı prob okuma grafiği	104
Şekil 3.23	K2E-5 numaralı prob okuma grafiği	105
Şekil 3.24	K2E-6 numaralı prob okuma grafiği	105
Şekil 3.25	K2E-7 numaralı prob okuma grafiği	105
Şekil 3.26	K2E-8 numaralı prob okuma grafiği	106
Şekil 3.27	K2E-9 numaralı prob okuma grafiği	106
Şekil 3.28	K2E-10 numaralı prob okuma grafiği	106
Şekil 3.29	1590 Ana Yol BHT ölçüm düzeneği	107
Şekil 3.30	1590 Ana Yol ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	107
Şekil 3.31	1590 Ana Yol ısıtıcıya 60 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	107

Şekil 3.32	1590 Ana Yol -1 numaralı prob okuma grafiği	108
Şekil 3.33	1590 Ana Yol -2 numaralı prob okuma grafiği	108
Şekil 3.34	1590 Ana Yol -3 numaralı prob okuma grafiği	108
Şekil 3.35	1590 Ana Yol -4 numaralı prob okuma grafiği	109
Şekil 3.36	1590 Ana Yol -5 numaralı prob okuma grafiği	109
Şekil 3.37	1590 Ana Yol -6 numaralı prob okuma grafiği	109
Şekil 3.38	1590 Ana Yol -7 numaralı prob okuma grafiği	110
Şekil 3.39	1590 Ana Yol -8 numaralı prob okuma grafiği	110
Şekil 3.40	1590 Ana Yol -9 numaralı prob okuma grafiği	110
Şekil 3.41	1590 Ana Yol -10 numaralı prob okuma grafiği	111
Şekil 3.42	1560 Ana Yol BHT ölçüm düzeneği	111
Şekil 3.43	1560 Ana Yol ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	111
Şekil 3.44	1560 Ana Yol ısıtıcıya 60 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi	112
Şekil 3.45	1560 Ana Yol -1 numaralı prob okuma grafiği	112
Şekil 3.46	1560 Ana Yol -2 numaralı prob okuma grafiği	112
Şekil 3.47	1560 Ana Yol -3 numaralı prob okuma grafiği	113
Şekil 3.48	1560 Ana Yol -4 numaralı prob okuma grafiği	113
Şekil 3.49	1560 Ana Yol -5 numaralı prob okuma grafiği	113
Şekil 3.50	1560 Ana Yol -6 numaralı prob okuma grafiği	114
Şekil 3.51	1560 Ana Yol -7 numaralı prob okuma grafiği	114
Şekil 3.52	1560 Ana Yol -8 numaralı prob okuma grafiği	114
Şekil 3.53	1560 Ana Yol -9 numaralı prob okuma grafiği	115
Şekil 3.54	1560 Ana Yol -10 numaralı prob okuma grafiği	115
Şekil 3.55	Isı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler	121
Şekil 3.56	Anter Unitherm 2022 model muhafazalı ısı akış ölçer cihazı	122
Şekil 3.57	K2B numunesi ince kesit görünümü	124
Şekil 3.58	K2E numunesi ince kesit görünümü	125
Şekil 3.59	1590 ana yol numunesi ince kesit görünümü	126
Şekil 3.60	1560 ana yol numunesi ince kesit görünümü	127
Şekil 3.61	Ultrasonik test cihazı ve ölçümde kullanılan numuneler	132
Şekil 4.1	Kuru numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi	133
Şekil 4.2	Nemli numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi	134
Şekil 4.3	Suya doymuş numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi	135
Şekil 4.4	Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	137
Şekil 4.5	Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	137
Şekil 4.6	Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	137
Şekil 4.7	Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	138
Şekil 4.8	Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	138
Şekil 4.9	Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	138
Şekil 4.10	Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	139
Şekil 4.11	Açık gözeneklili-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	139
Şekil 4.12	Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	140
Şekil 4.13	Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	140
Şekil 4.14	Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	141
Şekil 4.15	Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	141
Şekil 4.16	Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	142
Şekil 4.17	Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	142

Şekil 4.18	Kılcal Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	143
Şekil 4.19	P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de)	143
Şekil 4.20	P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de)	144
Şekil 4.21	P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de)	144
Şekil 4.22	Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (1560)	145
Şekil 4.23	Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (1590)	146
Şekil 4.24	Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (K2E)	146
Şekil 4.25	Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (K2B)	146
Şekil 4.26	Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (suya doygun)	152
Şekil 4.27	Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (nemli)	153
Şekil 4.28	Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (kuru)	153
Şekil 4.29	Düşey gerilmeye bağlı olarak ısı iletim katsayısının kestirimi	154



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Farklı tür kayaçların ısı iletim katsayısı (Eppelbaum vd,2014) 18
Çizelge 2.2	Değişik kayaç türleri için tek eksenli basınç dayanımı-ısı iletim katsayısı ilişkileri (Durutürk, 2002)..... 53
Çizelge 2.3	Kayaçlar için gerilme durumu-ısı iletim katsayısı ilişkileri (Demirci vd., 2004)..... 55
Çizelge 2.4	Numunelerin ısıl ara yüzeyli ve ısıl ara yüzeysiz ısı iletim katsayıları (Akinyemi vd., 2011)..... 69
Çizelge 2.5	Konsomol'sk cevher bölgesindeki kayaçların ısı iletim katsayıları (Gornov,2015)..... 74
Çizelge 2.6	Konsomol'sk cevher bölgesindeki kayaçların metasomatik alterasyon dereceleri ile ısı iletim katsayıları arasındaki ilişki (Gornov, 2015)..... 75
Çizelge 3.1	Çalışma bölgelerinin özellikleri..... 94
Çizelge 3.2	1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz)..... 116
Çizelge 3.3	1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK)..... 117
Çizelge 3.4	1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK) 117
Çizelge 3.5	1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz)..... 118
Çizelge 3.6	1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK)..... 118
Çizelge 3.7	1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK) 118
Çizelge 3.8	K2E ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz)..... 119
Çizelge 3.9	K2E Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK)..... 119
Çizelge3.10	K2E Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK) 119
Çizelge 3.11	K2B ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz)..... 120
Çizelge 3.12	K2B Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK)..... 120
Çizelge 3.13	K2B Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK) 120
Çizelge 3.14	Kuru numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri..... 123
Çizelge 3.15	Nemli (%30-50) numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri..... 123
Çizelge 3.16	Suya doymun numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri..... 123
Çizelge 3.17	K2B numunesi kimyasal analiz sonuçları..... 124
Çizelge 3.18	K2E numunesi kimyasal analiz sonuçları..... 125
Çizelge 3.19	1590 Ana Yol numunesi kimyasal analiz sonuçları..... 126
Çizelge 3.20	1560 Ana Yol numunesi kimyasal analiz sonuçları..... 127
Çizelge 3.21	Numunelerin, gerçek ve görünür yoğunluk, açık ve toplam gözeneklilik değerleri..... 129
Çizelge 3.22	Numunelerin su emme katsayısı değerleri..... 130
Çizelge 3.23	Numunelerin kılcal su emme katsayısı değerleri..... 130
Çizelge 3.24	Numunelerin P ve S dalga hızları..... 132
Çizelge 4.1	Mineralojik ve kimyasal analiz-ısı iletim katsayısı özeti..... 136
Çizelge 4.2	Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar (YLO)..... 136
Çizelge 4.3	Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile düşey gerilme ilişkisi (suya doymun)..... 152
Çizelge 4.4	Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile düşey gerilme ilişkisi (nemli)..... 152
Çizelge 4.5	Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile düşey gerilme ilişkisi (kuru)..... 153

KISALTMALAR DİZİNİ

C.Ü	: Cumhuriyet Üniversitesi
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
KURT	: Kaeri underground research tunnel (Kaeri yeraltı araştırma tüneli)
BHT	: Borehole heater test (Kuyu ısıtma testi)
LHS	: Line heat source (Hat ısı kaynağı)



1. GİRİŞ

Tüm üretim faaliyetlerinde olduğu gibi madencilik faaliyetlerinde de özellikle son yıllarda yaygın ve yoğun olarak öne sürülen en önemli koşul, emniyetli ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve bunun devamlılığının sağlanmasıdır. Bu koşul yeraltı maden işletmelerinde ve özellikle de derin yeraltı maden işletmelerinde fevkalade büyük bir önem arz etmektedir.

Emniyetli ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması; söz konusu işletmelerde bu koşulların oluşturulmasını olumsuz olarak etkileyen faktörlerin ortaya konulmasına ve bu faktörlerin bertaraf edilmesini sağlayacak sistemlerin oluşturulmasına bağlıdır. Özellikle derin yeraltı maden işletmelerinde meydana gelen ısı, madencilik faaliyetlerini etkileyen ana problemlerden birini oluşturmaktadır. Çeşitli kaynaklardan ve de özellikle kayaçlardan ocak boşluklarına yayılan ısı nedeniyle ocak havasının sıcaklığı artmakta, buna bağlı olarak emniyet ve çalışma koşulları kötüleşmekte ve dolayısıyla verimlilik azalmaktadır. Bu kapsamda; maden ocağının içinde bulunduğu kayaçların iltiva ettiği ısının ocak boşluklarına akışı ve transferi problemlerine çözüm getirmek ve buna bağlı olarak gereken hava ve/veya soğutma talebini tespit etmek hususu çeşitli araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlarla ele alınmış ve özellikle son yıllarda bu alanda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu problemlerin çözümünde bilinmesi gereken temel parametrelerden biri kayaçların ısı iletim katsayılarıdır.

Kayaçların ısı iletim katsayılarının (k) gerek laboratuvar ölçeğinde gerekse yerinde belirlenmesine yönelik olarak çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yerinde ve laboratuvarda gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen ısı iletim katsayıları arasındaki farklılıkları vurgulayan araştırmacılardan; Hiramatsu vd. (1980) çevre kayaçlardan ocak havasına yayılan ısı miktarının teorik olarak hesaplanan ısı miktarından yaklaşık dört kat ve Mousset-Jones ve McPherson (1986) ise arazide ölçülen ısı iletim katsayısı değerlerinin laboratuvarda ölçülen değerlerden iki kat fazla olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kayaçların ısı iletim katsayısını etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Sundberg vd. (2009); ısı iletim katsayısının kayacın mineral bileşimi ve dokusal koşullarına bağlı olarak değiştiğini, su içeriği ve gözenekliliğin de önemli olduğunu

vurgulamışlardır. Abdulagatova vd. (2009); 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. Giraud vd.'ne (2007) göre ise; katı bileşenlerin kısmen doymuş gözenekli ortamları için ısı transferi miktarı, katının mineralojik, morfolojik veya dokusalılık ile ilgili parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Çeşitli kayaçlarda; anizotropi, gözeneklilik ve mikro çatlak yapısı ısı iletim katsayısı üzerinde etkili olan parametrelerdir ve izotropik yapıya sahip kayaçlarda bu özellikler ile ısı iletim katsayısı arasında zıt davranışlar görülmüştür.

Kwon vd. (2011) bir yeraltı tesisinde; ısı iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk, porozite, su içeriği, mevsimsel hava sıcaklığı değişimi, ilk kayaç sıcaklığı, ısı taşınımı faktörü ve jeotermal gradyanın termal analiz için bilinmesi gerektiğini ve bunun için sadece yerinde ölçümlerin her zaman yeterli olmadığını, deneysel çalışmaların da yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Ayrıca; farklı malzemelerde ve farklı ortamlarda ısı transferi kavramı, sadece madencilik açısından değil diğer ilgili mühendislik bilimleri tarafından da önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir. Poyraz (2006); kayaçların ısı iletkenliğinin jeotermal enerji üretimi, yeraltında ısı enerjisi depolanması, radyoaktif atık ve soğutulmuş yiyecek depolanması vb. konularda da büyük öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Cho vd. (2010); kayaç termal özelliklerinin yeraltı buhar ve sıcak su taşıma sistemleri ile jeotermal enerji geri kazanım sistemlerinin tasarımı ve analizi için giderek daha önemli bir konuma geldiğini, söz konusu sistemlerin tasarımı amacıyla kayaçlardaki sıcaklık dağılımının belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Akinyemi vd. (2011); farklı malzemelerin termal özelliklerinin, çevre bilimleri, tarım ve mühendislik açısından dikkate alınması gereken parametreler olduğunu ifade etmişlerdir.

Kayaçların gerek yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki farklılıklar gerekse ısı iletkenliklerini etkileyen parametreler literatür araştırması kapsamında ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.

Yukarıda vurgulanan hususlar dikkate alınarak mevcut araştırmanın amaçlarını aşağıdaki şekilde ortaya koymak mümkündür:

- i. Özellikle derin yeraltı maden işletmelerinde kayaçlardan ocak içine yayılan ve ocak havası ile ocak dışına transfer edilen ısı enerjisi miktarı, toplam ocak ısı enerjisi miktarının %30-60'ını oluşturmaktadır. Bu ısı miktarı kayaçların ısı iletim katsayıları ile orantılı olarak değişmekte olup bu konuda oluşturulacak yaklaşımların hassasiyeti ve doğruluk derecesi, kayaçların ısı iletim katsayılarının belirlenmesinde gösterilecek hassasiyete bağlı olarak değişecektir. Bu kapsamda; öncelikli olarak, kayaçların ısı iletim katsayılarının yerinde ve laboratuvar ölçümleri aracılığıyla belirlenmesi hedeflenmiştir.
- ii. Yerinde ve laboratuvar ısı iletkenlik değerleri arasındaki farklılıkların ortaya konulabilmesi amacıyla; kayaçların ısı iletim katsayılarını etkileyen ve arazi ve laboratuvar koşullarına bağlı olarak ölçülebilen parametreler ölçülecektir.
- iii. Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki farklılıklar ve bu farklılıklara neden olan etkenler, faktörler ile ısı iletim katsayısı arasındaki değişimlerin incelenmesi suretiyle ortaya konulmaya çalışılacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Isı İletim Katsayısının Önemi

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 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 kazanmış, emniyetli ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve bunun devamlılığının sağlanması açısından günümüzde ve gelecekte karşı karşıya kalınabilecek sorunlara çözüm üretilmesi kaçınılmaz olmuştur.

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 gerçeğidir.

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 (ve hatta bazı kaynaklarda %60'a kadar çıkan oranlarda) kayaçlardan ocak boşluklarına doğru olan ısı transferi problemlerine çözüm getirilmesi zorunluluğu bulunmaktadır. En uygun çözüm yolu, ocak havasının soğutulması olarak 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'inin fosil yakıtlarla karşılandığı, fosil yakıtların geri dönüşüm sürelerinin çok uzun olması, uzun vadede yenilenmeleri, yanma sonucunda açığa çıkan gazların günümüzde çevresel açıdan üç önemli olayın (asit yağmurları, sera gazı etkisi/küresel ısınma ve ozon tabakasının delinmesi) baş aktörleri olmaları ve bu nedenlerle ortaya çıkan uluslararası taahhütler nedeni ile fosil yakıt tüketiminin azaltılması zorunluluğu gelişmekte olan ülkeleri ve de özellikle enerji gereksinimi gittikçe artan ve yerli kaynakları aracılığıyla söz konusu gereksinimini karşılayamayacak düzeyde olan ülkemiz için son derece önem arz etmektedir. Ayrıca yine bu hususun; ülkelerin, dışa bağımlı hale gelmeleri suretiyle, siyasi ve ekonomik açıdan güç kaybetmelerine neden olduğu gerçeğinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Yukarıda açıklanan nedenlerle; kendi öz kaynaklarımızın kullanılabilirliğinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra toprak, yüzey, yeraltı ve havada doğal olarak bulunan ısı enerjisinin ve sanayideki atık ısının değerlendirilebilirliğinin de ayrıca araştırılması gerekmektedir.

Bu kapsamda iki önemli husus ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi ısı enerjisinin depolanması diğeri de nükleer enerjidir. Isı enerjisinin depolanması, enerjinin elde edilmesi ile kullanımı arasındaki zaman farkını ortadan kaldırarak hem ısıtma hem de soğutma amaçlı alternatif çözümler üretmektedir. Uzun dönem depolama ile yazın sıcaklığının depolanıp kışın veya kışın soğğunun depolanıp yazın kullanılması mümkün olabilmektedir. Nükleer enerji ise, son yıllarda artan enerji gereksinimini karşılamak adına bütün dünya ülkeleri için önemli bir konuma sahip bulunmaktadır. Dünya elektrik gereksiniminin yaklaşık olarak %17'sini karşılayan nükleer teknoloji diğer sektörler de hizmet etmektedir. Bugün dünyada 31 ülkede aktif olarak hizmet veren 437 adet nükleer reaktör bulunurken, 14 ülkede 68 nükleer reaktörün inşaatı devam etmekte, 2030 yılına kadar 164 nükleer reaktörün yapılması

planlanmakta ve 317 adet nükleer reaktör ise ülkelerin nükleer programlarında yer almaktadır. Ülkemizde de son yıllarda artan enerji açığının nükleer enerji yolu ile kapatılmasına ve bu bağlamda biri Mersin Akkuyu ve diğeri Sinop'ta olmak üzere iki adet nükleer santral kurulmasına karar verilmiştir. Nükleer teknolojiyi kullanan ülkelerdeki çalışmalar göz önüne alındığında; nükleer enerji atıklarının depolanması, bütün dünyada olduğu gibi gelecekte ülkemiz için de bir sorun oluşturacak ve nükleer atıkların güvenli depolama yöntemlerinden biri olan yeraltı kaya ortamlarında depolanması çözümünü gündeme getirecektir.

Isı enerjisi ve nükleer atıkların depolanması olaylarının her ikisi de yeraltı kaya ortamları ile ilişkili olup bu kapsamda kaya ortamlarının özellikleri önem kazanmaktadır. 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 ısı 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.

Yukarıda açıklanan nedenlerle önemi açıkça görülen kayaçların ısı iletim katsayıları konusu ile doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili çalışmaları aşağıdaki şekilde gruplandırmak mümkün olup çalışmaların detayları verilmeden önce, başta ısı transferi olayı olmak üzere ısısal özelliklere (özellikler, ısı iletim ve yayılım katsayısı) yönelik teorik bilgiler sunulacaktır.

- i. Isı emisyonunun insan üzerine etkisi
- ii. Yan kayaçalardan ocak boşluklarına ısı akışı
- iii. Ocaklarda toplam ısı yükünün hesaplanması
- iv. Ocaklarda ısı emisyonunun önceden tahmini
- v. Kayaçların ısı iletim katsayısının laboratuvarında belirlenmesi
- vi. Kayaçların ısı iletim katsayısının yerinde belirlenmesi
- vii. Kayaçların ısı iletkenliklerini etkileyen parametrelerin belirlenmesi
- viii. Yeraltı kaya yapılarının depolama amaçlı kullanımı

2.2 Isı Transferi Mekanizması

Isı, iki sistem arasında veya bir sistem ile çevresi arasında sıcaklık farkının neden olduğu enerji aktarımı olayıdır. Diğer bir ifadeyle; ısı transferi, sıcaklık farkının bir sonucu olarak ısı enerjisinin yüksek sıcaklıklı bir ortamdan düşük sıcaklıklı bir ortama geçmesi olayıdır. Isı doğrudan doğruya ölçülemez ve gözlenemez ancak doğurduğu etkiler gözlenebilir ve ölçülebilir (Kakaç, 1987). Isının geçtiği ortamlar; gaz, sıvı akışkanlar veya katılar olabilir.

Genel olarak fevkalade kompleks bir ilişkiler yumağı içeren ısı transferi problemlerini basitleştirme ve sonuca daha kolay ulaşma açısından aşağıdaki kabuller yapılmaktadır.

- i. Cisimlerin özgül ısıları ile özgül ağırlıkları değişmemektedir.
- ii. Isı iletim katsayısı sıcaklıkla sabit kalmaktadır.
- iii. Cisim homojen yapı özelliğindedir.
- iv. Cisim izotrop yapı özelliğindedir. Yani; ısı iletim katsayısı cismin her doğrultusunda aynı olmaktadır.
- v. Maddesel durum değişimi yoktur.

Isı transferi olayı için literatürde üç farklı mekanizma tanımlanmaktadır:

- i. Isı iletimi (Kondüksiyon/Conduction)
- ii. Isı taşınımı (Konveksiyon/Convection)
- iii. Isı ışıınımı (Radyasyon/Radiation)

2.2.1 Isı iletimi (kondüksiyon)

Isı iletimi; aynı katı, sıvı veya gaz ortamındaki farklı bölgeler arasında veya doğrudan fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, atom veya moleküllerin fark edilebilir bir yer değiştirmesi olmaksızın bunların teması sonucu meydana gelen ısı yayılımı işlemidir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre, ısı yüksek sıcaklıkta bulunan bir bölgeden düşük sıcaklıktaki bir bölgeye akar. Kinetik teoriye göre; bir maddenin sıcaklığı, bu maddeyi meydana getiren moleküllerin ortalama kinetik enerjileri ile orantılıdır. Ortam içerisinde bir bölgede sıcaklığın yüksek olması o bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin yüksek olması anlamına gelmektedir. Diğer bir ifadeyle; kinetik enerjinin fazla olması, iç enerjinin fazla olması demektir. Bir bölgede moleküllerin ortalama kinetik enerjisi sıcaklık

farkından dolayı bitişik bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinden fazla ise, enerjileri fazla olan moleküller enerjilerinin bir kısmını komşu moleküllere iletirler. Bu enerji transferi; akışkanlarda moleküllerin elastik çarpmaları yani ardışık çarpışmaları, metallerde serbest elektronların yüksek sıcaklık bölgelerinden alçak sıcaklık bölgelerine yayılımı (elektron sürüklenmesi) ile olur. Katılarda enerji transferi, elektron yayılımına ek olarak maddenin yapısını oluşturan kafes titreşimleri ile de komşu bölgelere iletir. Genelde; titreşimle iletilen enerji miktarı elektron sürüklenmesi aracılığıyla iletilen enerji miktarına oranla ihmal edilebilecek kadar az olduğundan, katılarda enerji iletiminin elektron sürüklenmesiyle gerçekleştiği varsayılabilir. Bu nedenle iyi elektriki iletkenler aynı zamanda iyi ısı iletkenlerdir.

Isı iletiminde genel olarak; birim zamanda birim alandan transfer edilen ısı miktarı (q , ısı akışı); sıcaklığa ve sıcaklık basamağına, sıcaklık ise yere ve zamana bağlı olarak değişmektedir.

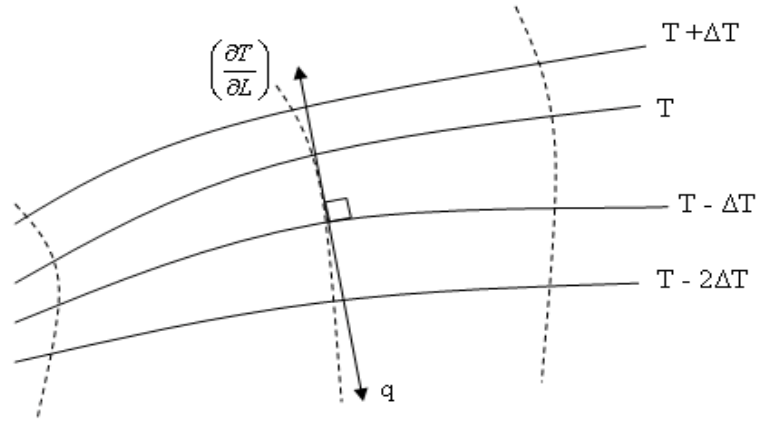
$$T=T(\rightarrow r,t) \quad [2.1]$$

Burada;

$$r=i.x + j.y + k.z \quad [2.2]$$

olup i , j ve k sıra ile x , y ve z yönlerindeki birim vektörlerdir.

Denklem 2.1 sıcaklık alanının matematiksel ifadesidir. Verilen bir noktada sıcaklık zamana bağlı olarak değişmiyor ise sürekli bir rejimden bahsetmek mümkündür. Eşit sıcaklık noktalarının birleştirilmesi ile oluşan yüzeyler eş-sıcaklık yüzeyleri olup bir noktada değişik iki sıcaklık bulunamayacağı için birbirlerini kesmezler, ya kendi üzerlerine kapanarak bir çevrim oluştururlar ya da sistemin sınırında son bulurlar. Şekil 2.1'de eş-sıcaklık düzlemleri görülmektedir (Yüncü ve Kakaç, 1999).



Şekil 2.1 Isı akışının yönü (Yüncü ve Kakaç, 1999).

Bir sistem içerisinde en büyük sıcaklık basamağı eş-sıcaklık düzlemine dik yönde olur. Sıcaklık skaler bir büyüklük olmasına karşın sıcaklık basamağı eş-sıcaklık düzlemine dik bir vektördür. Vektörün pozitif olması sıcaklık artışı, negatif olması ise sıcaklık düşümünü göstermektedir (Yüncü ve Kakaç, 1999).

Bu konu ısı özellikler kapsamında daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.2.2 Isı taşınımı (konveksiyon)

Bir ortamda ısı enerjisinin artması sonucunda sıcaklık yükselir ve sıcaklığın yükseldiği bölgelerde hacimce genleşme meydana gelir. Hacimce genleşme ise maddenin ortalama yoğunluğunun azalmasına neden olur. Ortalama yoğunluğu azalan madde ortam içinde yükselmeye başlar ve onun boşalttığı yeri göreceli olarak sıcaklığı düşük dolayısıyla ortalama yoğunluğu yüksek olan madde doldurur. Isınmış madde yükseldikçe soğur ve yoğunluğu artar. Artan yoğunluk çekim etkisinin de artmasına sebep olur, madde ortam içinde alçalmaya başlar. Bu arada yükselen maddenin yerini alan nispeten daha soğuk madde de ısınmaya başlar ve benzeri olaylar tekrarlanır. Isı enerjisinin ortam içinde neden olduğu bu yer değiştirme hareketine taşınım hareketi denir.

Akışkan içindeki veya akışkanla sınır yüzey arasındaki sıcaklık farklarından ve bu farkın yoğunluk üzerinde oluşturduğu etkiden kaynaklanan taşınım hareketi sonucunda ısı enerjisinin ortam içinde bizzat maddenin kendisi tarafından taşınmasına ısı taşınımı ile ısı transferi denir. Bir başka ifadeyle; bir yüzey üzerinden

veya bir boru içerisinde akan akışkanın sıcaklığı yüzey sıcaklığından farklı ise; akışkan hareketi sonucu, akışkan ile yüzey arasında bir ısı transferi olayı meydana gelir. Katı yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen bu ısı transferi mekanizması taşınım (konveksiyon) olarak adlandırılmaktadır. Akışkan hareketi uygulanan basınç farkı nedeniyle oluşuyorsa zorlanmış taşınım, akışkan hareketi yoğunluk farkı nedeniyle oluşuyorsa doğal taşınım olarak tanımlanmaktadır. Doğal taşınımda akışkan içindeki sıcaklık farkları arttıkça, zorlanmış taşınımda ise akımın hızı azaldıkça transfer edilen ısı miktarı artar.

Konvektif hareketler gaz ortamlarda en hızlı, katı ortamlarda ise en yavaştır. Termal konveksiyonun meydana geldiği ortamlarda iletim ve ışınlama ısı transferi var olmakla birlikte ihmal edilebilecek düzeydedir. Zaten madde aldığı ısı enerjisini iletim ve/veya ışınlama hızlı bir şekilde komşu bölgelere yayabilmiş olsaydı konveksiyon hareketi meydana gelmeyecekti (Sanver,1983).

Yüzey sıcaklığı T_w , yüzey ile temasta bulunan akışkanın ortalama sıcaklığı T_m ise yüzey ile akışkan arasında birim zamanda ısı transferi; aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$Q = h A (T_w - T_m) \quad \text{kcal/h veya W} \quad [2.3]$$

- q : Birim zamanda ısı akışı (W)
- h : Yüzey ısı transfer katsayısı (kcal/m²h°C)
- A : Sınır yüzey alanı (m²)
- T_m : Bir kanal içerisindeki akışta akışkanın ortalama sıcaklığı veya bir yüzey üzerindeki akışta yüzeyden uzaktaki sıcaklık (°C)
- T_w : Yüzey sıcaklığı (°C)

Bu ifade 1701 yılında Newton tarafından verilmiş olup, literatürde “Newton'un soğuma kanunu” olarak adlandırılır ve taşınımın özel kanunudur. Yukarıdaki denklemden, yüzey ısı transfer katsayısı (h) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$h = \frac{Q/A}{T_w - T_m} \quad \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C veya W/m}^2\text{°C} \quad [2.4]$$

2.2.3 Isı ışınlımı (radyasyon)

Katılar ile sıvı veya gaz halindeki akışkanların, dalga boyları ışığın dalga boyundan daha büyük olan elektromanyetik dalgalar şeklinde yayınladıkları veya yuttukları ısı

geçiş şeklidir. İletim ve taşınımında; enerji, bir ortam aracılığıyla transfer edilmesine karşılık ışınımında enerji elektromanyetik dalgalar aracılığıyla transfer edilir.

Bir cismi meydana getiren elementer taneciklerin ısı hareketi, elektromanyetik ışınım şeklinde enerji yayınlamalarına neden olur. Sıcaklığın artması taneciklerin hareketini ve dolayısıyla ışınım şiddetini artırır. Yayılan bu enerji dalgaları soğurmuş başka bir ortama tesadüf ettiklerinde enerjilerini bu ortama transfer ederek, bu ortamın ısı hareketliliğini artırır. Böylece ısı enerjisi, yayılan sistemden ışınımı soğuran sisteme transfer edilmiş olur. Sistemlerden birinin sıcaklığı azalırken diğerinin sıcaklığı artar. Böylece yüksek sıcaklıktaki bir sistemden alçak sıcaklıktaki bir sisteme doğru, bu iki sistem uzayda birbirleri ile temas durumunda olmaksızın, meydana gelen ısı akımı işlemine ışınım ile ısı transferi denir. Bu iki sistem arasında boşluk da olsa ısı transferi olayı meydana gelir. Güneşten dünyaya ulaşan ısı enerjisi ışınımaya en iyi örnektir.

Yayımlanan enerjinin yoğunluğu yüzey sıcaklığına ve yüzeyin doğasına bağlıdır. Bazı cisimler bu yayılan ışınım enerjisini soğurur, bazıları yansır, bazıları da içlerinden daha serbestçe geçmelerine izin verir. Cismin yansıttığı enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına yansıtma katsayısı (r), soğurduğu enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına soğurma katsayısı (α) ve geçirdiği enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına da geçirgenlik katsayısı (τ) denir.

$$r + \alpha + \tau = 1 \quad [2.5]$$

Üzerine düşen bütün enerjiyi tamamen soğuran ideal cisimler siyah cisim (black body) olarak adlandırılır. Bir siyah cismin birim zamanda ışınım ile yayınladığı enerji miktarı sıcaklığının dördüncü kuvveti ile orantılı olup bu ifade Stefan-Boltzman ışınım kanunu olarak bilinmektedir (Yüncü ve Kakaç, 1999).

$$E = \sigma A T^4 \quad [2.6]$$

E	:	Birim zamanda ışınım ile A yüzey alanından yayılan enerji miktarı (W)
A	:	Sınır yüzey alanı (m ²)
σ	:	Stefan-Boltzman sabiti (5.6697*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
T	:	Yüzey sıcaklığı (°C)

Bir siyah cismin ışına ile birim alandan birim zamanda yayınladığı enerji miktarı, bu siyah cismin ısı ışıınım yayınlama gücü olarak tanımlanır.

$$E_b = \sigma T^4 \quad [2.7]$$

Siyah bir cisim ile kendisini tamamen çevreleyen başka bir siyah yüzey arasında birim zamandaki ısı transferi miktarı;

$$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad [2.8]$$

olarak ifade edilir. Burada T_1 siyah cismin sıcaklığı, T_2 ise siyah cismi çevreleyen siyah yüzeyin sıcaklığıdır.

Gerçek cisimlerin ısı ışıınım ile yayınladıkları enerji miktarı, aynı sıcaklıktaki ve aynı büyüklükteki siyah cismin yayınladığı enerji miktarından daima daha azdır. Gri cisim olarak adlandırılan gerçek cisimlerin ışına ile birim zamanda birim alandan yayınladıkları enerji;

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad [2.9]$$

formülü ile ifade edilir. Burada ε , yayınlama katsayısı olarak adlandırılır ve değeri 0-1 arasında değişir. Bütün gerçek cisimler için ε değeri 1'den küçüktür.

Gri bir cisim ile bu cismi tamamen çevreleyen siyah bir yüzey arasında birim zamandaki ısı transferi miktarı ise aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$Q = \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad [2.10]$$

- σ : Birim zamandaki ısı transferi miktarı (W)
- A : Gri cismin alanı (m^2)
- ε : Yayınlama katsayısı
- T_1 : Gri cismin sıcaklığı ($^{\circ}C$)
- T_2 : Siyah yüzeyin sıcaklığı ($^{\circ}C$)

2.3 Isıl Özellikler

Yeraltı maden ocakları genişledikçe ve daha derinlere indikçe, yeraltında çalışan işçiler için uygun iklim koşullarının sağlanması ve sağlanan iklim koşullarının sürdürülebilmesi hususu önemli bir sorun olup ocağın koşullarına uygun ekipmanların seçimi de ayrı bir güçlük arz etmektedir.

Ocak havasının sıcaklık-nem kontrol sistemlerinin dizaynında, öncelikle ocak soğutma yükünün, soğutma yükünün tayini için ise ocağın toplam ısı yükünün ve havanın ısı taşıma kapasitesinin bilinmesi gerekmektedir. Ocağın toplam ısı yükünü oluşturan kaynaklar içerisinde en önemlilerinden biri olan yeraltı boşluklarının etrafını çevreleyen yan kayalardan ocak boşluklarına doğru olan ısı akışının karakterize edilebilmesi için öncelikli olarak kayaların ısıl özellikleri belirlenmelidir. Bu özelliklerden; özgül ısı kapasitesi, ısı iletim katsayısı ve ısı yayılım katsayısı aşağıda açıklanacaktır. Bu özelliklerin belirlenmesi sadece madencilik faaliyetleri kapsamında karşılaşılan problemlerin çözümünde değil diğer pek çok önemli mühendislik problemlerinin çözümünde de büyük önem taşımaktadır. Konu ile ilgili ilginç örnekler arasından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- i. Kuyulardaki ve tünellerdeki kazı tasarımı sırasında suni donma aracılığıyla kayacın stabilizasyonu
- ii. Jeotermal rezervlerin endüstriyel kullanımı
- iii. Radyoaktif atıkların depolanacağı yeraltı boşluklarının seçimi ve depolama alanlarının hesaplanması
- iv. Yüksek sıcaklıklara sahip derin yeraltı maden işletmeciliği faaliyetlerinde alınacak tedbirlerin belirlenmesi
- v. Yeraltına ısı depolama ve yeraltı ısısının kullanımı
- vi. Binalarda soğutma ve ısıtma hesaplamaları

2.3.1 Özgül ısı kapasitesi

Sabit hacimde özgül ısı (c_v) ve sabit basınçta özgül ısı (c_p) olmak üzere iki tip özgül ısı kavramı söz konudur. Fiziksel olarak sabit hacimdeki özgül ısı kapasitesi, c_v ; sabit hacimde, malzemenin birim kütlesinin sıcaklığının 1°C arttırılması için gereksinim duyulan enerjidir. Benzer şekilde, sabit basınçta gereksinim duyulan enerji ise c_p 'dir. Sabit basınçta sistemin genleşmeye izin vermesi ve bunun için gerekli olan enerjinin sistemden sağlanması nedeniyle, c_p her zaman c_v 'den büyüktür (Yunus vd., 2011).

Bir cisim ısıtılırken hacminin sabit tutulması güç olduğundan, genellikle sabit hacimde ısı kapasitesi ölçülmez. Diğer yandan; mod frekansları ve elektron enerji seviyeleri atomlar arası uzaklığa bağlı olduğundan, sabit basınç altındaki ısı kapasitesini hesaplamak zordur. Sonuç olarak; ısı kapasitesi, sabit basınç altında ölçülmekte ve sabit hacim altında hesaplanmaktadır (Dikici, 1993). Özgül ısı kapasitesi, genelde “ c_p ” simgesi ile sembolize edilmekte olup birimi $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ (J/kgK)’dir.

$$c_p = \frac{Q}{(\rho V)\Delta T} \quad \text{J/kgK} \quad [2.11]$$

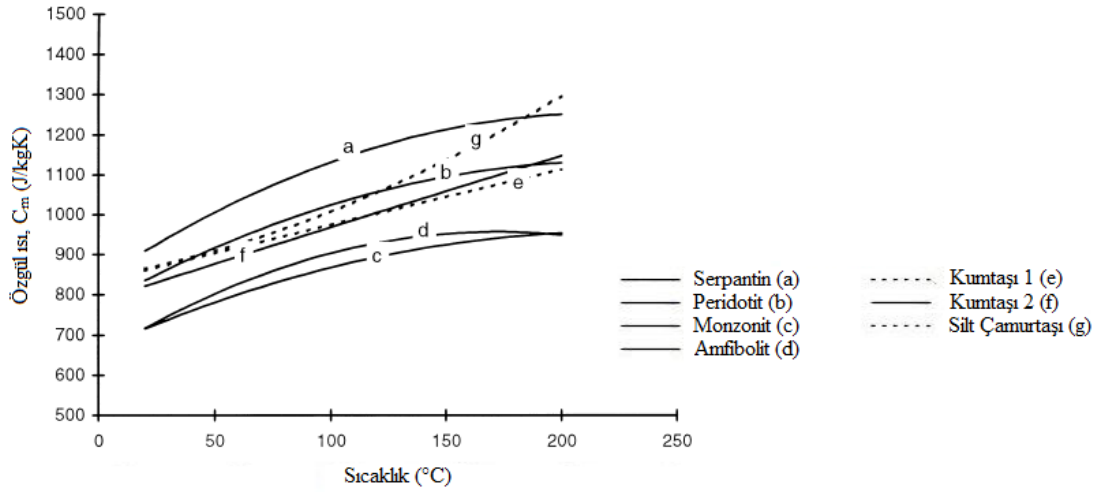
c_p	:	Özgül ısı (J/kgK)
Q	:	Isı miktarı (J)
ρ	:	Yoğunluk (kg/m^3)
V	:	Hacim (m^3)
T_w	:	Yüzey sıcaklığı (K)
ΔT	:	Sıcaklık farkı (K)

Özgül ısı kapasitesinin gerek arazide (yerinde) gerekse laboratuvarında belirlenmesine yönelik gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmaktadır.

Mohsenin (1980); özgül ısının sıcaklığın bir fonksiyonu olmakla birlikte, normal sıcaklıklarda ve fazla yüksek olmayan sıcaklık aralıklarında sabit bir fiziksel özellik olarak kabul edilebileceğini, özgül ısı değerinin ancak sıfırın altındaki çok düşük sıcaklıklarda azaldığını ifade etmiştir. Mohsenin (1980) ve Stkei (1986), özgül ısı değişimi üzerinde ürünün nem içeriğinin sıcaklıktan daha fazla etkili olduğunu belirtmişlerdir.

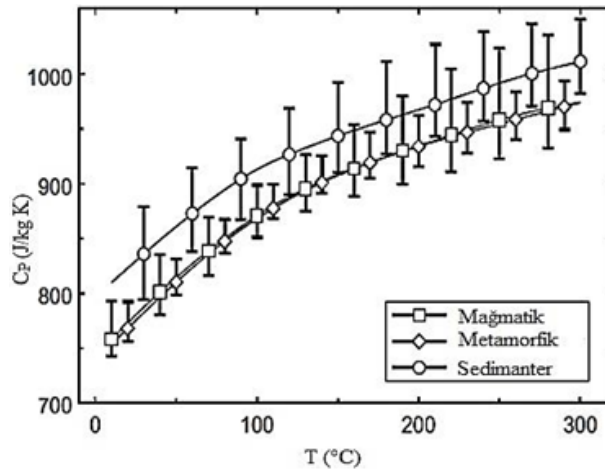
Cezairlian (1981), kayalarda yüksek basınç altında ölçülen özgül ısı kapasitesi (c_p) değerleri ile oda sıcaklığında doygun halde ölçülen özgül ısı kapasitesi (c_v) değerleri arasındaki farkın %1’den az olduğunu yaptığı çalışmalarla ortaya koymuştur.

Scharli ve Rybach (2001), özgül ısı değerinin özellikle yeryüzünde kayalardan gelen ısı ve kayalarda ısı depolanması gibi problemlerin çözümünde, tünel tasarımlarında ve ayrıca binaların soğutma veya ısıtma hesaplamalarında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. 7 farklı kayaç matrisi üzerinde özgül ısı kapasitesi ölçümleri gerçekleştirilmiş ve özgül ısı kapasitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Sıcaklığa bağlı olarak özgül ısı kapasitesinin değişimi (Scharli ve Rybach, 2001).

Vosteen ve Schellschmidt (2003), gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kayaç türlerinin özgül ısı kapasitelerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini araştırmışlardır (Şekil 2.3). Şekilden de görüleceği üzere; özgül ısı kapasitesi her kayaç türü için farklılıklar göstermektedir. Özgül ısı kapasitesi değerleri, sedimanter kökenli kayaçlar için yüksek iken metamorfik ve magmatik kayaçlar için ise hemen hemen aynı değerdedir. Aynı zamanda sıcaklık artışına bağlı olarak özgül ısı kapasitesi de artmaktadır.



Şekil 2.3 Kayaçlarda sıcaklığa bağlı olarak özgül ısı kapasitesinin değişimi (Vosteen ve Schellschmidt, 2003).

Uğur ve Demirdağ (2006); bazı doğal yapı ve kaplama taşlarında özgül ısı kapasitesi ve malzeme özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. 30x35x100 mm boyutlarında özel olarak hazırlanan prizmatik numuneler üzerinde özgül ısı kapasitesi deneylerinin yanı sıra özgül ısı kapasitesini etkileyen ana parametreler olarak belirledikleri tek eksenli basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, su emme, porozite ve P-dalga hızı ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak; çoklu regresyon analizi aracılığıyla aşağıda verilen denklemi elde etmişlerdir.

$$c_p = 0,085 \rho - 0,0014 \phi - 0,00017 UCS - 0,027 \quad [2.12]$$

- c_p : Malzemenin özgül ısı kapasitesi değeri (kcal/kg°C)
 ϕ : Porozite (%)
 ρ : Birim hacim ağırlık (gr/cm³)
 (UCS) σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

Kwon vd. (2011); Kore'de bir yeraltı araştırma tüneli civarında başlangıçtaki ısı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmalarda, 500 m ve daha sığ derinliklerden alınan granit örnekleri üzerinde diferansiyel taramalı kalorimetre aracılığıyla özgül ısı ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Sığ derinliklerde özgül ısı değeri 977 J/kgK iken 500 m derinlikte bu değer 1212 J/kgK'dir. Uğur ve Demirdağ (2006) tarafından önerilen ampirik denklemi kullanarak elde ettikleri özgül ısı değeri ise 870 J/kgK'dir.

Gündüz vd. (2013); özgül ısı kapasite değerlerinin, kayacın yapısında yer alan gözenek yapısı ve kayacın birim hacim ağırlığının bir fonksiyonu olarak değişim gösterdiğini ifade etmişlerdir. Sonuçlar; gözeneklilik artışının mermerin ısı yalıtım performansını arttırdığını, yalıtım performansı yüksek yapı kesitlerinde gözenekliliği yüksek ve birim hacim kütlesi düşük mermer plaka ve levha ürünlerinin tercih edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

2.3.2 Isı iletim katsayısı

Isı iletim kanunu ilk defa Fransız bilim adamı Jean B. Joseph Fourier tarafından 1822 yılında ortaya atılmıştır. Bu ifadeye göre birim alandan birim zaman zarfında geçen q ısı miktarı, ısının aktığı yüzeyin normali doğrultusundaki $\partial\theta/\partial x$ sıcaklık gradyanı ile orantılıdır ve "k" orantı katsayısı "Isı İletim Katsayısı" olarak adlandırılmıştır. Genellikle ısı iletim katsayısı birimi kcal/mh°C veya W/m°C olarak verilmektedir.

Sıcaklık gradyanı birim uzunluk başına sıcaklık düşmesini gösterdiğine göre, uzunluk arttıkça sıcaklık azaldığından (-) işareti gelmiştir. Bu kanunun sıcaklık gradyanının var olduğu homojen bir ortamda ifadesi aşağıda verildiği gibidir.

$$q \propto -A \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad [2.13]$$

Burada;

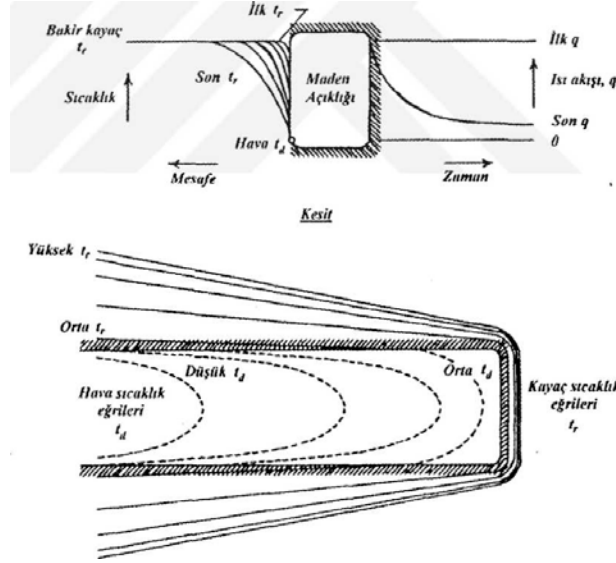
- q : Birim zamanda ısı akımı (W)
A : İçinde ısı akışı olan bölgenin alanı (m²)
 $\partial\theta/\partial x$: Isı akış yönündeki sıcaklık gradyanı (°C/m)

Bir "k" orantı katsayısı tanımlanarak yukarıdaki ifade aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{q}{A} = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \text{ veya } q = -k A \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad [2.14]$$

Giriş bölümünde de vurgulandığı üzere; yeraltı boşluklarının etrafını çevreleyen kayalar bir ısı kaynağıdır. %30-60 mertebelerinde olan bu ısı, devamlı olarak ısı transfer mekanizmasına uygun bir şekilde ocak açıklıklarına akmakta ve daha sonra ocak havası ile yeryüzüne taşınmaktadır. Isı transferi mekanizması Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Kayalardan ocak havasına doğru olan ısı transferi, yeraltı açıklığının ilk oluştuğu zaman en yüksek değerine ulaşmakta ve zamanla ısı transferi miktar olarak azalmaktadır. Ancak, özellikle mekanize ocaklarda hızlı ilerleme nedeniyle, fazla sayıda işçinin mevcut olduğu arın bölgesinde yüksek düzeyde ısı akışı söz konusu olmaktadır.

Yan kayalardan ocak boşluklarına doğru olan ısı akışını en iyi şekilde açıklayan model olan Fourier'in ısı iletimi kanunundan da görüleceği üzere; ısı iletimi cisimlerin ısı iletim katsayılarına bağlı olarak artmaktadır. Isı iletim katsayıları ise, materyalin kimyasal bileşimine, fiziksel yapısına, su içeriğine ve sıcaklığına göre değişim gösterir. Farklı kayaç türlerine ait ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (Eppelbaum vd., 2014).



Şekil 2.4 Kayaçlardan ocak havasına doğru olan ısı akışının nihai sıcaklık değişimi ile birlikte idealize edilmiş gösterimi (Hartman, 1997).

Çizelge 2.1 Farklı tür kayaçların ısı iletim katsayıları (Eppelbaum vd., 2014).

Kayaç türü	Yayımlanan veriler*		Sharma (2002)
	Numune sayısı	Isı iletimi katsayısı	Isı iletimi katsayısı
Kumtaşı	1.149	1,79	1,1-2,1
Silttaşı	476	1,58	-
Argilite, Killi şist	783	1,67	2,09
Kil	660	1,43	0,8-1,5
Marn	217	1,78	-
Kireçtaşı	781	2,37	3,44
Chock	21	1,63	-
Granit	383	2,68	3,07
Granodiyorit	83	2,79	2,63
Porfiri	137	1,74	-
Diorit	78	2,10	2,50
Andezit, Andezit bazalt	81	1,87	2,26
Bazalt	98	2,11	1,69
Diabaz	67	2,50	2,2
Gabro	116	2,47	2,57
Şist	181	2,55	-
Gnays	88	2,41	2,7-3,1
Amfibolit	47	2,39	3,33
Gnays-Granit	35	2,04	-
Kuvars	-	5,00	5,03
Anhidrit	-	-	5,43
Harzburjit	106	2,69	-
Dunit	23	2,77	-
Olivin gabro	55	2,65	-
Gabro-norite	36	2,22	-

* (Birch et al. (1942); Dakhnov and Dyakonov (1952); Lubimova et al. (1964); Magnitsky (1965); Clark (1966); Lubimova (1968); Dmitriev et al. (1969); Aliev and Mekhtiev (1970); Kutas and Gordienko (1971); Mekhtiev et al. (1971, 1972, 1973); Starikova and Lubimova (1973); Lubimova and Smirnova (1974); Aliev et al. (1977); Zinger and Kotrovsky (1979); Gillis et al.(1993); Cannat et al. (1995); Kelemen et al. (2004); Sharma.(2002))

2.3.3 Isı yayılım katsayısı (termal difüzyon)

Durgun olmayan durumlarda ısı iletimi içeren bütün problemlerde önemli bir özellik olan ve termal difüzyon olarak da bilinen ısı yayılım katsayısı; malzeme boyunca ısı yayılımının hızlılığının bir ölçüsü olup maddenin ısıl ienlik değerinin, sabit basınçta özgül ısı ve yoğunluğunun çarpımına oranı olarak tanımlanmaktadır. Doğal olarak; yüksek ısıl iletkenliğe, düşük yoğunluğa ve düşük özgül ısı kapasitesine sahip malzemeler yüksek ısı yayılım katsayısına sahiptirler. Malzemelerin ısıl enerjiyi iletme yeteneklerinin ısıl enerjiyi depolama yeteneklerine oranı olarak da ifade edilebilmektedir. Ayrıca; ısı yayılımı, ısı transferinin meydana geldiği kararsız durumlarda sıcaklığın zamanla değişimidir. “κ” simgesi ile gösterilen ısı yayılım katsayısının birimi m²/sn’dir.

Isı yayılım katsayısı (κ), malzemenin/kayacın ısıl ve fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olup aşağıdaki denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\kappa = \frac{k}{c_p \rho} \quad m^2/sn \quad [2.15]$$

- κ : Isı yayılım katsayısı (m²/sn)
- k : Isı iletim katsayısı (W/mK)
- ρ : Yoğunluk (kg/m³)
- c_p : Özgül ısı kapasitesi (J/kgK)

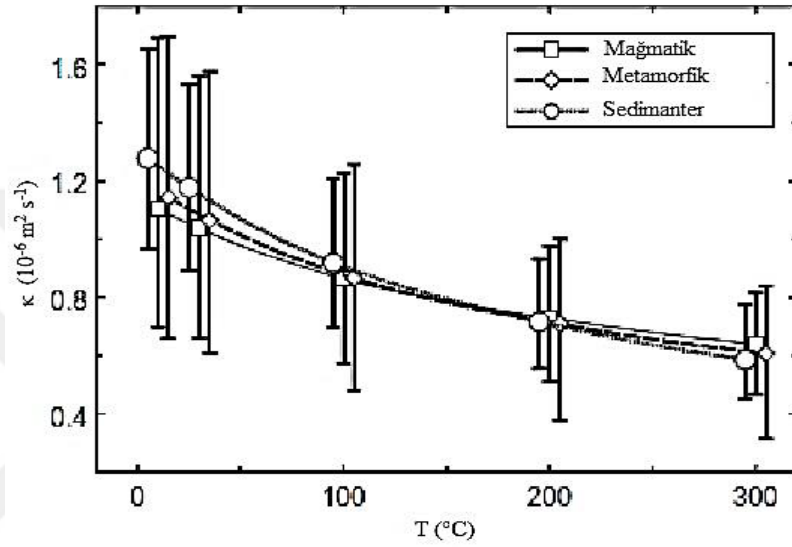
Isı yayılım katsayısı değeri büyük olan malzemeler buldukları çevredeki ısıl değişimlere hızlı bir şekilde tepki verirken küçük olan malzemeler daha yavaş tepki verirler ve denge haline gelmeleri daha uzun zaman alır.

Isı yayılım katsayısı dolaylı ve doğrudan ölçüm yöntemleri aracılığıyla belirlenebilir. Dolaylı ölçüm yönteminde ısı iletim katsayısı, yoğunluk ve sabit basınçta özgül ısı kapasitesinin belirlenmesi gerekirken doğrudan ölçüm yönteminde lineer eğri yöntemi veya logaritmik yöntem aracılığıyla ısı yayılım katsayısı tayini yapılabilmektedir. Doğrudan ölçüm amaçlı uygulanan yöntemlerde, su banyosu ve numune ile dolu difüzyon tüpünden oluşan bir cihaz kullanılmaktadır.

Isı yayılım katsayısı; kayacın su içeriği, sıcaklığı, bileşimi, yoğunluğu ve gözenekliliği vb. özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Kayaçlar üzerinde yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen ölçümler sırasında yukarıda

vurgulanan özelliklerin değişimi söz konusu olacağından, uygulanan işlem boyunca kayaç için sürekli olarak değişen bir ısı yayılım katsayısının varlığından söz edilebilir.

Vosteen ve Schellschmidt (2003), gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kayaç türlerinin ısı yayılım katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak değişimini araştırmışlardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Sıcaklığa bağlı olarak ısı yayılım katsayısının değişimi (Vosteen ve Schellschmidt, 2003).

Şekilden de görüleceği üzere;

- Isı yayılım katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki, mağmatik, metamorfik ve sedimanter kökenli kayaçların her üçü için de yaklaşık olarak aynı eğilimi göstermektedir.
- Sıcaklığın azalmasına bağlı olarak ısı yayılımını düşmektedir.

2.4 Isıl İletkenlik Ölçüm Yöntemleri

Genel olarak sabit koşullarda katı malzemelerin ısı iletkenliklerini belirlemek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu kapsamda; prob, plaka, bölünmüş bar, sıcak tel ve lazer flaş yöntemleri sayılabilir.

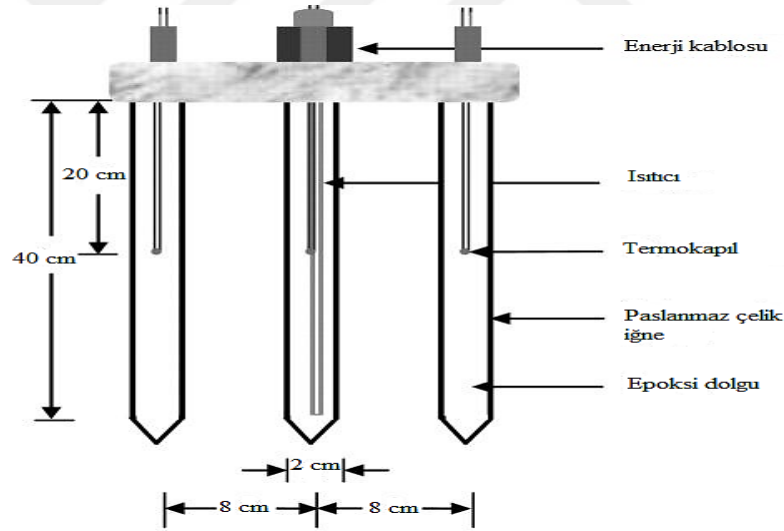
2.4.1 Prob Yöntemi

Yöntem, yarı-sonsuz bir katı içerisine yerleştirilmiş sonsuz hat ısı kaynağı teorisine dayanmakta olup hat ısı kaynağı (line heat source) yönteminin geliştirilmiş şeklidir.

Isı tepkisi, ısı kaynağından sonlu bir mesafeye yerleştirilmiş bulunan bir algılayıcı (örneğin termokupl) aracılığıyla belirlenir. Prob, ısı kaynağı ve termokuplın her ikisinin de içerisine yerleştirileceği şekilde dizayn edilmiştir (Daw vd., 2010).

Hat ısı kaynağı teorisinin kullanıldığı ilk prob uygulaması Hooper ve Lepper (1950) tarafından gerçekleştirilmiş olup toprak örneklerinin ısıl iletkenliklerinin ölçülmesi amacıyla yöneliktir. Günümüzde ise problemler; taşıma kolaylıkları ve sağlamlıklarından dolayı, birçok malzemenin ısıl iletkenliklerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmasının yanı sıra yerinde ölçümler için de uygundur (Wechsler, 1992).

Isıl iletkenlik probu iyi bir iletkenliğe sahip silindirik bir parçadır. Prob küçük çaplı ve ince bir duvara sahip içi boş bir parça olup bu durum prob içindeki radyal ısı farklarının göz ardı edilebilir olmasını sağlamaktadır. Uzunluğu boyunca bir tel ısıtıcı ile donatılmış olan prob orta noktasındaki sıcaklıkları ölçer (Şekil 2.6) (Liu vd., 2007).



Şekil 2.6 Isı iletim katsayısı ölçüm probu (Liu vd., 2007).

Teori, üniform bir başlangıç sıcaklığında sonsuz homojen bir yapı içindeki sabit dirençli hat ısı kaynağını ele alır. Bu koşullar altında yapı içindeki herhangi bir noktadaki sıcaklık, zaman ve ısıl iletkenliğin bir fonksiyonu olacaktır.

Örnek numunelerin ısı iletim katsayısı, ASTM 5334-14 standardında iğne prob olarak adlandırılan yöntemle göre hesaplanmaktadır.

$$k = \frac{c Q}{4 \pi L S} \quad [2.16]$$

$$S = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad [2.17]$$

$$k = \frac{c Q}{4 \pi L (T_2 - T_1)} \ln t_2 / t_1 \quad [2.18]$$

- c : Kalibrasyon faktörü
 Q : Isı miktarı (W)
 L : Isıtıcının uzunluğu (m)
 S : Sıcaklık farkının, bu farkın oluşması için geçen süreye oranı
 T₁ : Başlangıç sıcaklığı (K)
 T₂ : Nihai sıcaklık (K)
 t₁ : Başlangıç zamanı (sn)
 t₂ : Nihai zaman (sn)

Eğer prob çapı 2,5 mm'den küçük ise, "c" ihmal edilebilir.

$$k = \frac{Q}{4 \pi L (T_2 - T_1)} \ln t_2 / t_1 \quad [2.19]$$

Eğer ısı miktarı; ölçülen voltaj (E, Volt), ısıtıcı telin toplam direnci (R, Ohm), ısıtıcı tel boyunca geçen akım (I, Amper) ve ısıtıcı telin uzunluğundan (L, m) yararlanılarak hesaplanırsa ısı iletim katsayısını veren eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q = \frac{I^2 R}{L} = \frac{E I}{L} \quad W/m \quad [2.20]$$

$$k = \frac{Q}{4 \pi (T_2 - T_1)} \ln t_2 / t_1 \quad [2.21]$$

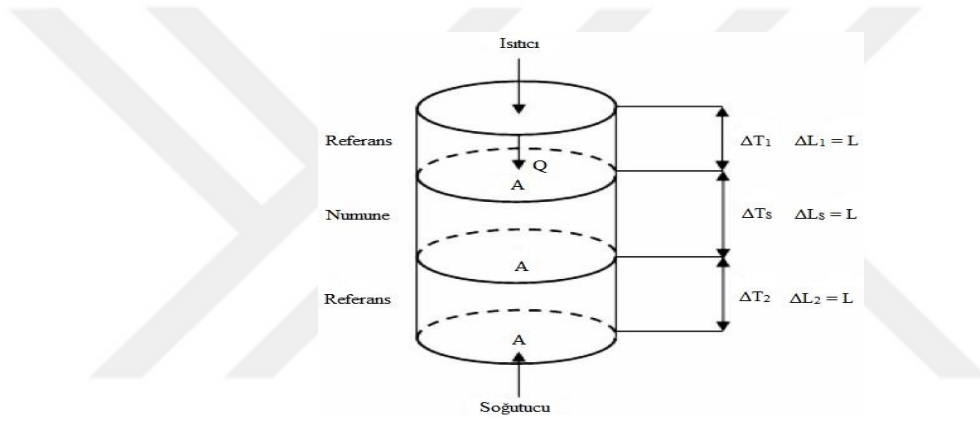
Bu yöntemin uygulanması birçok düzeltme faktörünün dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bunlar; belirli bir prob çapı için zaman düzeltme katsayısı, minimum uzunluk/çap oranı için aksenal hata akış faktörü ve örnek sınırlarındaki sıcaklık değişiminden sakınmak için örnek boyut faktörüdür.

2.4.2 Bölünmüş bar yöntemi

Bu yöntem, aksenal ısıl iletkenlik ölçüm yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılan ölçüm yöntemi olup denge durumu (steady-state) yöntemlerinden biridir. Denge durumu tekniklerinde ölçümler, genellikle sistem dengeye geldiği zaman yani

malzemenin sıcaklığının zamana göre değişmediği koşullarda gerçekleştirilir. Sistem iyi tasarlanmış bir deney düzeneğine gereksinim göstermektedir.

Uygulamada sağlam kayaların ısı iletim katsayılarının ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan bölünmüş bar yöntemi, numune boyutunun yanı sıra basınç ve sıcaklığa bağlı olarak birçok farklı uygulamalara sahiptir. Isı iletim katsayısı bilinmeyen bir numune, ısı iletim katsayıları bilinen ve referans numuneler olarak adlandırılan iki numune arasına yerleştirilir (Şekil 2.7). ASTM E1225-13 standardına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda; örnek numunelerin ısı iletim katsayısı, referans numunelerin ısı iletim katsayılarından yararlanılarak aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanır.



Şekil 2.7 Bölünmüş bar yöntemi ölçüm düzeneği (Url-1).

$$\frac{Q}{A} = \frac{K_s \Delta T_s}{L} = K_R \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \frac{1}{L} \quad [2.22]$$

$$K_s = K_R \frac{\frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}}{\Delta T_s} \quad [2.23]$$

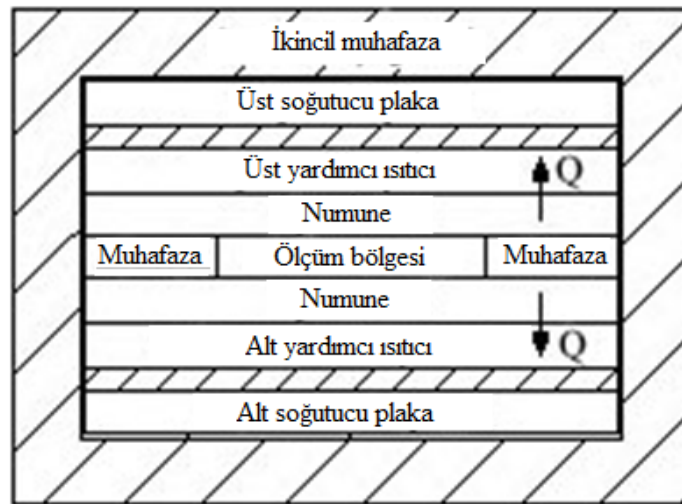
- Q : Isı miktarı (W)
- A : Isıl iletkenliği bilinmeyen numunelerin alanı (m²)
- ΔT₁ : Birinci referans numunesinin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)
- ΔT₂ : İkinci referans numunesinin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)
- ΔT_s : Örnek numunenin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)
- ΔL₁ : Birinci referans numunesinin uzunluğu (m)
- ΔL₂ : İkinci referans numunesinin uzunluğu (m)
- K_R : Referans numunenin ısı iletim katsayısı (W/m°C)

2.4.3 Muhafazalı sıcak plaka yöntemi

Bu yöntem; izolasyon malzemeleri gibi ısı iletkenlikleri düşük malzemelerin ısı iletkenliklerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan, güvenilir ve çok yönlü bir yöntemdir. Dilim formundaki örnekler için en uygun yöntem olup dengeli eş yönlü ısı akış tekniği kullanılır. Bu tekniğin ayrıntıları ASTM C-177 standardında verilmiştir.

Bu yöntemde; ısı kaynağı, örnek ve ısı alıcı birbirleriyle temas halinde olacak şekilde yerleştirilirler. Bütün yanal yüzeyleri diferansiyel termokupllar aracılığıyla kontrol edilen muhafazalı bir ısıtıcı bölümü ile çevrili olan düz, elektriksel olarak ısıtılan bir ölçüm bölümü, numunenin sıcak yüzeyi boyunca etki eden bir ısı kaynağı görevini görmektedir. Isı muhafaza levhaları aynı sıcaklıkta bitişik yüzeyler şeklinde yerleştirildiklerinden dolayı kaynak, örnek ve alıcı sınırlarında ısı kaybı önlenmiş olur. Bu yöntemde örneğe giren bütün ısının örnek tarafından aktarıldığı kabul edilmektedir. Numuneler genellikle oldukça büyük olmasına rağmen bu durum uygulamada bir güçlük yaratmamaktadır.

Muhafazalı sıcak plaka yöntemi aracılığıyla ısı iletkenlik ölçümü; oda sıcaklığı, düşük sıcaklıklar (-180°C 'ye kadar) ve yüksek sıcaklıklar (600°C ve daha yüksek) olmak üzere üç farklı sıcaklık kategorisinde yapılabileceği gibi sistem tek veya çift numuneli olarak da düzenlenebilir. Şekil 2.8'de muhafazalı sıcak plaka düzeneğinin mekanik bileşenlerinin genel olarak düzenlenmiş durumu görülmektedir.



Şekil 2.8 Muhafazalı sıcak plaka ölçüm düzeneği (Url-2).

ASTM C177-04 standardına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda; örnek numunelerin ısı iletim katsayısı, ASTM C1045-07 standardında verilen formülasyona göre hesaplanmaktadır.

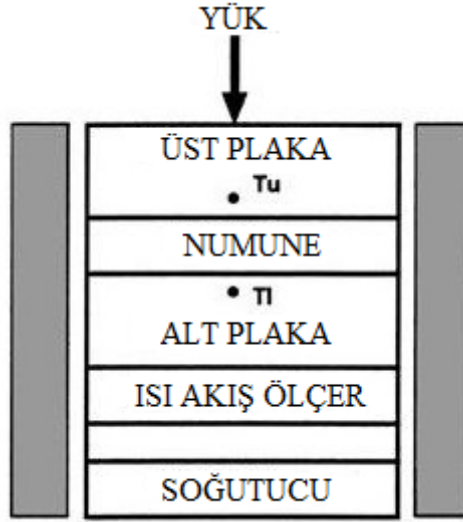
$$k = \frac{Q \cdot d}{A (T_h - T_c)} \quad [2.24]$$

- Q : Isı miktarı (W)
A : Isı akışına dik doğrultudaki ölçüm alanı (m²)
d : Numunenin kalınlığı
T_h : Numunenin sıcak yüzeyinin sıcaklığı (K)
T_c : Numunenin soğuk yüzeyinin sıcaklığı (K)

2.4.4 Muhafazalı (veya muhafazasız) ısı akış ölçer yöntemi

Muhafazalı ısı akış ölçer yönteminde ısı miktarını ölçmek için bir ısı akış ölçeri kullanılmakta olup ısı iletkenlik ölçümü ASTM E1530-11 standardına göre yapılmaktadır. Yöntem karşılaştırmalı kesme çubuk yöntemine (bölünmüş bar) oldukça benzerdir. Uygulamada referans numune çok düşük ısı iletkenliğe 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 2.9). En alt yüzey, kalibre edilmiş bir ısı akış transducer'ının (dönüştürücü) bir parçasıdır. Isı; numunenin en üst yüzeyinden en alt yüzeyine doğru akarken, yığına bir sıcaklık gradyanı tesis olur. Isıl dengeye ulaşıldıktan sonra, ısı akış transducer'ından çıkan ısı ile birlikte numunenin her iki yüzeyi arasında (alt ve üst) oluşan sıcaklık farkının ölçülmesi suretiyle kalınlığı bilinen bir numunenin ısı iletkenliği hesaplanabilir.

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, pnömatik bir yük uygulanması aracılığıyla ve eğer gerekirse ısı iletken bir ara yüz bileşiği kullanmak suretiyle küçük değerlerde muhafaza edilebilir.



Şekil 2.9 Muhafazalı ısı akış ölçer düzeneği (Url-3).

Benzer şekilde; ısı akış ölçerler, malzemenin ısı iletkenliğine bağı olarak hemen hemen her malzemedan (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 diğere 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 yığınınını çevreler. Sadece oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde muhafazalı sıcak bir bölüme gereksinim yoktur.

Örnek numunenin ısı iletim katsayısı aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$R_s = \frac{N(T_1 - T_2)}{Q} - R_0 \quad [2.25]$$

$$C_s = \frac{l}{R_s} \quad [2.26]$$

Homojen malzemeler için:

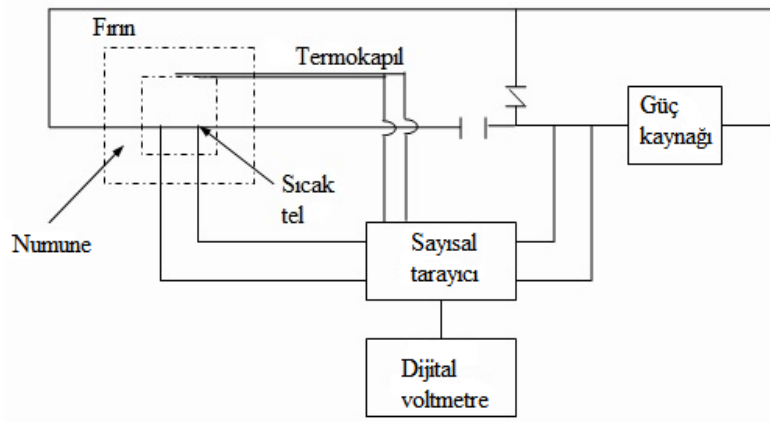
$$R_s = \frac{\Delta x}{k} \quad [2.27]$$

- Q : Isı miktarı (W)
 A : Numunenin kesit alanı (m^2)
 Δx : Numunenin kalınlığı (mm)
 N : Isı akış transducerı kalibrasyon sabiti (W/m^2mV)
 k : Isı iletim katsayısı (W/mK)
 C_s : Örnek numunenin ısı iletkenliği (W/m^2K)
 R_s : Isıl direnç (m^2K/W)
 R_0 : Temas yüzeylerindeki kontak direnç
 T_1 : Numunenin yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 T_2 : Numunenin diğer yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)

2.4.5 Sıcak tel yöntemi

Sıcak tel yöntemi yalıtım tuğlaları, toz veya lifli malzemeler gibi refrakter malzemelerin ısı iletkenliklerini ölçmek için yaygın olarak kullanılmakta olup ölçümler ASTM C1113 standardına göre yapılmaktadır. Yöntemde geçici radyal akış tekniği söz konusu olduğundan dolayı, yöntem izotropik numuneler gerektirmektedir. Yöntem göreceli olarak düşük ısı iletkenliğe sahip sıvıların ve plastik malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde daha sınırlı bir kullanıma sahiptir.

Sıcak tel yöntemi, deney malzemesine yerleştirilmiş lineer bir ısı kaynağından (sıcak tel) itibaren tanımlanmış belirli bir mesafedeki sıcaklık ölçümüne dayanan standart geçici dinamik bir yöntemdir. Isı kaynağının sabit ve deney numunesinin uzunluğu boyunca üniform bir ısı çıkışına sahip olduğ u kabul edilirse, ısı iletkenlik, bilinen bir zaman aralığı boyunca elde edilen sıcaklık değişimi sonuçlarından direkt olarak elde edilebilir (şekil 2.10).



Şekil 2.10 Sıcak tel yöntemi ölçüm düzeneği (ASTM C1113).

Yöntemin ideal matematiksel modeli; sıcak telin, sabit bir başlangıç sıcaklığına sahip homojen ve izotropik malzemedeki sonsuz bir ortam içinde yer alan ideal, sonsuz ince ve uzun hat ısı kaynağı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Isıtma telinin birim uzunluğu için birim zamanda üretilen ısı miktarı (q, W/m) sabit ise, t=0 zamanından başlayarak tel çevresinde radyal ısı akışı meydana gelir. Daha sonra ısı kaynağından itibaren “r” radyal mesafedeki sıcaklık artışı $\Delta T (r, t)$ aşağıda verilen eşitlik aracılığıyla hesaplanabilir.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\kappa t}{r^2 C} \quad [2.28]$$

- q : Isı miktarı (W/m)
- k : Isı iletim katsayısı (W/mK)
- κ : Isı yayılım katsayısı (m^2/sn)
- C : Exp(g)
- g : Euler sabiti (0,5772157)
- r : Isı kaynağından olan radyal mesafe (m)
- t : Isıtma başlangıcından itibaren geçen süre (sn)

Eşitlik; sadece $r^2/4\kappa t \ll 1$ koşulunun sağlanması durumunda başka bir ifadeyle mutlak minimum zamandan (t_{min}) daha büyük ve yeteri kadar uzun bir zaman ve küçük bir “r” mesafesi için geçerlidir. Bu nedenle, zamanın bir fonksiyonu olarak sıcaklık artışının ölçümü $\Delta T (r, t)$ ısı iletkenliği belirlemek için kullanılabilir. Bu durumda, zamanın doğal logaritması olan $\ln t$ 'ye karşı sıcaklık artışının $\Delta T (r, t)$ grafiğinin çizilmesi ve grafiğin lineer kısmının eğimi olan “K” değerinin elde edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, ısı iletim katsayısı aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanabilir.

$$k = \frac{q}{4\pi K} \quad W/mK \quad [2.29]$$

- q : Isı miktarı (W/m)
- K : $\Delta T - \ln t$ grafiğinin lineer kısmının eğimi

Sıcak tel yöntemi çeşitli deneysel değişikliklerle birlikte uygulanabilir. Şöyle ki; standart çapraz teknikte, çapraz tel iki eşit büyüklükteki numune arasında zemin yuvalarına gömülüdür. Çaprazlama, ısıtma teli ve sıcaklık sensörü olarak görev yapan termokupl çıkışlarından ibarettir. Termokuplın sıcak noktası ısıtma teli ile doğrudan temas halindedir. Direnç tekniğinde ise, sıcak tel aynı zamanda sıcaklık

sensörü olarak da görev yapmaktadır. Burada sıcaklık, sıcak telin ısınması nedeniyle dirençte meydana gelen değişimin bir ölçümüdür. Elektriksel olarak iletken malzemelerde gerçekleştirilen ölçümlerde sıcak tel ve termokupl telleri veya potansiyel uçları numuneden izole edilmektedir. İzolasyon; tellerin üzerinin iletken olmayan bir kaplama ile kaplanması, ısıtıcı ve sıcaklık sensörünün ince bir kaplama ile çevrelenmesi veya deney malzemesinin içerisine yerleştirilen iğne prob aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu teknik, sıcak tel prob yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

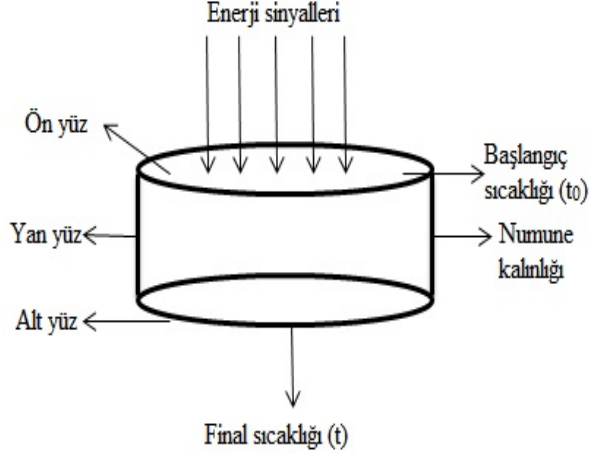
Sıcak tel prob yönteminde geçici sıcak tel yönteminin ilkeleri kullanılmaktadır. Burada hem ısıtma teli hem de sıcaklık sensörü (termokupl), deney malzemesinin içerisine yerleştirilen ve sıcaklık sensörünü ve sıcak teli elektriksel olarak izole eden bir prob içerisine hapsolünmüştür.

2.4.6 Lazer flaş yöntemi

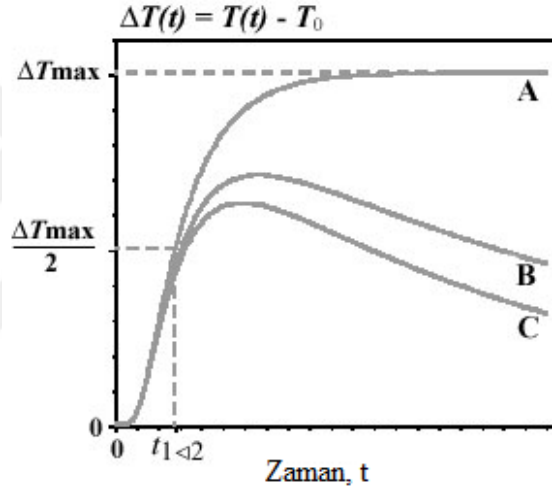
Bu yöntem Parker vd. (1961) tarafından geliştirilen bir yöntem olup ısı yayılımının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, numunenin ön yüzeyinde üretilen kısa bir enerji sinyalinin numunenin arka yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık artışının ölçümüne dayanmaktadır. Hızlı bir yöntem olup doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar vermektedir.

Bu yöntemde numune önce belirli bir t_0 sıcaklığında denge haline getirilir. Bu aşamadan hemen sonra numunenin ön yüzeyine ani ve yüksek enerjili bir sinyal gönderilir. Paralel yüzeylerden birine bir lazer kaynağından gelen sinyaller değdiği yüzeyde sıcaklık artışına neden olur. Numunenin diğer tarafındaki yüzeyde meydana gelen zamana bağlı sıcaklık artışı ölçülür. Daha sonra ısı yayılımını bir ısıl değişim çizelgesi aracılığıyla hesaplanabilir. Yönteme ait ölçüm düzeneği Şekil 2.11'de verilmiştir.

Farklı deneysel koşullarda sıcaklık artış eğrilerine ait tipik şekiller Şekil 2.12'de verilmiştir. Isı kaybındaki artışa göre, numunenin arka yüzeyindeki sıcaklık B eğrisinde görüldüğü üzere bir tepe noktasına ulaştıktan sonra düşecektir. Isı kaybının olmadığı durumda, numunenin arka yüzey sıcaklığı maksimum bir değere ulaşacak ve ısı kaybının olmaması nedeniyle A eğrisinde görüldüğü gibi sonsuz bir zaman periyodu boyunca orada kalacaktır.



Şekil 2.11 Lazer flaş yöntemi ölçüm düzeneği (Url-4).



Şekil 2.12 Değişik deneysel koşullar için sıcaklık artış grafikleri (Url-5).

Parker vd.'nin (1961) orijinal yönteminde numunelerin adyabatik ve izotropik olduğu kabul edilmektedir. Bu yöntemde ısı yayılımı, termogramda maksimum sıcaklık artışının yarısına ulaşmak için göz önüne alınan süre ($t^{1/2}$) ve örnek malzemenin kalınlığı (L) aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\kappa = 0,1388 \frac{L^2}{t} \quad m^2/sn \quad [2.30]$$

- κ : Isı yayılım katsayısı (m^2/sn)
- L : Numunenin kalınlığı (m)
- t : Maksimum sıcaklık artışının yarısı için geçen süre (sn)

Bir referans numunenin özgül ısı değerinin elde edilmesi ve yoğunluk değerinin bilinmesi durumunda ısı iletim katsayısı aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$k = \kappa(T) c_p(T) \rho(T) \quad [2.31]$$

- k : Isı iletim katsayısı (W/mK)
κ : Isı yayılım katsayısı (m²/sn)
c : Özgül ısı (J/kgK)
ρ : Yoğunluk (kg/m³)

Bu yöntemin uygulanabilirliği ideal numune koşulları nedeniyle sınırlanmaktadır. Yöntemi pratik deneysel koşullara daha uygun hale getirmek için son birkaç yılda; sinyal süresi, ısı kayıpları, homojen olmayan malzemeler ve üniform olmayan ısıtma gibi deneysel faktörlerle de uygulanabilen diğer yöntemler geliştirilmiş bulunmaktadır.

Lazer flaş yönteminin avantaj ve dezavantajlarını aşağıda verildiği gibi sıralamak mümkündür.

Avantajları:

- i. Numune boyutunun küçük olması (birkaç mm kalınlık ve 12 mm çap)
- ii. Ölçümlerin birkaç saniye içerisinde gerçekleştirilebilmesi
- iii. Geniş bir ısı yayılım aralığının (10⁻³-10 cm²/sn) tek bir cihaz aracılığıyla belirlenebilmesi
- iv. Isı iletim katsayısı, özgül ısı gibi diğer termodinamik parametrelerin de belli koşullar altında bu yöntem kullanılarak ölçülebilmesi
- v. Numunelerin sabit durumlu koşullarda söz konusu olan sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda test edilebilmesi

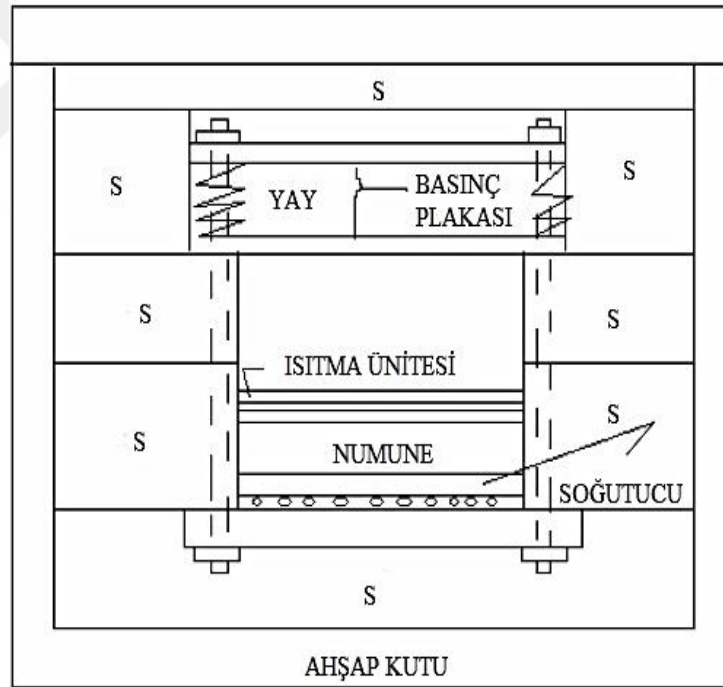
Dezavantajları:

- i. Optik algılama, ısı sinyali üretimi ve yüksek hızlı veri kazanımı gibi özelliklere sahip cihazların daha pahalı olması
- ii. Homojen olmayan ve gözenekli malzemelerle gerçekleştirilen çalışmalarda termogram (ısı değişim çizelgesi) işlemleri için daha fazla dikkate gereksinim göstermesi

2.5. Kayaçların Isı İletim Katsayılarının Laboratuvar Ortamında

Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Konu ile ilgili ilk ayrıntılı çalışma Ashworth ve Ashworth (1979) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar, kayaçların ısı iletkenliklerinin yeterli doğrulukta ve hızlı bir şekilde ölçümüne olanak veren basit muhafazasız bir plaka sisteminden ibaret olan bir düzenek geliştirmişlerdir (Şekil 2.13). Lineer ısı akış düzeneği; ısı kapasitesi bilinen bir ısıtıcı plaka, çap/kalınlık oranı en az 5/1 olan disk şeklindeki bir numune, numunenin mutlak sıcaklık değerini ve numune boyunca oluşan sıcaklık farkını ölçmek için 2 adet termokupl ve soğutma ünitesinden oluşmaktadır. Sisteme; ısı temas sağlamak ve sağlanan ısıyı muhafaza etmek amacıyla, çelik plaka ve yaylar aracılığıyla düşük miktarda bir basınç uygulanmaktadır. Numunenin bulunduğu kısım strofoam veya fiberglas malzeme ile izole edilmiş olup düzenek %5 hassasiyetle ısı iletkenlik ölçümü yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

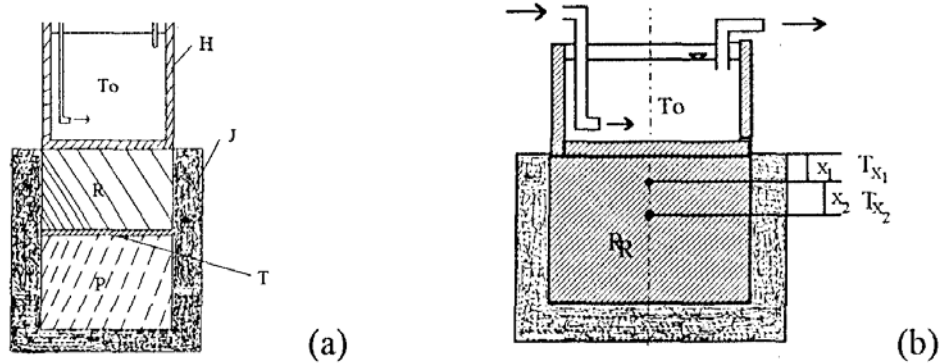


Şekil 2.13 Muhafazasız plaka düzeneği (Ashworth ve Ashworth, 1979).

Barla vd. (1983) tarafından Campiano madeninde (Grosseto, İtalya) gerçekleştirilen bir araştırmada, düşük ve yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerin ısı iletkenliklerinin ölçülmesi amacıyla iki farklı ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Düşük ısı iletkenliğe sahip kayaçlarda kullanılan yöntemde (Şekil 2.14a) 50 mm çapında ve

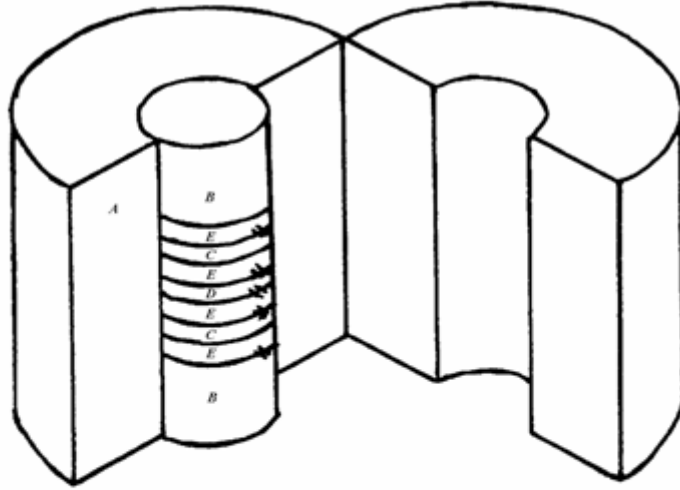
10-20 mm kalınlığındaki bir kayaç levhası (R), ısı kaynağı olarak işlem gören bir bakır plaka (H) ve soğutucu olarak görev yapan bir bakır silindir (P) arasına sıkıştırılmaktadır. Bakır plakanın sıcaklığı, su dolaşımı sağlanması suretiyle sabit bir “ T_0 ” sıcaklığında muhafaza edilmektedir. Kayaç levhası ve silindir ısı olarak izole edilmekte, sıcaklık delik içerisine yerleştirilmiş ve çok kanallı bir ölçme düzeneği ile irtibatlı bir ısı direnç aracılığıyla ölçülmektedir. Belirli bir “ t ” anından sonra bakır plaka “ T ” sıcaklığına ulaşmakta ve elde edilen veriler aracılığıyla ısı iletim katsayısı tayin edilmektedir.

Yüksek ısı iletkenliğe sahip numunelerde kullanılan yöntemde (Şekil 2.14b) ise, 50 mm çapında ve 150-200 mm uzunluğundaki silindirik kaya numunesi izole edilmekte ve bir ısı kaynağı aracılığıyla sabit bir “ T ” sıcaklığına ısıtılmaktadır. Kayaç içerisindeki sıcaklıklar, $x_1=25$ mm ve $x_2=2x_1$ mesafelerinde ölçülmektedir. Bu deney, literatürdeki yüzey sıcaklığı tanımlanmış yarı-sonsuz katının durumuna benzer.



Şekil 2.14 Laboratuvarda ısı iletkenliğinin belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği (Barla vd., 1983).

Mousset-Jones ve McPherson (1986), kayaçların ısı iletkenliklerinin laboratuvar ortamında ölçümü amacıyla; basit muhafazasız bir plaka düzeneği üzerinde küçük değişiklikler yaparak yeni bir düzenek elde etmişlerdir (Şekil 2.15). Bu yeni düzenek ile Homestake Altın Madeni’nden (South Dakota, USA) getirilen kayaçlardan alınan 1,27 cm kalınlığında ve 10-16 cm çapındaki karot numunelerinin ısı iletkenliklerini ölçmüşlerdir. Bu değerler bir ısı karşılaştırıcısı (termal komparatör) kullanılarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve sonuç olarak muhafazasız plaka düzeneğinde ısı kaybının %5 olduğunu belirlemişlerdir.



- A. İzolasyon
- B. 10 cm çapında–20 cm uzunluğunda soğutucu
- C. 1,125 cm kalınlığında ve 10 cm çapında kayaç numuneleri
- D. Isıtıcı plaka (0,562 cm x 10 cm çap)
- E. Isıl direnç plakaları (0,48 cm x 10 cm çap)

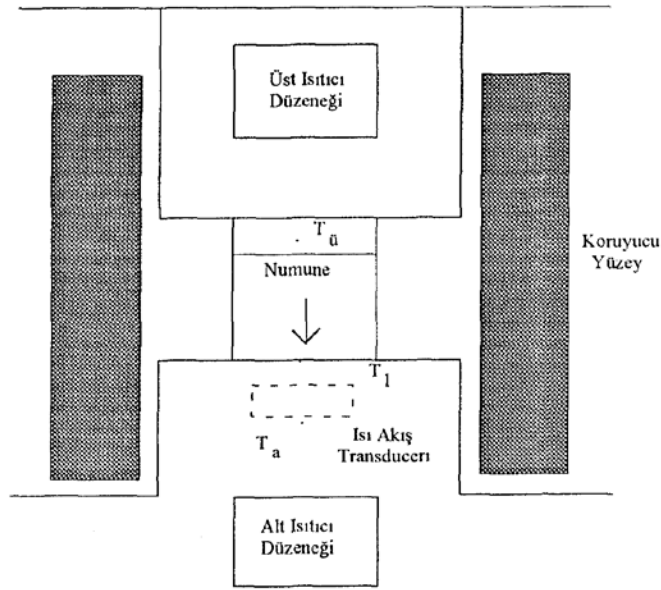
Şekil 2.15 Muhafazasız plaka kolonu (Mousset-Jones ve McPherson, 1986).

Bu düzende farklı sıcaklıklarda ısıtılmış iki yüzey arasında bir deney numunesi yerleştirilmektedir. Bu durumda daha sıcak yüzeyden daha soğuk yüzeye doğru sabit bir ısı akışı gerçekleşecektir. Numune boyunca geçen ısı miktarı en alt yüzeyin altına yerleştirilen ince bir ısı akış transduceri aracılığıyla ölçülür. Giriş odası yanal ısı transferini minimize etmek için silindirik muhafazalı bir ısıtıcı ile çevrilidir. Isı akış transduceri, plastik bir kalıp içerisine yerleştirilmiş çok bağlantılı bir termopilden ibarettir. Termopilin çıkış değeri transducer boyunca geçen ısı akışı ile orantılıdır. İlişki sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı; transducer, cihazın sıcaklık aralığı boyunca kalibre edilmelidir. Deney düzeneği bir ısıtıcı ve arasına numune yerleştirilen silindirik iki adet ısı akı transducerından ibarettir. Ayrıca sistemin ısı kaybını azaltmak için izolasyon kullanılmış, numuneler deney sırasında nemini kaybetmesin diye özel bir plastik poşet içerisine yerleştirilmiştir.

Bernasconi vd. (1990); ısı iletkenlik ve özgül ısıyı ölçmek için, ısı iletkenlik gevşetme tekniğinin bir uzantısı olan ve bir numunenin ısı iletkenliği olarak gevşetilmesi sırasında gözlenen sıcaklık davranışının numunenin ısı iletkenliğine ve özgül ısısına bağlı olmasından dolayı, tek bir ölçüm ile her iki özelliğin belirlenmesine olanak veren dinamik yöntem üzerinde çalışmışlardır. Farklı kütle yoğunluklarına sahip

numunelerden elde edilen sonuçlar, diğer yöntemler kullanılarak elde edilen verilerle uyum içindedir.

Henry ve Coumou (1991); nihai kullanım ürünlerinden olan plastik ve seramik gibi malzemelerin ısı iletkenliklerini doğrudan ölçmek için, katı veya erimiş halde 300°C'ye kadar ölçüm yapabilen tam otomatik yeni bir ölçüm düzeneği dizayn etmişlerdir (Şekil 2.16).



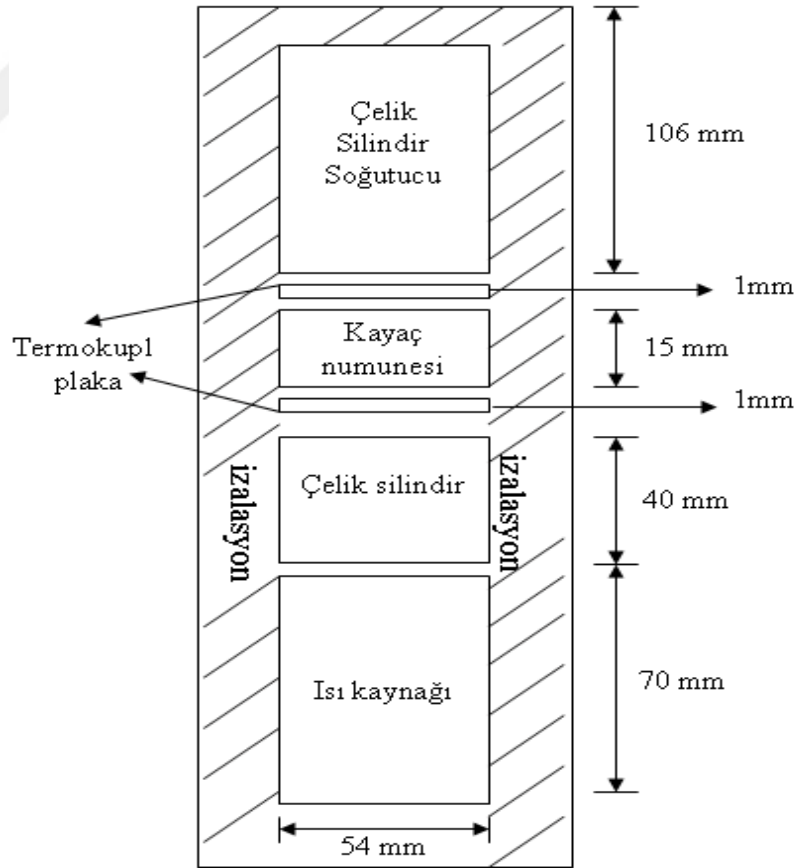
Şekil 2.16 Bazı malzemelerin ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan düzenek (Henry ve Coumou, 1991).

Verma vd. (1991); üç fazlı sistemlerin ısı iletkenliklerinin etkin bir şekilde ölçümü ve önceden tahmini üzerine bir araştırma yapmışlar, geliştirmiş oldukları sıcaklık farkı algılama probu aracılığıyla taneli malzemelerin bütün termofiziksel özelliklerinin aynı anda ve daha hassas olarak belirlenebilmesine olanak sağlamışlardır.

Banerjee vd. (1992); diferansiyel platin dirençli termometre aracılığıyla sabit olmayan durumlu sıcak tel yöntemini kullanarak ateşe dayanıklı tuğlaların ısı iletkenliklerini, 1250°C'ye kadar olan sıcaklıklarda ölçüme olanak sağlayan bir ekipmanla ölçmüşlerdir.

Güyağüler ve Önder (1995); Karadon-Zonguldak bölgesinde gerçekleştirilen proje çalışmaları kapsamında, kayaçların ısı iletkenliklerinin laboratuvarında belirlenmesi

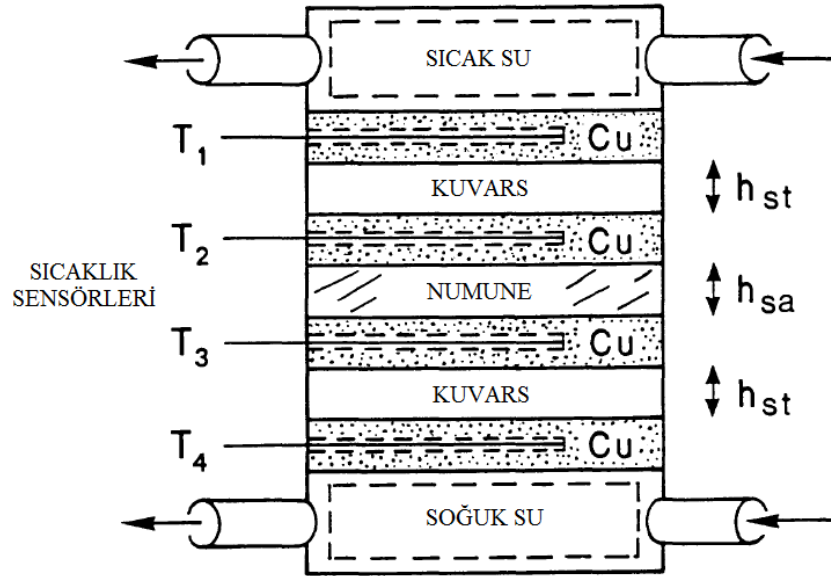
amacıyla Mousset-Jones ve McPherson (1986) tarafından geliştirilen düzenek üzerinde birtakım değişiklikler yaparak yeni bir düzenek geliştirmişlerdir. Düzeneğin en alt kısmında ısı kapasitesi bilinen ve sıcaklık kontrol ünitesi ve bir kontaktörden oluşan kontrol sistemi bulunmaktadır. Isı kaynağı ile numune arasında, ısı enerjisi akışının düzenli olmasını sağlayan paslanmaz çelikten imal edilmiş 54 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda silindirik bir malzeme vardır. 54 mm çapında ve 15 mm kalınlığındaki kayaç numunesi aynı çapta ve yaklaşık 1 mm kalınlığındaki iki bakır termokupl plaka arasına yerleştirilmiştir. Düzeneğin en üst kısmında ise, üst yüzeyi oda atmosferine açık bırakılan 54 mm çapında ve 108 mm uzunluğunda paslanmaz çelikten imal edilmiş ve soğutucu olarak görev yapan silindirik bir malzeme bulunmaktadır. Üst üste yerleştirilen bu parçaların etrafı, ısı kaybının önlenmesi amacıyla, cam yünü kullanılarak izole edilmiştir (Şekil 2.17). Numunenin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak Fourier'in ısı iletim kanunu aracılığıyla ısı iletim katsayısı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2.17 Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Güyagüler ve Önder, 1995).

Nükleer atıkların nihai bertarafından sorumlu uzman bir kuruluş olan POSIVA tarafından yönetilmiş ve farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalar kapsamında; Kukkonen ve Lindberg (1995, 1998) ve Kukkonen vd. (2011) Finlandiya'da bulunan Olkiluoto (Eurajoki), Romuvaara (Kuhmo) ve Kivetty (Aeaenekoski) bölgelerindeki kayaçların ısı özelliklerini araştırmışlardır.

Kukkonen ve Lindberg (1995), söz konusu üç bölgeden alınan kayaç örneklerine ait 27 numune üzerinde bölünmüş bar yöntemini kullanarak ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.18). Numuneler, asidik ve orta dereceli (nötr) magmatik ve metamorfik kayaçlara ait örneklerdir. Numunelerin mineralojik bileşimleri; örneklerden alınan ince kesitlerin nokta sayacı tekniği aracılığıyla polarizasyon mikroskobu altında incelenmesi sonucu belirlenmiş olup kayacı oluşturan ana mineraller plajiyoklas, kuvars, K-feldspat, biyotit ve muskovittir. Kayaçların ortalama ısı iletim katsayısı değerleri 2,41-4,23 W/mK aralığında değişmektedir.



Şekil 2.18 Bölünmüş bar yöntemi ile ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Kukkonen ve Lindberg, 1995).

Mineralojik bileşim verilerinden teorik olarak hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri ölçülen değerlerle uyum içerisindedir. Mikalı gnays için ısı iletim katsayısı anizotropisi belirlenmiş ve sonuçlar bu kayaç türünün ısı olarak anizotropik ve 1,3 değerinde bir anizotropi katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Ölçülen ısı iletim

katsayısı değerleri kullanılarak planlanan nükleer atık depolarının hemen civarında bulunan ana kayacın yığın ısı iletim katsayısı tahmin edilmiştir. Değerler; Olkiluoto için 3,04-3,14 W/mK, Romuvaara için 2,63-2,78 W/mK ve Kivetty için ise 2,65-2,72 W/mK aralığındadır.

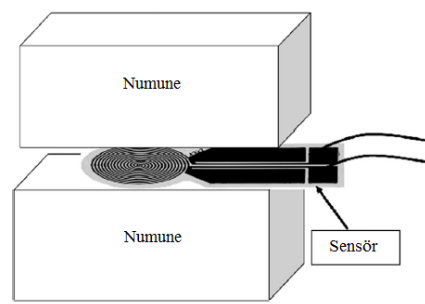
Kukkonen ve Lindberg (1998) söz konusu üç bölgedeki karot örneklerinden alınan 35 adet kayaç rneği üzerinde sabit durumlu laboratuvar yöntemini kullanan bölünmüş bar cihazı ile ısı iletenliği ve geçici ısı iletim cihazı ile ısı yayınımlı ölçmüşler, kalorimetrik yöntem ile özgül ısı kapasitesini belirlemişlerdir. İnce kesitler aracılığıyla belirlenen mineral bileşimi verilerinden yararlanarak ısı iletim katsayısı değerlerini hesaplamışlar, ısı iletim katsayısı, özgül ısı kapasitesi ve llen yığın kayaç yoğunluğundan yararlanarak ısı yayınımlı katsayısı değerini belirlemişlerdir.

Hastholmen numunelerinin ısı iletim katsayısı değerleri, pyterlitic granitler için 2,3-2,8 W/mK ve eşit taneli veya porfiritik granitler için ise 3,4-3,5 W/mK değerleri arasındadır. Posiva kayaçlarının özgül ısı kapasitesi değerleri 770-830 J/kgK aralığında değişmekte olup bölgesel bazda; Olkiluoto için 798 ± 20 J/kgK, Romuvaara için 824 ± 15 J/kgK, Kivetty için 809 ± 16 J/kgK ve Hastholmen için ise 807 ± 11 J/kgK aralığındadır. Isı yayınımlı katsayısı değerleri ise; Olkiluoto için $1,42 \pm 0,38 \times 10^{-6}$ m²/s, Romuvaara için $1,19 \pm 0,16 \times 10^{-6}$ m²/s, Kivetty için $1,25 \pm 0,25 \times 10^{-6}$ m²/s ve Hastholmen için ise $1,42 \pm 0,22 \times 10^{-6}$ m²/s aralığında değişmektedir.

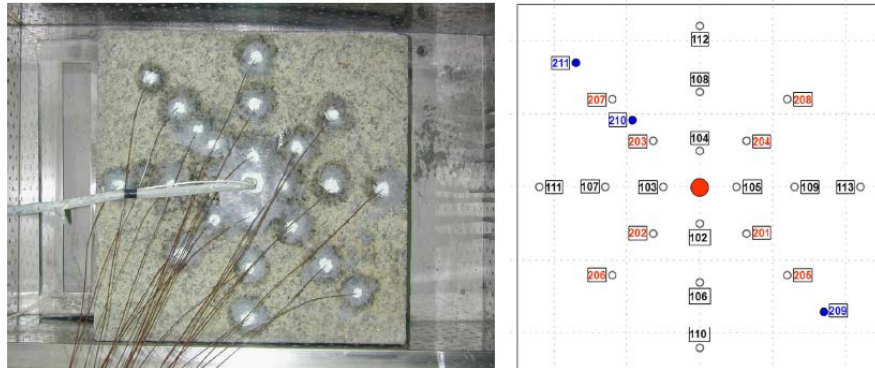
Kukkonen vd. (2011); Finlandiya’da 400-500 m derinliklerde planlanan nükleer atık depolama alanını temsil eden Olkiluoto bölgesinin jeolojisinin araştırılması kapsamında, bölgeyi temsil eden granit ve gnays türü kayaçlarının ısıll özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 12 adet sondaj kuyusundan alınan 392 adet karot örnekleri üzerinde laboratuvar çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Tüm rneklerin 25°C’deki ortalama ısı iletim katsayıları 2,91 W/mK (2,66-3.20 W/mK) ve standart sapma değerleri 0,4-0,6 W/mK arasındadır. En yüksek ortalama ısıll iletkenlik pegmatitik granite en düşük ise mikalı gnaysa aittir. Tüm rneklerin 25°C’deki ortalama özgül ısı kapasitesi 712 J/kgK olup standart sapma değerleri 19-41 J/kgK’dir. En yüksek değerler damarlı ve mikalı ganysta en düşük değerler ise pegmatitik granitte gözlemlenmiştir. Ortalama ısı yayınımlı katsayısı $1,47 \times 10^{-6}$ m²/s ($1,34-1,75 \times 10^{-6}$ m²/s) ve standart sapma değerleri $0,1-0,3 \times 10^{-6}$ m²/s arasında değişmekte olup en yüksek

değerler pegmatitik granitte en düşük değerler ise mikalı ganysta elde edilmiştir. Depo kayaçların 100°C’de ortalama ısı iletim katsayısı 2,72 W/mK, özgül ısı kapasitesi 824 J/kgK ve ısı yayılım katsayısı $1,20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tahmin edilmiştir.

Liou ve Tien (2016), geçici düzlemsel ısı kaynağı (TPS) (Şekil 2.19) ve prob yöntemi aracılığıyla doğrudan ölçümler ve ısı transferi deneylerinin nümerik simülasyonu aracılığıyla dolaylı değerlendirme olmak üzere iki aşamada granit numunelerinin ısı iletkenliklerinin değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Geçici düzlemsel ısı kaynağı yöntemi için 5x5x2 cm, prob yöntemi için 16x16x25 cm ve ısı transferi deneyleri için ise 50x50x25 cm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.20). Deneyler sonucunda 30°-50° sıcaklık aralığı için granitin ortalama ısı iletim katsayısı; TPS yönteminde 2,58-2,63 W/mK, prob yönteminde 2,34-2,41 W/mK, denklem aracılığıyla hesaplanan değerler 2,57-2,63 W/mK ve dolaylı değerlendirme için 2,5-3,0 W/mK arasındadır.



Şekil 2.19 Geçici düzlem ısı kaynağı yöntemi (Transient Plane Source-TPS) (Liou ve Tien, 2016).



Şekil 2.20 Isı transferi deneyleri için hazırlanan granit blok ve blok üzerindeki delik düzeni (Liou ve Tien, 2016).

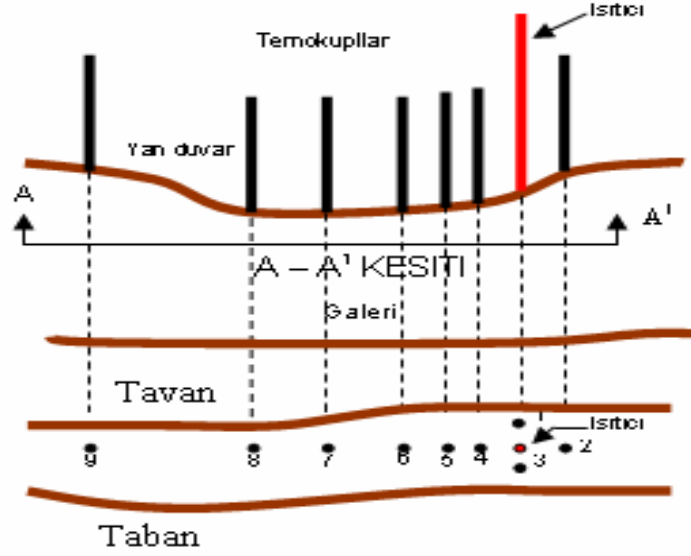
2.6. Kayaçların Isı İletim Katsayılarının Yerinde Belirlenmesine Yönelik

Çalışmalar

Barla vd. (1983), Grosseto (İtalya)'ya yakın Campiano madeninde yeraltı maden açıklıkları etrafındaki kaya kütlesi içerisindeki ısı transferi olaylarını araştırmışlardır. Kayacın termofiziksel özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri ve yeraltı ocak boşlukları etrafındaki kaya kütlesi içerisindeki sıcaklık dağılımını ölçmek ve kaya kütlesinin en önemli termofiziksel parametrelerini değerlendirmek için yerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, sıcaklık dağılımını tahmin etmek ve yerinde ölçümleri yorumlamak için analitik ve nümerik modelleme çalışmaları yapmışlardır.

Yukarıda sıralanan amaçlar doğrultusunda; kaya kütlesine doğru 35 mm çapında ve 11 m uzunluğunda delikler delinmiş olup delikler boyunca 2, 4 ve 6 m derinliklere ve deliğin sonuna yerleştirilen ısı transducerlar aracılığıyla sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Çok yüksek olarak kabul edilen sıcaklık gradyanına sahip bölgelerdeki açıklıklara yakın yerlerdeki sıcaklık dağılımını elde etmek için ise, 30 mm çapında ve 5-100 cm arasında değişen uzunluklarda delikler delinmiştir. Delik içerisinde kaya kütlesi sıcaklığı belirlenirken aynı zamanda açıklığın merkezinde ve yan kayaçtan açıklığın merkezine doğru 20 cm'lik bir mesafede de sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Kuriyagawa vd. (1983) Japonya'da bulunan Kamioka madeninin Tohibora ocağında gerçekleştirdikleri çalışmada, yan kayacın ısıtılması aracılığıyla granitik bir kayaçta oluşturulan sıcaklık profilini ölçmeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda; 60 cm uzunluğunda ve 6 cm çapında silindirik bir ısıtıcı, galerinin yan duvarında delinen 10 cm çapındaki bir deliğin içerisine yerleştirilmiştir. Yerleştirme derinliği 3 m olup ısıtıcı ve delik arasındaki boşluk yangına dayanıklı malzemelerle doldurulmuştur. Isıtıcının yerleştirildiği delikten itibaren 0,5-1,0-2,0-3,9 ve 5,1 m mesafelerde açılan deliklere termokupllar 2,9-3,0 m derinlikte yerleştirilmiştir (Şekil 2.21). Isıtıcıdan itibaren 0,5 ve 1,0 m mesafelerdeki deliklere yerleştirilen termokupllar yan duvardan serbest yüzeye doğru olan ısı akışını belirlemek içindir. Kayacın ısı iletkenliğinin anizotropisini belirlemek için ise 1, 2 ve 3 nolu delikler delinmiştir. Isıtıcıdan itibaren 11 m mesafedeki ölçüm deliğine yerleştirilen termokupl, kayacın arka bölgesindeki sıcaklığı belirlemek içindir.



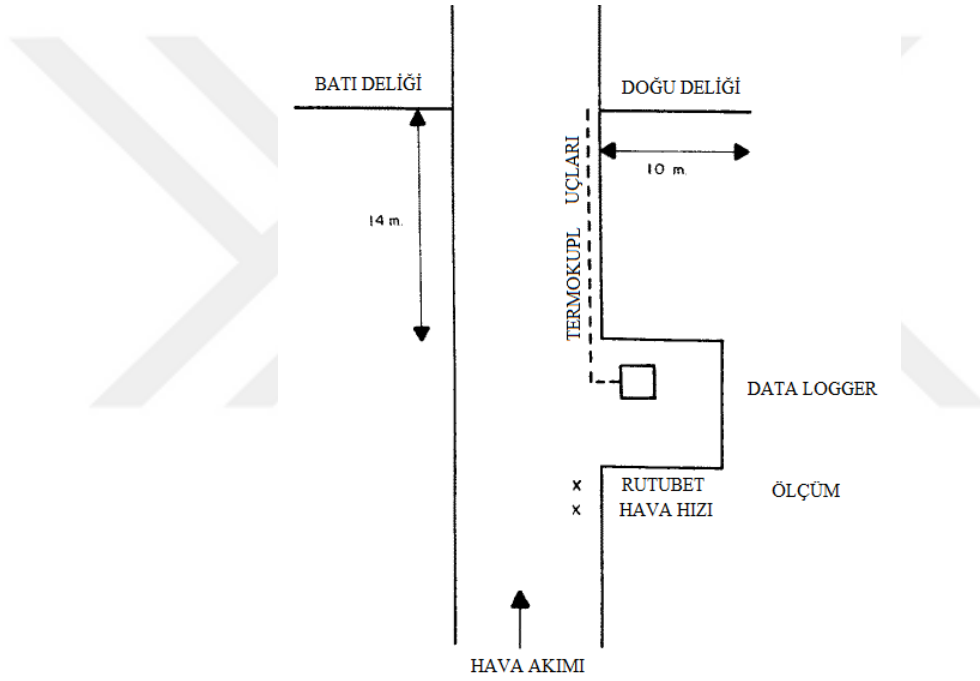
Şekil 2.21 Yerinde ısı iletkenlik ölçüm düzeneği (Kuriyagawa vd., 1983).

Sıcaklık profilini belirlemek için; ısıtıcıdan itibaren değişik mesafelerde yerleştirilen termokupllar aracılığıyla sıcaklıklar ölçülmüştür. Kabul edilen değişik ısı iletkenlik değerleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sıcaklık profilleri oluşturulmuş ve elde edilen bu sonuçlar yerinde ölçümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sıcaklığın bir fonksiyonu olarak en uygun ısı iletim katsayısını veren bir eşitlik tanımlamışlar ve sıcaklıkla ısı iletkenliğinin değişiminin kayaç tipine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Kayaçlar; ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak artan kayaçlar (obsidyen), ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişmeyen kayaçlar (sabit kalan) ve ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak azalan kayaçlar (granit) olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Mousset-Jones ve McPherson (1986), sıcak yeraltı maden işletmelerinde ocak ikliminin önceden tahminine yönelik geliştirilen yöntemlerin araştırılmasını içeren bir proje çalışması gerçekleştirmişlerdir. Güney Dakota (USA)'daki Homestake altın madeninde gerçekleştirilen bu çalışmada, radyal ısı akış teorisine dayanan deney yöntemleri kullanılarak kayaçların ısı özelliklerinin (ısı iletim ve ısı yayılım katsayıları) yerinde belirlenmesi amaçlanmıştır. Madende 7700 seviyesinde (2350 m) ısı iletim katsayısının ölçülmesi için; kuyudan itibaren çevreye doğru 10 m derinliğinde ve birbirlerine göre dik açılı olacak şekilde 4 adet delik delinmiş, her bir deliğe 8 adet termokupl yerleştirilmiştir. Ayrıca, ölçüm sahasından yukarıya ve aşağıya doğru olan bölgelerde hava akışı, yağ ve kuru hazne sıcaklık değerleri de

ölçülmüştür. Şekil 2.22’de ısı iletim katsayısının yerinde ölçüm düzeneği görülmektedir. Hesaplamalar sonucunda ısı iletim katsayısı değerlerinin 3,38-6,41 W/m°C arasında değiştiği ve ortalama 4,82 W/m°C olduğu belirlenmiştir.

Yerinde ölçümlerle benzer lokasyonlardaki simule edilmiş değerlerin karşılaştırılması sonucunda, en iyi korelasyonu veren değerlerin ısı yayılım katsayısı değerleri olduğunu belirlemişlerdir. Sonuçların kabul edilebilir aralıklar içerisinde olduğunu, yerinde ölçülen ısıl özelliklere ait değerlerin laboratuvarında belirlenen değerlerden gözle görülür şekilde farklı ve hatta yaklaşık olarak iki katı kadar olabileceğini vurgulamışlardır.



Şekil 2.22 Yerinde ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Mousset-Jones ve McPherson, 1986).

Innaurato ve Occella (1989) tarafından Grosseto (İtalya)'ya yakın Campiano madeninde kaya kütlelerinin ısıl iletkenliklerini yerinde ölçmek için gerçekleştirilen çalışmalarda, deneyler iki kategoride sınıflandırılabilir:

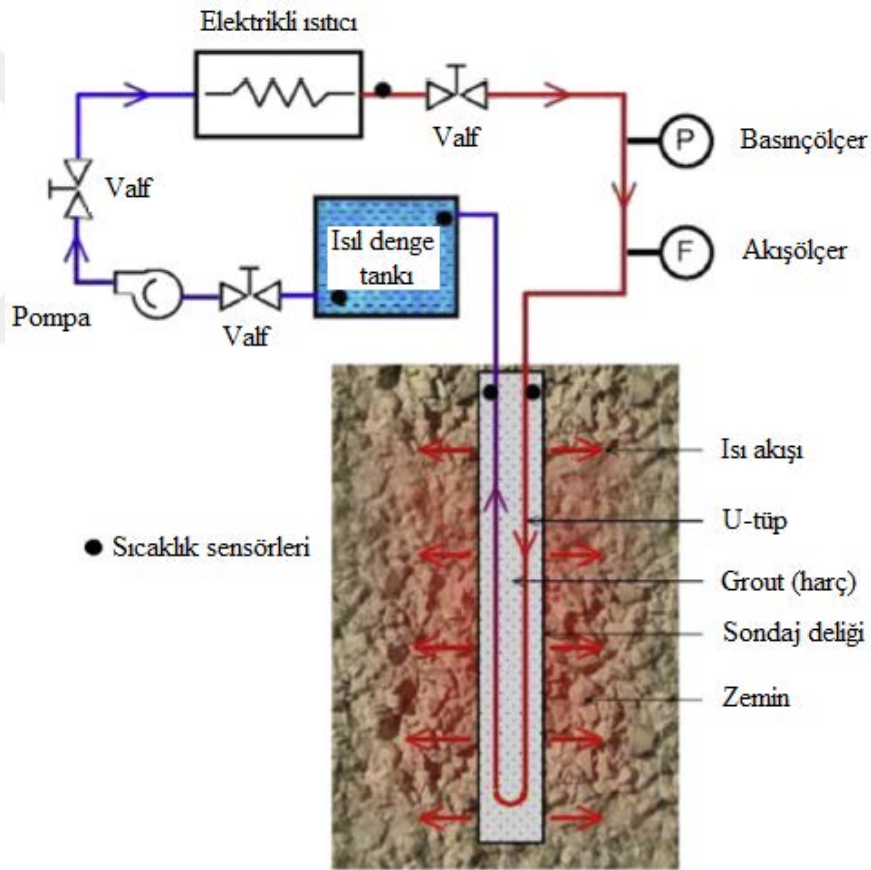
- i. Işıma aracılığıyla tünel duvarının ısıtılması
- ii. Kaya kütlelerinin soğutulması

Birinci tip deneylerde, başlangıçta hava sıcaklığında olan kayaç infrared bir ısı kaynağı aracılığıyla ısıtılmış ve 2 m uzunluğunda ve 35 mm çapındaki deliklere yerleştirilmiş termokupullarla sıcaklık artışları belirlenmiştir. Bu gruptaki deneyler, yüzeyi sabit bir ısı akışından geçirilen yarı-sonsuz bir katı örneğine benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İkinci tip deneylerde ise; başlangıçta T_x gibi yüksek sıcaklığa sahip bir kaya kütesinin, bir hava akımının tünel içerisine sevk edilmesinden itibaren soğumaya başlaması gözlemlenmiştir. 8-10 m uzunluğunda ve 35 mm çapındaki sondaj deliği içerisindeki sıcaklık azalışı, kayaç yüzeyinden itibaren 10 ve 20 cm mesafede ve 2 m aralıklarla kaydedilmiştir. Hava sıcaklığı ölçümleri, tünel ekseninde ve yan kayaçtan tünel eksenine doğru 20 cm'lik bir mesafede gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerindeki hassasiyet $0,1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Sonuç olarak; yerinde ısı iletim katsayısı değerlerinin laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerden genelde daha yüksek ve geçirgen olmayan kayaçların serbest yüzeylerinin püskürtme beton tabakası ile yalıtılmasının ısı iletiminde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Shen vd. (1991); maden ocaklarında yerinde ısı iletkenlik ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla, sabit güçlü silindirik bir ısıtıcı ve ısıtıcının merkezinde bir sıcaklık dedektöründen ibaret olan taşınabilir, patlamaya karşı emniyetli, ateşe dayanıklı, tam otomatik ve hızlı ölçüm yapabilen bir ısı iletkenlik ölçüm düzeneği dizayn etmişlerdir. Yerinde ölçümlerin doğal çevre sıcaklığında ve basıncında gerçekleştirilmesi ve ölçüm noktalarında numune alınabilmesi durumuna göre ölçüm noktalarının yoğunluğunun belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Lhendup vd. (2014); Avustralya Melbourne'de gerçekleştirdikleri çalışmalarda, aralarındaki mesafe 8 m olan 40 m derinliğinde iki adet sondaj kuyusunun ısı özelliklerini, ısı tepki deneyi (thermal response test, TRT) yöntemi aracılığıyla yerinde ölçmüşlerdir. TRT yönteminde; sisteme, kuyu ısı değiştirgeci aracılığıyla 50-60 saatlik bir süre boyunca sabit sıcaklıkta bir ısı akışı sağlanır. Deney sonrası elde edilen ısı iletim katsayısı değeri deney süresinin etkisi altındadır. Deneyin başlangıcından itibaren ilk birkaç saatlik süre boyunca oluşan ısı transferinde geçici etkiler hakim olduğu için ilk 10-15 saatlik süre boyunca alınan ölçümlerin değerlendirmede dikkate alınmaması tavsiye edilmektedir. Sonraki 35 saatlik dilimin sonunda ölçülen ısı iletim katsayısı değerinin sabit olduğu kabul edildiğinden dolayı minimum 50 saatlik bir süre boyunca ısı akışı sağlanmalıdır.

TRT düzeneği; 0,125 m³ hacme sahip 4,8 kW'lık bir elektrikli sıcak su tankı, 0,2 m³ hacminde bir ısıl denge tankı, su pompası, debimetre, yüksek yoğunluklu polietilen borular ve sıcaklık sensörlerinden ibarettir (Şekil 2.23). Her bir sondaj kuyusunda iki olmak üzere toplam 4 adet TRT gerçekleştirilmiştir. Deneyler 96,5 saatlik bir süre boyunca devam ettirilmiştir. Isı akışı, bir elektrikli su ısıtıcısı kullanılarak deney süresince yaklaşık 840 kg/h-döngü'lük bir akış aracılığıyla oluşturulmuş ve kuyu içindeki U-tipi borularla kuyuya enjekte edilmiştir. Sıcak su kayaç içindeki borudan geçerken çevreye olan ısı transferi nedeniyle soğumakta ve soğuyan su tekrar ısıtılarak kuyuya geri gönderilmektedir. Deney süresince her iki dakikada bir giriş ve çıkış sıcaklıkları bir veri kayıt cihazı aracılığıyla kaydedilmiştir.



Şekil 2.23 Isıl tepki deney düzeneği (TRT) (Lhendup vd., 2014).

Ölçüm sonuçları; klasik ısıl eğilimi belirleme, iki değişken parametrelili uydurma tekniği ve jeotermal parametreler ölçüm modeli kullanılmak suretiyle analiz edilmiş ve zeminin ısı iletim katsayısı ve ısıl direnç değerleri elde edilmiştir. İki değişken

parametrelili uydurma tekniği ve jeotermal parametreler ölçüm modeli kullanılarak elde edilen değerlerin birbirleri ile uyumlu, sisteme kararsız ısı girişinden dolayı klasik ısılı eğilimi belirleme aracılığıyla elde edilen verilerin ise diğer yöntemlerle elde edilen veriler ile tutarsız olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

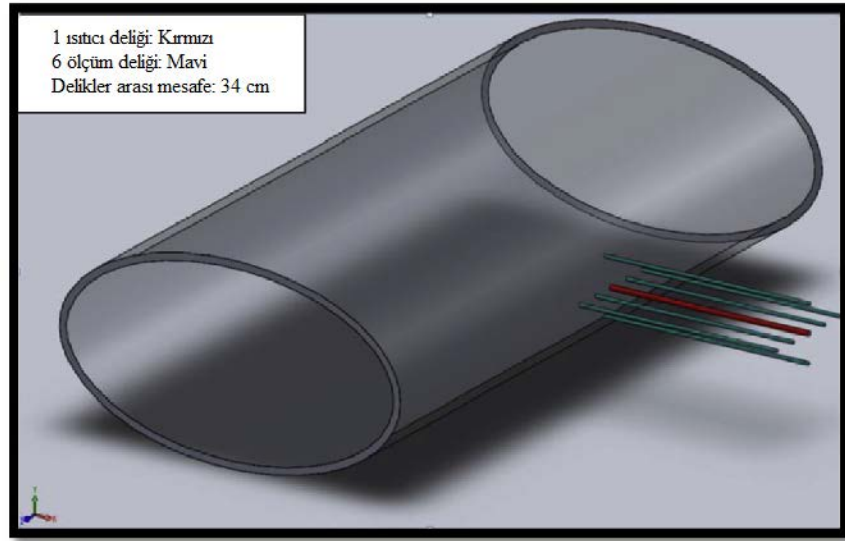
Choi ve Ooka (2015), Tokyo Üniversitesi Chiba deney istasyonunda dizayn edilen deney sistemi aracılığıyla farklı formasyonlarda yerinde ısı iletim katsayısı ve termal direnci belirlemek amacıyla bir dizi deneyler gerçekleştirmişlerdir. Delik logu ve deney düzeneği Şekil 2.24'de verilmiştir. Delik logu stratigrafik olarak; 0-8 m verimli toprak-kil, 8-25 m ince kum, 25-31 m silt ve 31-60m ince kum olmak üzere dört farklı formasyondan oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi 10-12 m arasında değişmektedir. Kuyuların çapları 16,5 cm ve derinlikleri 50 m'dir. Her bir kuyuya yüksek yoğunluklu polietilen bir U-tüpü yerleştirilmiştir. Gözlem kuyusunun sol tarafındaki kuyu %20 silis kumu içeren Portland çimentosu sağ tarafındaki kuyu ise ince çakıl ile doldurulmuştur. Zeminin ısılı davranışıyla ilgili bilgilerin elde edilebilmesi amacıyla gözlem kuyusu ve diğer iki kuyu içerisine 10 m aralıklarla T tipi termokupllar yerleştirilmiştir. Isı taşıyıcı sıvı olarak kullanılan suyun çevre ile arasındaki ısı alışverişini azaltmak için hidrolik devre ve TRT düzeneği izole edilmiştir.

Isıl tepki deneyleri; 2kW'lık ısıtıcı ile günlük sıcaklık değişiminin daha az olduğu mart ayında ve 4 kW'lık ısıtıcı ile gün içi sıcaklık değişiminin daha fazla olduğu ilkbahar mevsiminde olmak üzere iki farklı mevsimsel koşullarda, 20L/dak'lık bir akış hızında ve 140 saatlik nisbeten uzun bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir.

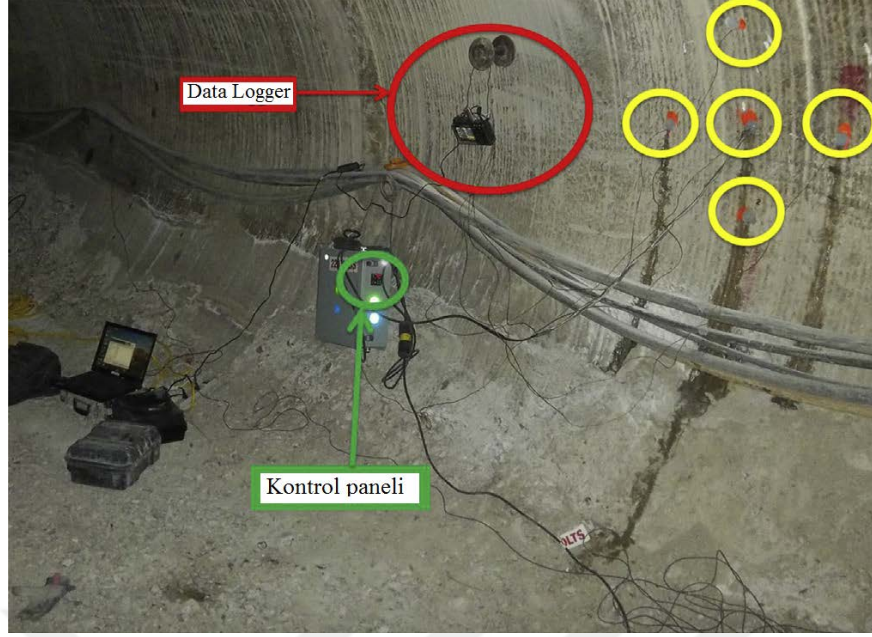
Söz konusu çalışmada, yarı Newton yöntemi ve sonsuz hat ısı kaynağı modelinin zamana bağlı olarak üst üste bindirilmesi (süperpozisyon) aracılığıyla dengesiz TRT verilerinin yorumlanabilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntem yerinde gerçekleştirilen iki adet ısılı denge deneyinden elde edilen verilere uygulanmış ve sonuçlar tahmin kararlılığı ve yakınsama hızı açısından geleneksel yöntemden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonsuz hat ısı kaynağı yöntemini kullanan geleneksel ardışık yöntemle karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin ısı iletim katsayısı açısından en az 6 kat ve kuyu ısılı direnci açısından ise 4 kat daha düşük standart sapmalar sağladığı görülmüştür. Geliştirilen yöntem; önceki ölçülen verilerden kaynaklanan hatalardan bağımsız olması ve değişken ısı akışının

değere ulaşmaya kadar yeraltında dolaşan havanın ısı kaybedeceğini ifade etmişlerdir.

Kayaç ısı iletkenliğini ölçmek için; aralarındaki mesafe 34 cm olan 2,75 m uzunluğunda 22 mm çapında 7 adet delik delinmiştir (Şekil 2.25). 34 mm çapında ve diğer deliklerden daha geniş olan merkezdeki deliğe 3000 W gücünde 5,5 m uzunluğundaki ısıtıcı kablo katlanarak gömülmüş ve 220 volt enerji ile beslenmiştir. Isıtıcı deliğindeki sıcaklığı izlemek ve kontrol etmek amacıyla 1,2 m uzunluğundaki bir termokupl merkezi deliğe yerleştirilmiştir. Isıtıcı ve termokuplun her ikisi de üniform bir sıcaklık sağlamak amacıyla bir sayısal kontrol cihazı ile irtibatlandırılarak ısıtıcı sıcaklığının 177°C’de sabitlenmesi sağlanmıştır. Merkezi deliği çevreleyen dört deliğin her birine, delik ağzından 1,2 m ve 2 m’lik mesafelerde olacak şekilde 2’şer adet termokupl yerleştirilmiştir (Şekil 2.26). Ayrıca infrared bir termometre aracılığıyla kayaç yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda; trona kayacının yoğunluğu 2130kg/m³, ısı iletim katsayısı 4,5 W/mK, ısı yayılım katsayısı 1,68x10⁻⁶ m²/s ve özgül ısı değeri 1260 J/kgK olarak bulunmuştur.



Şekil 2.25 Yerinde ısı iletim katsayısı ölçüm düzeni (Habibi vd., 2015).



Şekil 2.26 Yerinde ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Habibi vd., 2015).

2.7. Kayaçların Isı İletim Katsayılarını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

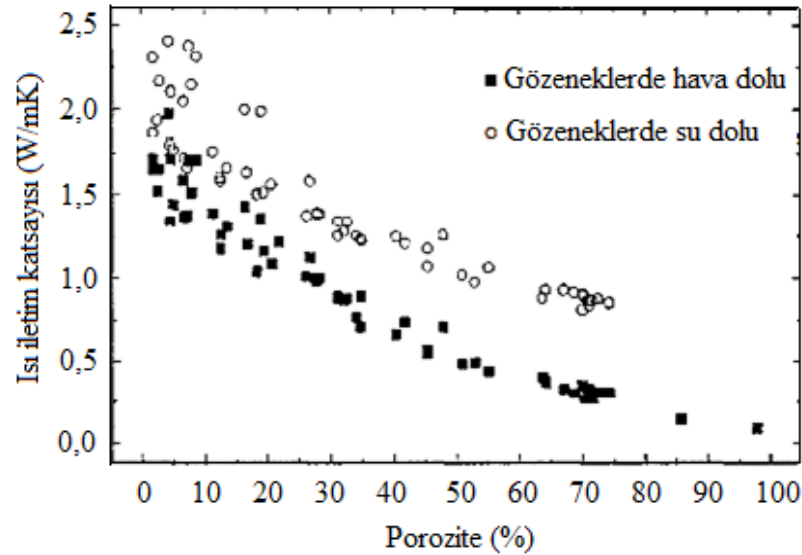
Brigaud ve Vasseur (1989) sedimanter kayaçların ısı iletkenlikleri üzerinde mineraloji, porozite ve akış kontrolünün etkisini araştırmışlar özellikle de killi minerallerin ısı iletkenliklerinin tahmini üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu tahminler; suya doymuş, nemli ve havaya doymuş küçük hacimli numuneler üzerinde laboratuvarında gerçekleştirilen ısı iletkenlik, porozite ve mineralojik analiz sonuçlarının yorumlanmasına dayanan tahminlerdir. Kullanılan numuneler ana sedimanter kayaçları (kumtaşı, kireçtaşı ve şist) karakterize eder ve yapısal olarak izotropik malzeme olarak düşünülebilen bileşik numunelerdir.

Porozite ve mineralojik analiz verileriyle desteklenen bu tahminler geometrik ortalama modeli ile birlikte; küçük hacimli, gözenekli ve izotropik sedimanter kayaçların ısı iletkenliklerinin önceden belirlenmesine yönelik olarak ilk tahminin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Yığın iletkenliği; nemli veya suya doymuş numuneler için %10 doğrulukla ve havaya doymuş numuneler için ise %20 doğrulukla tahmin edilebilmektedir.

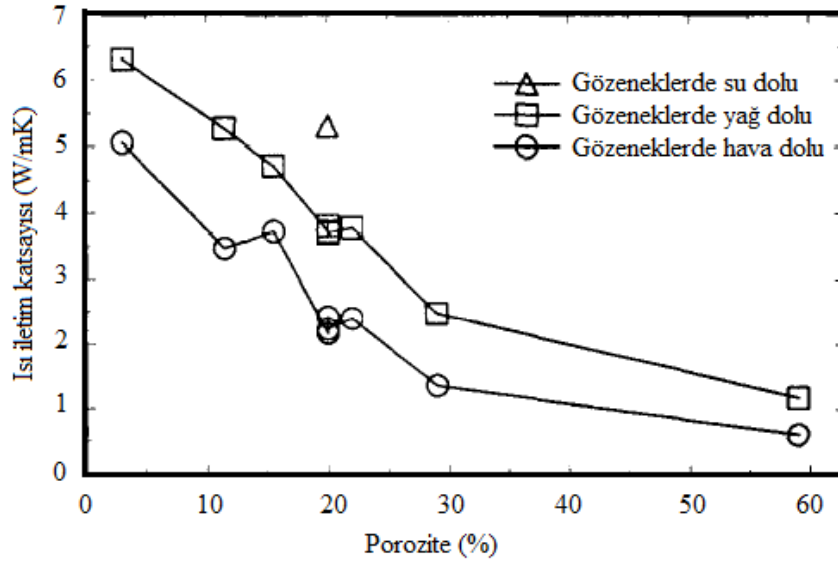
Clauser ve Hungen'ten (1995) alıntı yapılan ve Hawaii bazaltının ısı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimini içeren grafiğe esas teşkil eden veriler (Şekil 2.27), Robertson ve Peck (1974) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan

alınan verilerdir. Robertson ve Peck (1974); 35°C sıcaklıkta 3 MPa'lık basınç altında %2-98 arasında değişen dayanıma sahip olivinli bazaltdan alınan 61 adet numune üzerinde, gözeneklerin hava ve su ile dolu olması durumlarına göre iki farklı seri halinde bölünmüş bar yöntemi ile ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.27'den de görüleceği üzere; gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı değeri, gözeneklerin su veya hava ile dolu olması durumundan etkilenmeksizin, azalmaktadır. Havanın ısı iletim katsayısının suyunkine kıyasla daha düşük olması nedeniyle bu azalış oranı gözenekleri hava ile dolu olan numunelerde suya doygun numunelere kıyasla daha fazladır.

Benzer şekilde yine Clauser ve Hungensten (1995) alıntı yapılan ve kuvarşlı kumtaşının ısı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimini içeren grafiğe esas teşkil eden veriler (Şekil 2.28), Messmer (1965) ve Desai vd., (1974) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan alınan verilerdir. Söz konusu araştırmacılar; ısı iletkenlik ölçümlerini, hat ısı kaynağı düzeneği aracılığıyla oda sıcaklığında, atmosfer basıncında ve gözeneklerin hava, yağ ve su ile dolu olması durumlarına göre üç farklı seri halinde gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.28'den de görüleceği üzere; gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı değeri azalmaktadır.

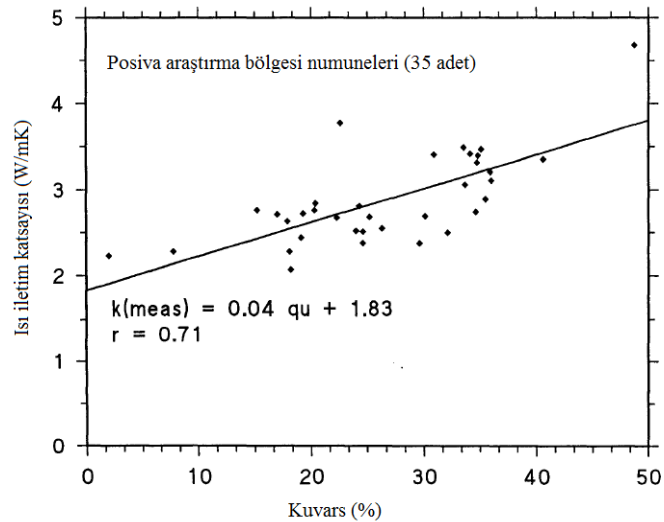


Şekil 2.27 Isı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimi (Hawai bazaltı için) (Bütün veriler Robertson ve Peck'ten (1974) alınmıştır.) (Clauser & Huenges, 1995).

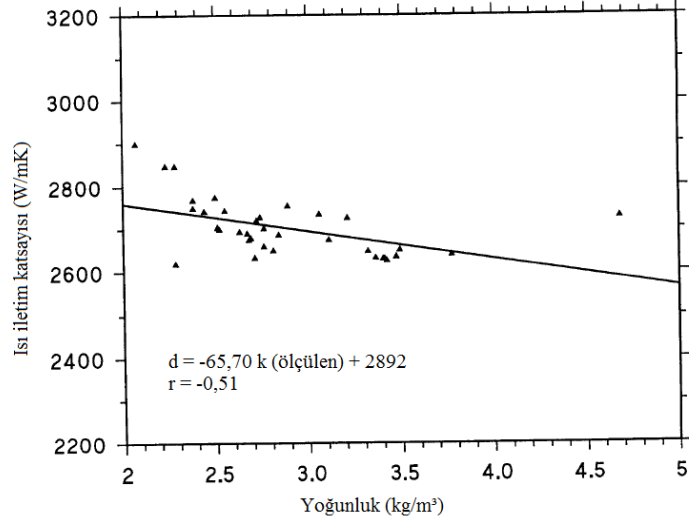


Şekil 2.28 Isı iletim katsayısının gözenekliliğe bağlı olarak değişimi (Kuarşlı kumtaşı için) (Messmer, 1965 ve Desai vd., 1974 (Clauser &Huenges, 1995)).

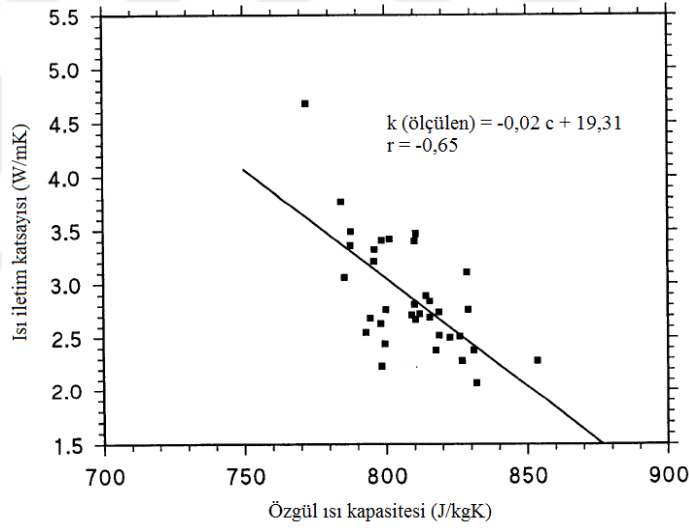
Kukkonen ve Lindberg (1998); nükleer atıkların nihai bertarafından sorumlu uzman bir kuruluş olan POSIVA tarafından yönetilen çalışmalar kapsamında; Finlandiya'nın Olkiluoto, Romuvaara, Kivetty ve Hastholmen bölgelerindeki kayaçların ısıl özelliklerini belirlemişlerdir. Kuvars içeriğine, yoğunluğa ve özgül ısı kapasitesine bağlı olarak kayaçların ısı iletim katsayısının değişimini incelemişlerdir (Şekil 2.29 -2.31).



Şekil 2.29 Kuvars içeriğine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen ve Lindberg, 1998).



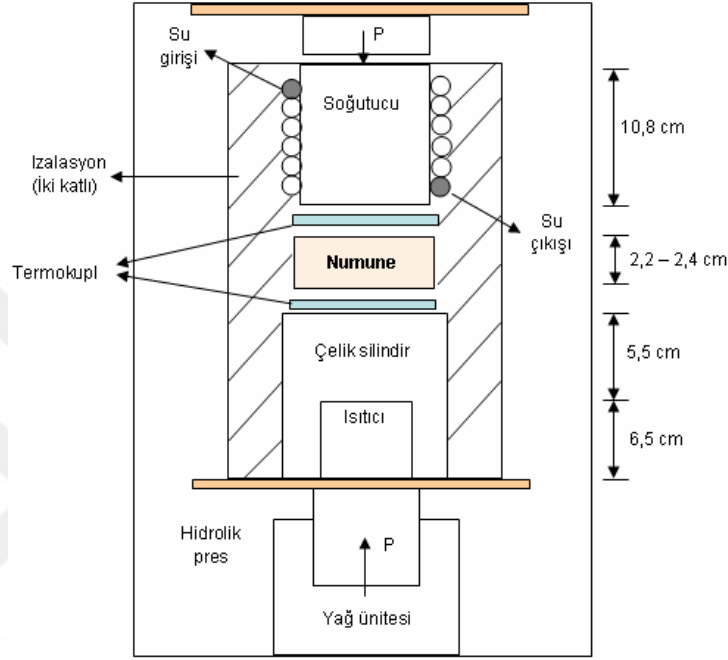
Şekil 2.30 Kayaç yoğunluğuna bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen ve Lindberg, 1998).



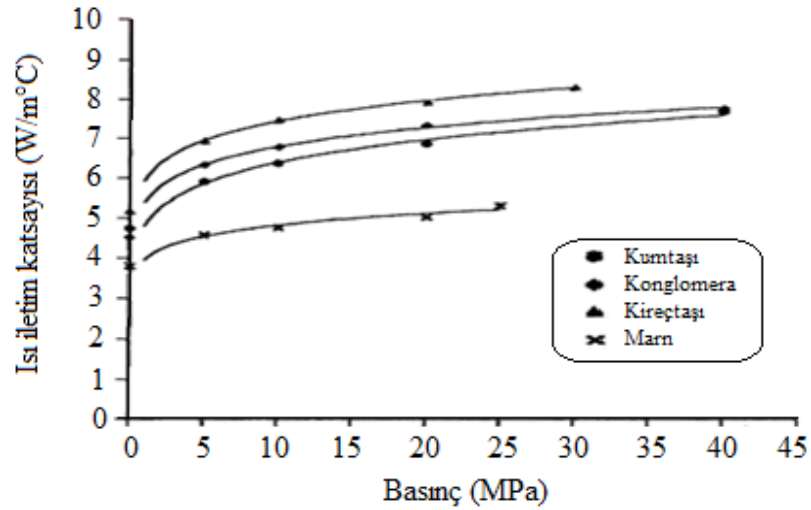
Şekil 2.31 Özgül ısı kapasitesine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kukkonen ve Lindberg, 1998).

Durutürk (1999, 2002); kayaçların ısı iletim katsayılarının basınçla değişimini belirlemek amacıyla, farklı kayaçlar üzerinde laboratuvarında bir dizi deneyler gerçekleştirmiştir. Güyagüler ve Önder (1995) tarafından geliştirilen düzeneğe benzer bir düzenek, numunenin üzerine uygulanması gereken basıncı sağlamak amacıyla bir hidrolik pres içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 2.32). Çapları 47,1-53,4 mm ve uzunlukları 20,3-26,7 mm arasında değişen boyutlara sahip numuneler, normal koşullar (basınç uygulanmaksızın) ve değişik basınç seviyelerinde deneye tabii tutulmuşlardır. Ayrıca, kuru ve suya doymun numunelerin ısıl iletkenliklerinin

değişimi de incelenmiştir. Basınca bağlı olarak kayaçların ısı iletim katsayılarının arttığını (Şekil 2.33), suya doymun numunelerin ısı iletim katsayısı değerlerinin, özellikle gözenekli kayaçlarda, normal koşullardaki değerlere kıyasla daha yüksek olduğunu vurgulamış ve basınca bağlı artışlara yönelik ilişkiler ortaya koymuştur (Çizelge 2.2) .



Şekil 2.32 Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Durutürk, 1999).



Şekil 2.33 Kayaçlarda tek eksenli basınç dayanımına bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Durutürk, 1999).

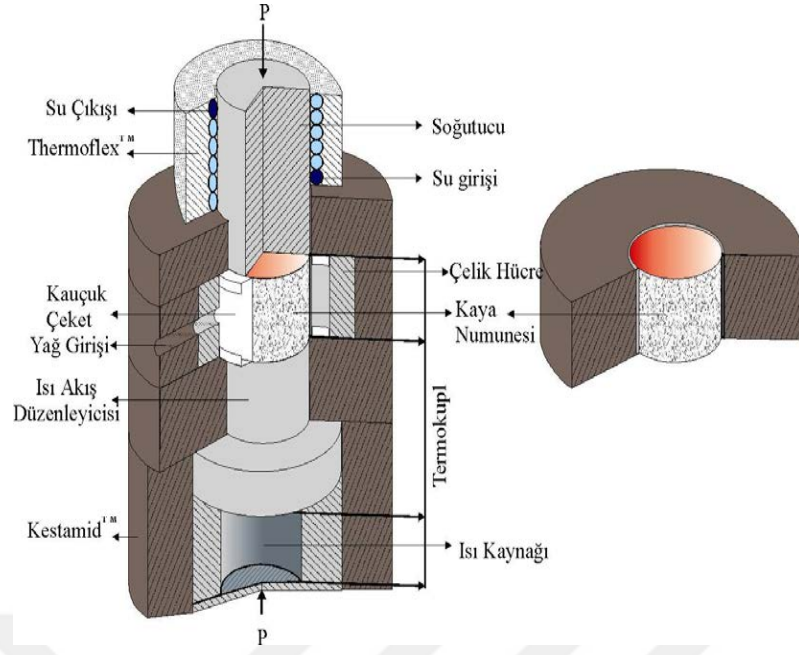
Çizelge 2.2 Değişik kayaç türleri için tek eksenli basınç dayanımı-ısı iletim katsayısı ilişkileri (Durutürk, 2002).

$k_{konglomera} = 5,5274 + 1,16263 x *P^{0,285211}$	[2.32]
$k_{kumtaşı} = 4,7464 + 0,58666 x P^{0,435865}$	[2.33]
$k_{kireçtaşı} = 5,17803 + 1,0867 x P^{0,389159}$	[2.34]
$k_{marn} = 3,8132 + 0,40454 x P^{0,389159}$	[2.35]

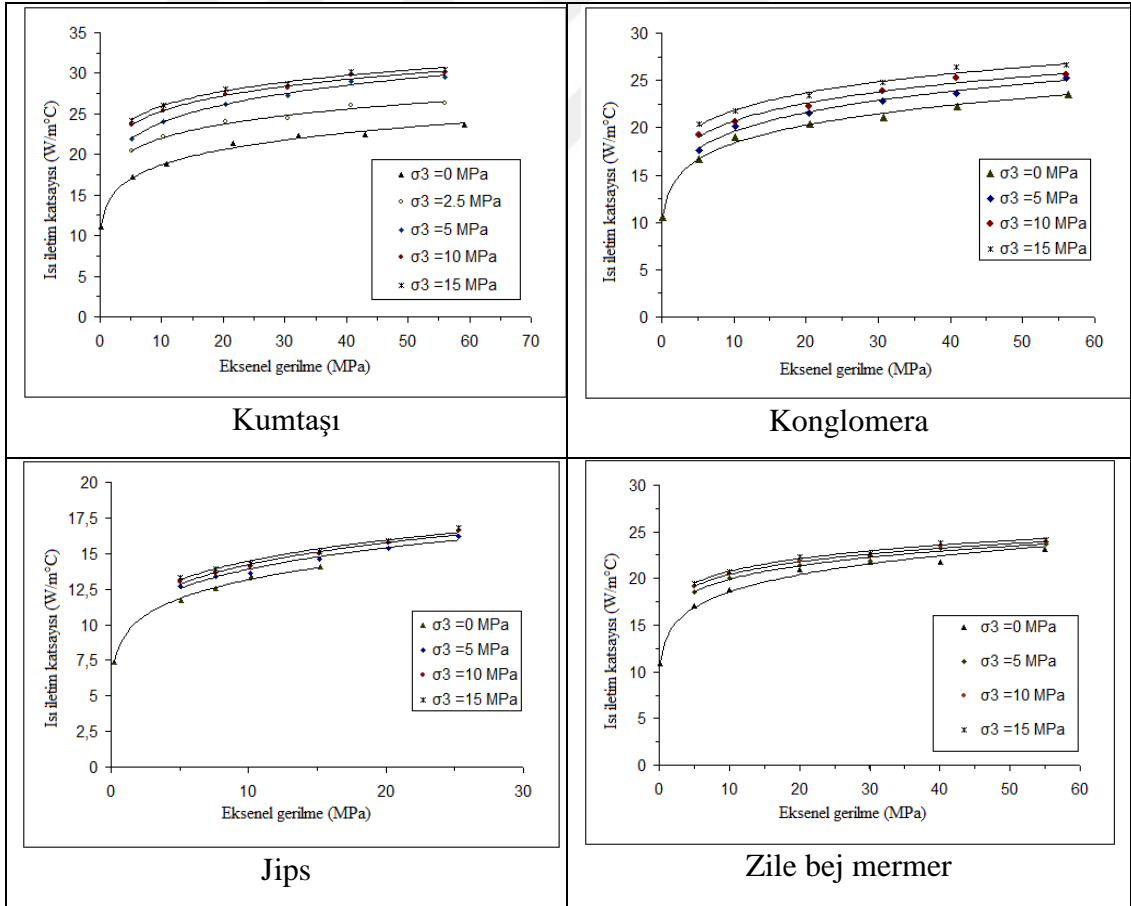
* P , tek eksenli basınç dayanımı

Demirci vd. (2004); kayaçların değişik basınç koşulları altındaki ısı iletkenliklerinin basınç altında olmadan elde edilen değerlere göre nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla bir ölçüm cihazı tasarlamışlardır. Deney düzeneği; hidrolik basınç, ısı, numune yerleştirme ve soğutma ünitelerinden oluşmaktadır. Isı ünitesi, bir dijital güç kaynağı ile bağlantılı ısıtıcı bölüm ve ısı akış düzenleyicisinden oluşmaktadır (Şekil 2.34). Isıtıcı bölümünün sıcaklığını kontrol etmek için iki adet termokupl sayısal tarayıcı ile irtibatlandırılmıştır. Numune yerleştirme ünitesi, kayaç numunelerinin ısı iletkenliklerinin eksenel ve/veya üç eksenli gerilme altında ölçümüne yönelik olarak iki farklı şekilde tasarlanmıştır. Gerilme uygulanmaksızın ısı iletkenlik ölçümleri de aynı düzeneğe ile gerçekleştirilebilmektedir. Üç eksenli gerilme altında gerçekleştirilecek ölçümler için Hoek hücresinin küçük bir modeli olan bölüm kullanılmakta olup söz konusu ünite bir hidrolik yanal basınç sistemi ile bağlantılı olarak çalıştırılmaktadır. Soğutma ünitesi ise çevresinde soğutma suyunun çevrimine olanak sağlayan ve içerisinde çelik bir silindir bulunan bölümdür. Ayrıca bu ünitelerin tamamı yanal ısı akışını engellemek için izole edilmiştir.

Kumtaşı, konglomera, jips ve Zile bej mermer numuneleri üzerinde tek ve üç eksenli gerilmeler altında gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda; kayaçlardaki ısı iletim katsayısının, gerek tek eksenli gerekse üç eksenli gerilmenin etkisine bağlı olarak önemli ölçekte ve belirgin bir değişim gösterdiğini belirlemişlerdir (Şekil 2.35). Söz konusu örnekler için ısı iletim katsayısının değişimini tek ve üç eksenli gerilmelere bağlı olarak ilişkilendirmişlerdir (Çizelge 2.3).



Şekil 2.34 Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği (Demirci vd., 2004).



Şekil 2.35 Bazı kayaçların ısı iletim katsayısının tek ve üç eksenli gerilmelere bağlı olarak değişimi (Demirci vd. 2004).

Çizelge 2.3 Kayaçlar için gerilme durumu-ısı iletim katsayısı ilişkileri
(Demirci vd., 2004).

Gerilme durumu	Isı iletim katsayısı	
Tek eksenli	$k = k_0 + \lambda \sigma^n$	[2.36]
Üç eksenli	$k_{cp} = (k_0 + \lambda_{cp} \sigma_1^{n_{cp}}) * \sigma_3^{\beta_{cp}}$	[2.37]

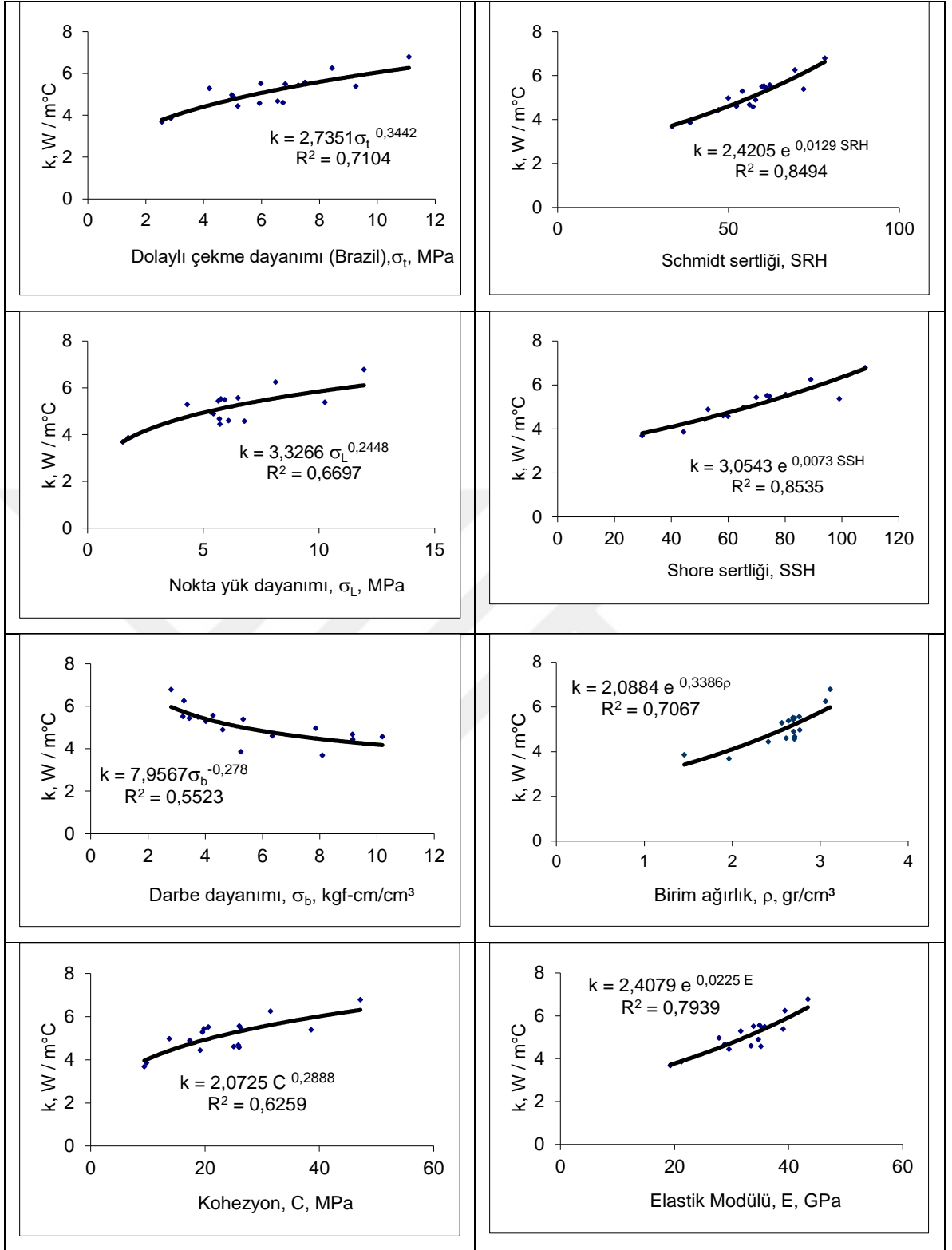
k	: Eksenel gerilme altında kayacın ısı iletim katsayısı (W/m°C)
k_0	: Normal koşullarda kayacın ısı iletim katsayısı (W/m°C)
λ, n	: Eksenel gerilme koşullarında kayaca özgül sabitler
σ	: Eksenel gerilme (MPa)
k_{cp}	: Üç eksenli gerilme altında kayacın ısı iletim katsayısı (W/m°C)
k_0	: Normal koşullarda kayacın ısı iletim katsayısı (W/m°C)
$\lambda_{cp}, n_{cp}, \beta_{cp}$: Üç eksenli gerilme koşullarında kayaca özgül sabitler
σ_1	: Eksenel gerilme (MPa)
σ_3	: Yanal gerilme (MPa)

Görgülü vd. (2004) ve Görgülü (2004) kayaçların ısı iletkenliklerini etkileyen faktörler üzerine yapmış oldukları çalışmalar sonucunda; 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 bu konuda etken olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.36-2.37).

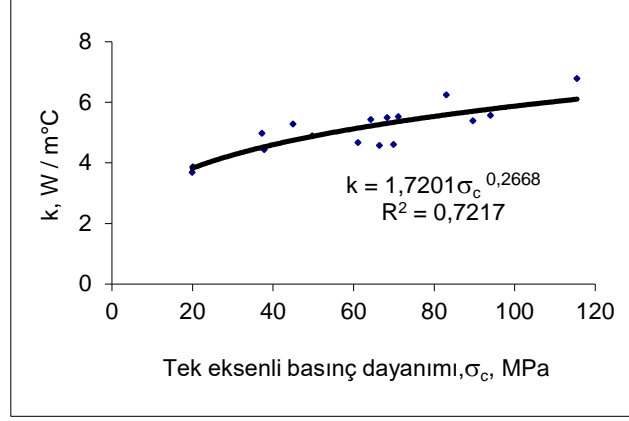
Kayacın neminin, ısı iletim katsayısının her basınç aşamasında belirli bir oranda artmasına sebep olduğunu ve artarak azalan bir davranış gösterdiğini vurgulamışlardır (Şekil 2.38).

Araştırmacılara göre; gerek tek eksenli ve gerekse üç eksenli gerilmelerin etkisine bağlı olarak kayaçlardaki ısı iletim katsayısı önemli ölçüde ve belirgin bir artış göstermekte olup ısı iletim katsayısı kayaçların lineer elastik deformasyon bölgesinde artarak azalan, elastoplastik deformasyon bölgesinde ise yaklaşık olarak lineer artan bir davranışa sahiptir (Şekil 2.39).

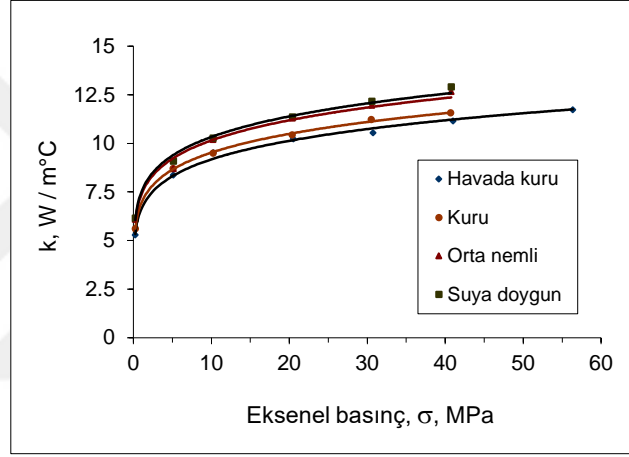
Mineral bileşimi ve petrografik açıdan bakıldığında; kayaçların ısı iletkenliğinin, kayaçları oluşturan münferit minerallerin ısı iletkenliği ile kayacın gözenekliliği, kristal ve anizotropik yapısı vb. parametrelerin ortak paydası olduğunu ifade etmişlerdir.



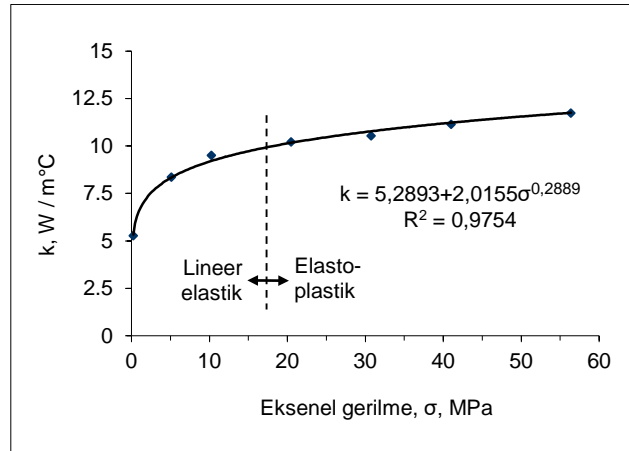
Şekil 2.36 Dolaylı çekme dayanımı, Schmidt sertliği, nokta yük dayanımı, kohezyon, Shore sertliği, darbe dayanımı, birim ağırlık, ve elastik modülü ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiler (Görgülü, 2004).



Şekil 2.37 Tek eksenli basınç dayanımı ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki (Görgülü, 2004).



Şekil 2.38 Konglomera için basınç ve nemin bir fonksiyonu olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2004).



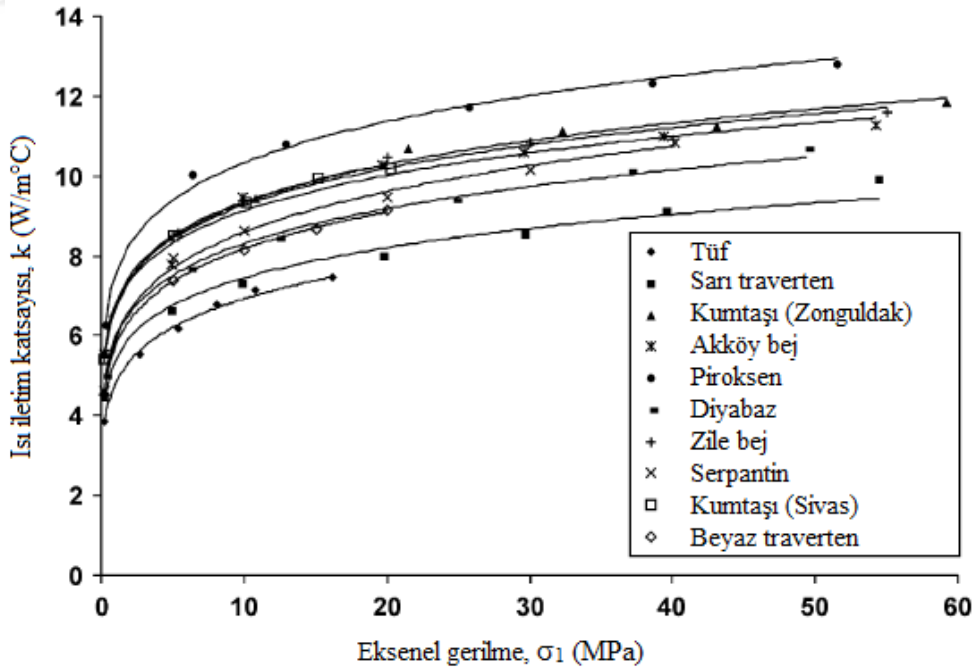
Şekil 2.39 Eksenel gerilme ile ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2004).

Araştırmacılar; ayrıca Demirci vd. (2004) tarafından gerilme durumu ve ısı iletim katsayısı arasında Eşitlik 2.36 ve 2.37’de verilen denklemlerde yer alan kayaca özgü sabitler (λ ve n) ile kayacın elastik modülü arasında aşağıda verilen ilişkileri ortaya koymuşlardır.

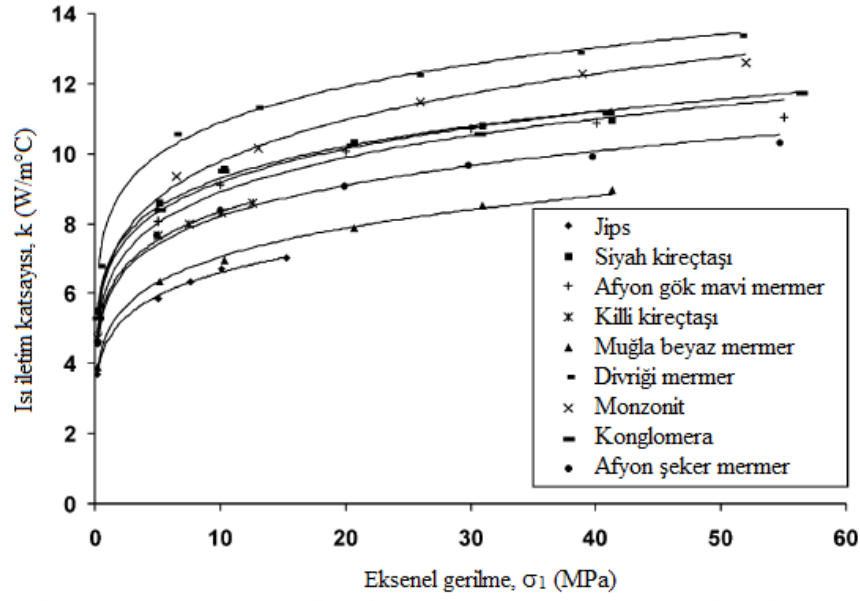
$$\lambda = 0,4733e^{0,0401 E} \quad [2.38]$$

$$n = 0,6931e^{-0,0242 E} \quad [2.39]$$

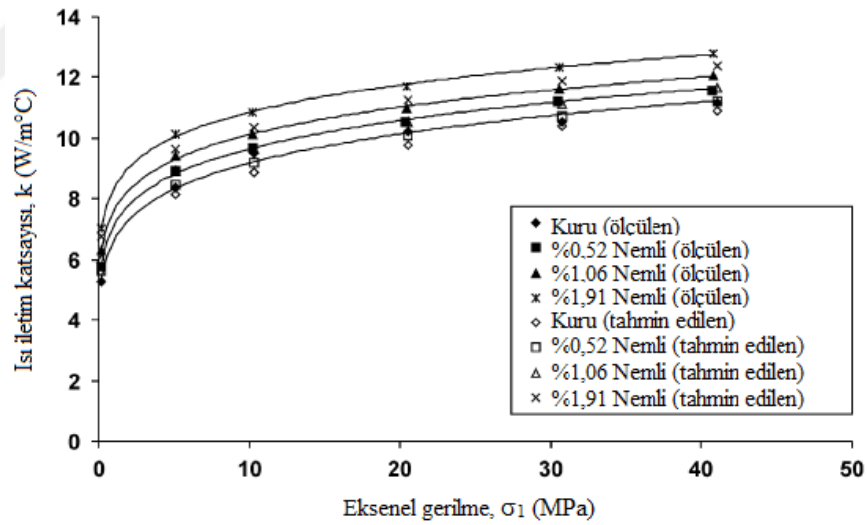
Görgülü vd. (2008); 10 farklı kayaç örnekleri üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda, kayaçların ısı iletim katsayılarının aksel gerilmelere ve nem içeriğine bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir (Şekil 2.40-2.42). Bu artış oranının; kayaç türüne, uygulanan gerilme düzeyine ve nem içeriğine bağlı olarak değiştiğini ve numune üzerine basınç uygulanmadığı ve numunelerin suya doymun hale getirilmediği koşullara kıyasla, 2,5-3 kat daha fazla olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu sonucun; yeraltı maden işletmelerinde, kayaçlardan ocak boşluklarına doğru olan ısı akışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğine vurgu yapmışlardır.



Şekil 2.40 Bazı kayaçlarda basınca bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Tüf, sarı traverten, Akköy ve Zile bej, piroksen, diyabaz, serpantin, kumtaşı ve beyaz traverten) (Görgülü vd., 2008).



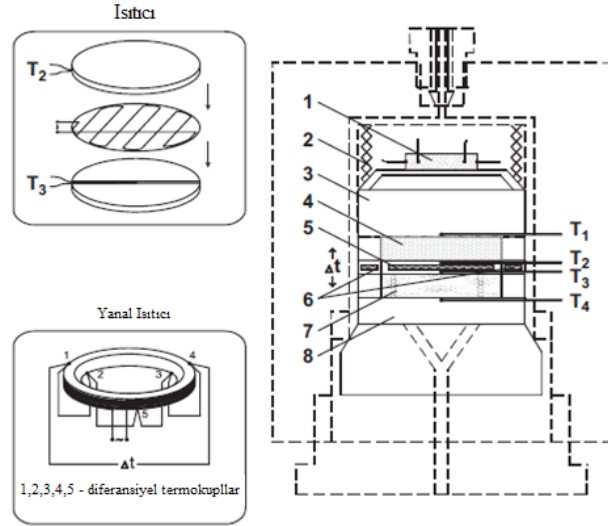
Şekil 2.41 Bazı kayalarda basınca bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Jips, siyah kireçtaşı, Afyon gök mavi, killi kireçtaşı, Muğla beyaz, Divriği mermer, monzonit, konglomera ve Afyon şeker) (Görgülü vd., 2008).



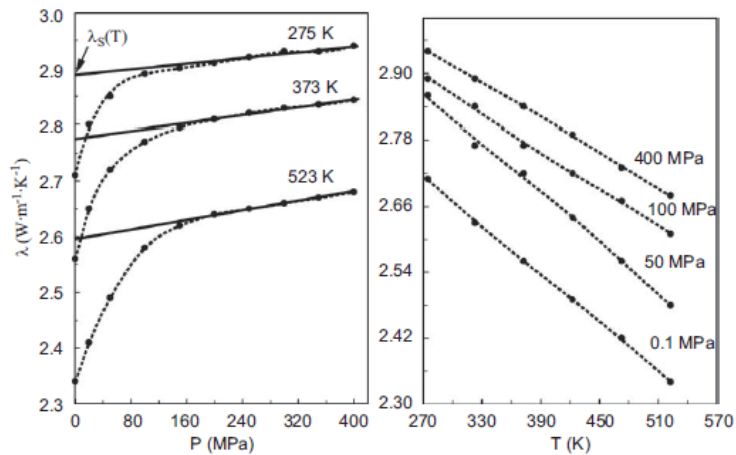
Şekil 2.42 Konglomera için basınç ve su içeriğine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Görgülü vd., 2008).

Abdulagatova vd. (2009), kumtaşının ısı iletim katsayısı üzerinde basınç ve sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Gözenekliliği %13 civarında olan kuru kumtaşının etkin ısı iletkenliği muhafazalı paralel plakalı bir cihaz (Şekil 2.43) aracılığıyla 275-523K sıcaklık aralığında ve 400 MPa'a kadar olan basınç değerlerinde ölçülmüştür. Değişik sıcaklıklarda ve düşük basınç değerlerinde (0,1-100 MPa) kuru kumtaşının

ısı iletim katsayısında hızlı bir artış, yüksek basınçlarda ($P > 100$ MPa) ise zayıf bir doğrusal bağımlılık gözlemlenmiştir (Şekil 2.44). Kumtaşı numunesi için elde edilen etkin ısı iletim katsayısı değerlerini değişik kuramsal ve yarı ampirik modellerin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini test etmek için kullanmışlar ve sonuç olarak sıcaklık, basınç ve gözenekliliğin etkisinin teorik model kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini belirlemişlerdir.

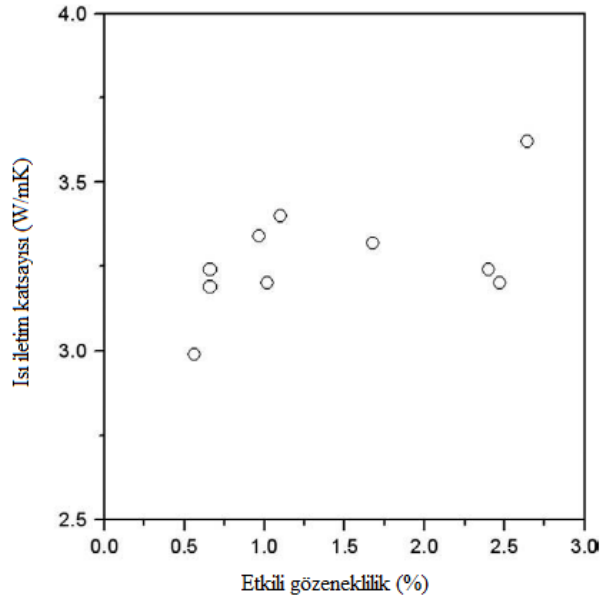


Şekil 2.43 Yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği
1– elektriksel özelliklerin ölçümü için numune 2– yay 3 ve 8– soğutucu
4 ve 7– numuneler 5–ısıtıcı 6– yanal ısıtıcı T_1, T_2, T_3, T_4 – termokupullar
(Abdulagatova vd., 2009).

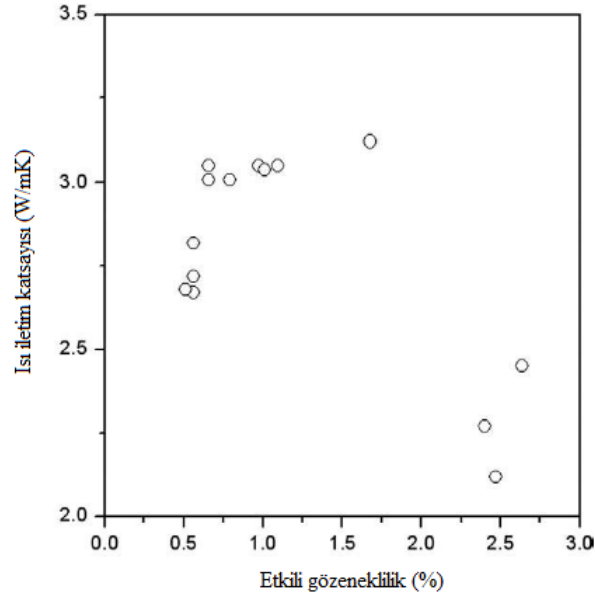


Şekil 2.44 Basınç ve sıcaklığa bağlı olarak kumtaşının ısı iletim katsayısının değişimi (Kesikli çizgiler hesaplanan değerler, düz çizgiler ise sıfır basınca doğru doğrusal kestirimdir.) (Abdulagatova vd., 2009).

Cho vd. (2009) gözenekliliğin ve su içeriğinin ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla; farklı gözenekliliğe ve su içeriğine sahip granit numuneleri üzerinde ısı iletim katsayısı ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda; ısı iletim katsayısı değerlerini; kuru numunelerde yüksek etkili gözeneklilikten düşük etkili gözenekliliğe doğru olmak üzere 2,12-3,12 W/mK arasında, suya doymuş numunelerde ise yine yüksek etkili gözeneklilikten düşük etkili gözenekliliğe doğru olmak üzere 2,99-3,62 W/mK arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Suya doymuş numuneler, kayaç gözeneklerinde bulunan hava ve suyun ısı iletimlikleri arasında var olan önemli farklılığın yansımalarının bir sonucu olarak kuru numunelerden daha büyük ısı iletimlik 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 iletimliğe sahip olan su daha düşük ısı iletimliğe sahip olan havanın yerini alır ve bu durum granit numunelerinin ısı iletim katsayısının artmasına yol açar (Şekil 2.45 ve Şekil 2.46).



Şekil 2.45 Suya doymuş granit numunelerinde etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Cho vd., 2009).

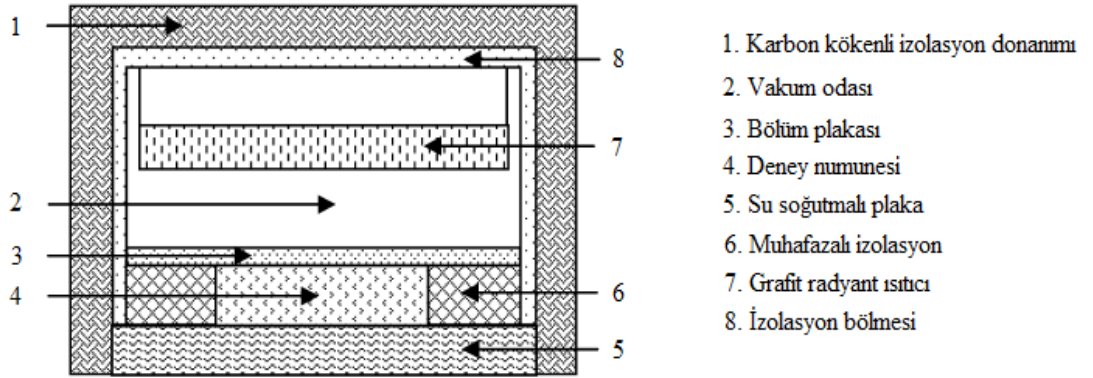


Şekil 2.46 Kuru granit numunelerinde etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Cho vd., 2009).

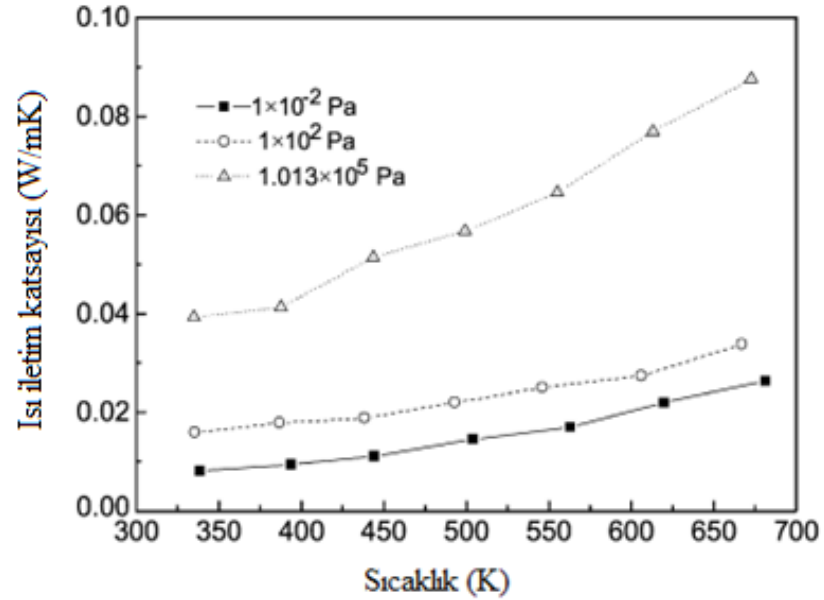
Araştırmacılara göre; etkili gözeneklilik, kuru numunelerde suya doymun numunelere kıyasla daha fazla etkindir. Kuru numunelerde ısı iletkenliğinin etkili gözenekliliğinin artışına bağlı olarak azalmasının nedeni, etkili gözeneklilik artışına bağlı olarak kayaç içerisinde artan boşluklara, granitin ana minerallerinin ısı iletim katsayısından (1,6-7,7 W/mK) çok daha küçük değere sahip olan havanın (0,03 W/mK) dolmasından kaynaklanmaktadır. Suya doymun numunelerde ise; ölçülen değerlerin genelde 3,1-3,4 W/mK değerleri arasında olması, gözeneklerin su ile dolu olması, suyun ısı iletim katsayısının (0,6 W/mK) havanınkine (0,03 W/mK) kıyasla daha büyük olması nedenleriyle, ısı iletkenlik üzerinde etkili gözenekliliğinin etkisi azalmaktadır. Ayrıca; ısı iletkenlik üzerinde etkili gözenekliliğinin etkisinin azalmasında, suyun ısı iletim katsayısının (0,6 W/mK) granitin ana bileşenlerinin ısı iletim katsayısı (1,6-2,5 W/mK) ile kıyaslanabilir düzeyde olmasının da rolü vardır.

Zhao vd. (2009), çeşitli sıcaklık ve basınç değerlerinde lifli izolasyonun ısı iletim katsayısını önceden tahmin etmek için ışımaya ve iletim yoluyla ısı transferinin birlikte değerlendirildiği sayısal bir model geliştirmişlerdir. Elyafli izolasyonun ısı iletkenlikleri gelişmiş bir düzenek kullanılarak geniş bir sıcaklık (300-973K) ve basınç (10^{-2} - 10^{-5} Pa) aralığında ölçülmüştür (Şekil 2.47). 2,5-25 μ m dalga boyu aralığındaki transmittans spektrumları bir Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi kullanılarak 973K'e kadar olan sıcaklıklarda ölçülmüştür. Şekil 2.48'de değişik

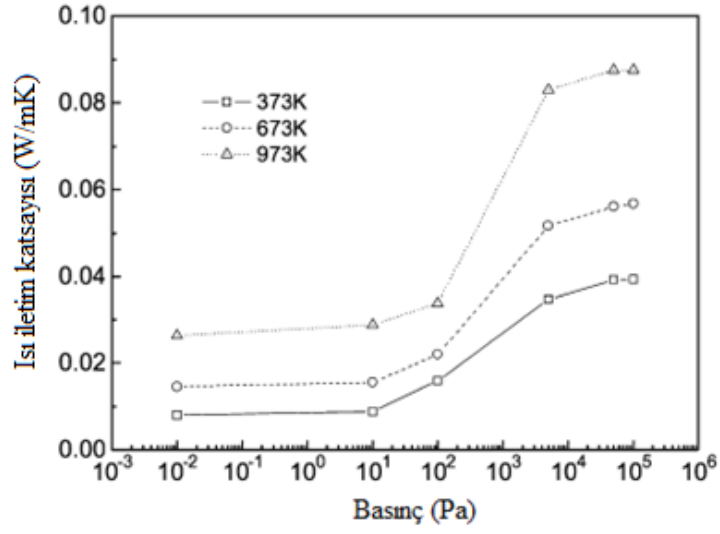
basınç değerleri için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ısı iletim katsayısının değişimi, Şekil 2.49'da ise değişik sıcaklık değerleri için basıncın bir fonksiyonu olarak ısı iletim katsayısının değişimi verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere; sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısında lineer olmayan bir artış söz konusudur. Basınç artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi ise üç farklı davranış göstermekte olup 10 Pa 'a kadar olan değerlerde çok az ve $1 \times 10^2 \text{ Pa}$ – $5 \times 10^3 \text{ Pa}$ aralığındaki değerlerde hızlı bir artış vardır. $5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 'ın üzerindeki değerlerde ise ısı iletim katsayısı kısmen sabit kalmaktadır.



Şekil 2.47 Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Zhao vd., 2009).

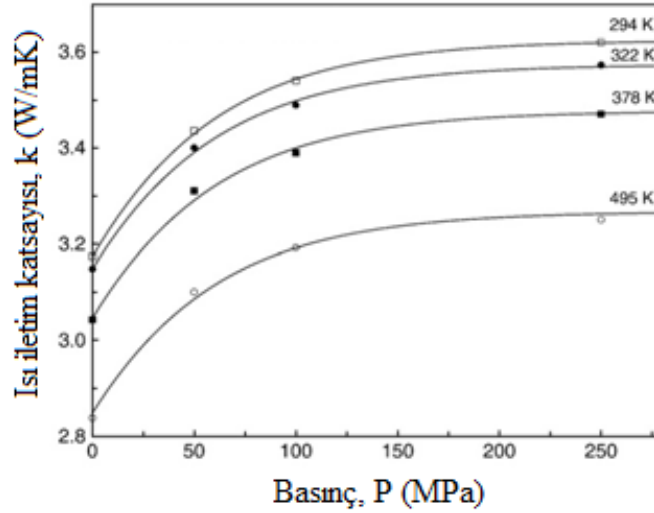


Şekil 2.48 Lifli yalıtım malzemeleri için sıcaklığa ve basınca bağlı olarak etkili ısı iletim katsayısının değişimi (Zhao vd., 2009).



Şekil 2.49 Lifli yalıtım malzemeleri için basınca bağlı olarak etkili ısı iletim katsayısının değişimi (Zhao vd., 2009).

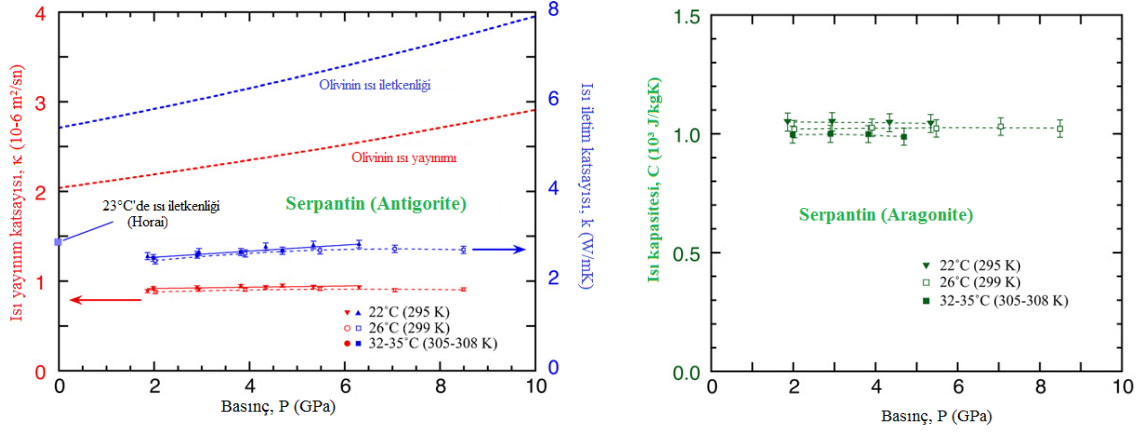
Abdulagatova vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada; yağa doymun ve %13 gözenekliliğe sahip kumtaşı numunesinin etkin ısı iletkenliği, 288-520K sıcaklık aralığı boyunca ve 250 MPa'a kadar olan basınçlarda sabit durumlu paralel plakalı düzenek aracılığıyla ölçülmüştür. Aynı kuru kumtaşı örneğinde olduğu gibi; 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 gözlemlenmiştir (Şekil 2.50). Basınç 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. Çalışmanın sonuçları; yağa doymun kumtaşı örneğinin ısı iletkenliğinin genellikle doyurucu akışkanın iletkenliği aracılığıyla belirlenebileceğini göstermiştir.



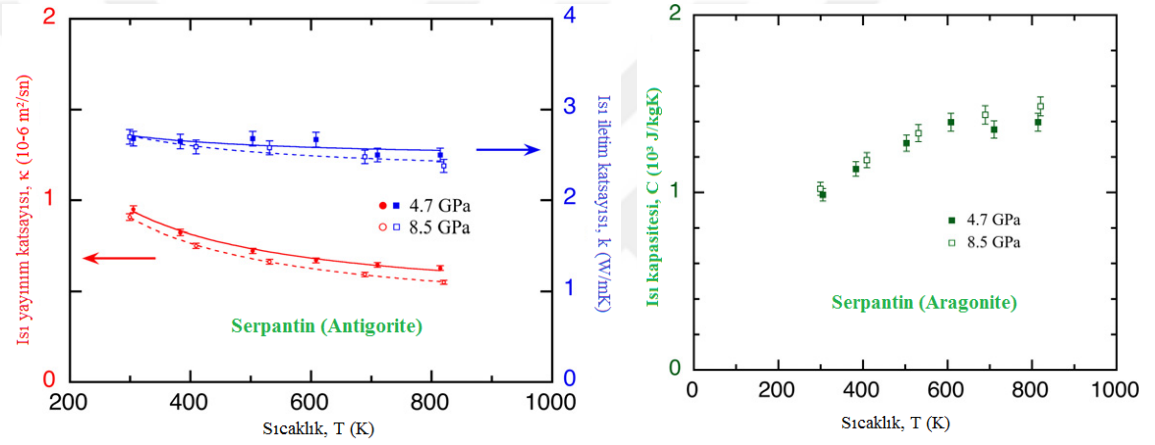
Şekil 2.50 Yağ doymun kumtaşı numunesinde basınç ve sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Abdulagatova vd., 2009).

Osako vd. (2010), serpantinin ısı özelliklerinde basınç ve sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişimi belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Kawai tipi yüksek basınç düzeneği aracılığıyla serpantinin ısı yayılım ve ısı iletim katsayılarını 8,5 GPa ve 800K'e kadar olan basınç (Şekil 2.51) ve sıcaklık (Şekil 2.52) değerleri için ölçmüşler ve bu değerlerin eşzamanlı ölçümünden yararlanarak serpantinin ısı kapasitesini belirlemişlerdir. Serpantinin 5 GPa basınç ve 300 K sıcaklıkta ısı yayılım katsayısı $0,9 \times 10^{-6}$ m²/sn ve ısı iletim katsayısı 2,7 W/mK'dir. Bu değerler aracılığıyla elde edilen ısı kapasitesi 1×10^3 J/kgK iken yüksek basınç altında ve yaklaşık 800 K sıcaklık değerinde serpantinin ısı kapasitesi $1,5 \times 10^3$ J/kgK'e yükselmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda serpantinin ısı kapasitesinin basınçtan bağımsız ancak sıcaklığa bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Serpantin düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle dalma zonlarında bir ısı yalıtım tabakası olarak işlev gördüğünü, bunun doğal bir sonucu olarak tabaka içindeki sıcaklıkların çevre sıcaklıklardan daha düşük olarak muhafaza edilmesinin beklenebileceğini ve bu düşük sıcaklık hareketliliği nedeniyle kararsız serpantinlerin susuzlaşma sınırını geçerek daha derin alanlara nüfuz edebileceğini ifade etmişlerdir. Perrillat vd. (2005) tarafından ifade edilen ve kararsız serpantinlerdeki ani bir susuzlaşmanın orta derinliklerdeki (50-130 km) depremler için olası tetikleyicilerden biri olabileceği hususuna vurgu yapmışlardır.



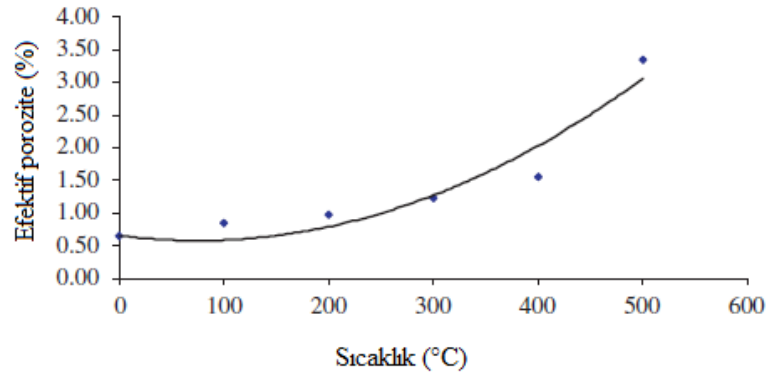
Şekil 2.51 Isı yayılım, ısı iletim katsayılarının ve ısı kapasitesinin basınçla değişimi (Osako vd., 2010).



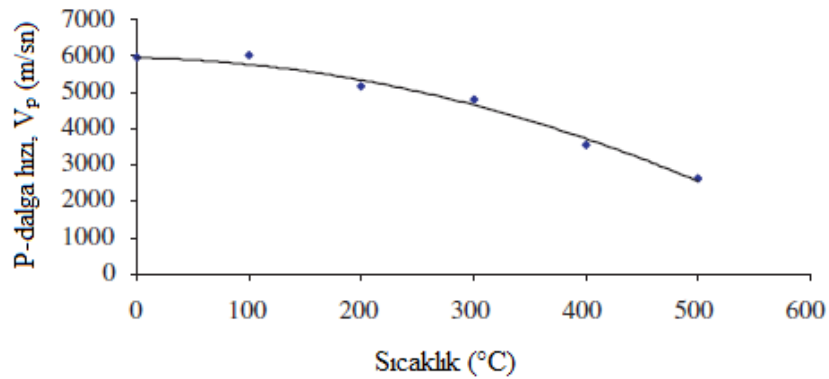
Şekil 2.52 Isı yayılım, ısı iletim katsayılarının ve ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi (Osako vd., 2010).

Yavuz vd. (2010) karbonatlı kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde ısıl değişimlerin etkisini incelemek amacıyla; farklı tane boyutuna, gözenekliliğe, yapısal ve dokusal karakteristiklere sahip ve esas itibarıyla kalsit ağırlıklı iki farklı mermer ve üç farklı kireçtaşı örnekleri üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Örnekler kübik olarak hazırlanmış olup mikro yapı, birim hacim ağırlık, efektif porozite ve P-dalga hızı gibi fiziksel parametreler üzerinde sıcaklık değişiminin etkisini araştırmak amacıyla kademeli olarak 100, 200, 300, 400 ve 500°C'ye ısıtılmış ve ısıl bir şoka neden olmayacak şekilde kademeli olarak oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Fiziksel özelliklerdeki değişimlerin nedenlerini ortaya koymak için petrografik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Bütün ısıtma seviyelerinde numunelerde meydana gelen değişimlerin çoğu sabit sıcaklıkta 24 saatlik bir ısıtma süresi içerisinde meydana gelmiştir. 100°C seviyesinde bütün kayalarda ölçülen hız değerleri başlangıçtaki seviyelerden daha yüksektir. Bu artış kireçtaşlarına nazaran mermer numunelerinde daha belirgindir. Bu durum kalsit genişmesi sonucu kayaç yapısında meydana gelen sıkışmadan kaynaklanmaktadır. Karbonatlı kayalarda ısıl etkiden dolayı meydana gelen çatlaklar 150°C'den küçük sıcaklık değerlerinde o kadar önemli değildir. 150°C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde bütün kayalarda önemli hasarlar başlamıştır. Hasar yoğunluğu, sıcaklık artışına bağlı olarak P-dalga hızı ve efektif gözeneklilik değerlerinde meydana gelen değişimlerle açıklanabilir. Sonuç olarak porozite ve P-dalga hızı için en iyi korelasyonu veren denklemler elde edilmiş olup Burdur bej mermerlerine ait örnek diyagramlar Şekil 2.53 ve Şekil 2.54'de verilmiştir.

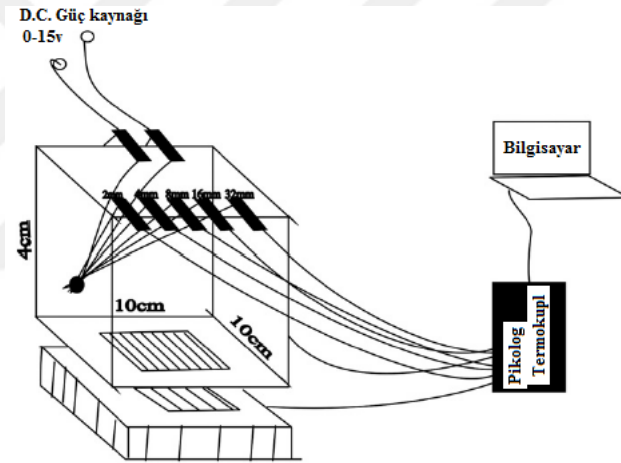


Şekil 2.53 Burdur bej numunesinde sıcaklığa bağlı olarak efektif porozitenin değişimi (Yavuz vd., 2010).



Şekil 2.54 Burdur bej numunesinde sıcaklığa bağlı olarak P-dalga hızının değişimi (Yavuz vd., 2010).

Akınyemi vd. (2011); gözenekli malzemelerin ısı iletim katsayılarının belirlenmesi çalışmaları kapsamında, ısıl ara yüzey malzemesi (Thermal Interface Material-TIM) kullanılarak ve kullanılmaksızın granit ve kilin ısı iletim katsayıları üzerinde blok ve numune yüzeyi arasındaki kontak direncin etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Isı iletim katsayısı ölçümleri; hem blok yöntemi (Şekil 2.55) hem de KD2 pro (Şekil 2.56) cihazı aracılığıyla, 0,05 mm kalınlığında ısıl ara yüzey malzemesi kullanılarak ve kullanılmaksızın, granit, kuru kil, nemli kil ve nemli kum üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kuru kilin ısı iletim katsayısı blok yönteminde ısıl ara yüzey kullanılmaksızın 0,68 W/mK iken ısıl ara yüzey kullanılarak 0,85 W/mK olup %20'lik bir artış söz konusudur. KD2 pro cihazı ile ölçülen değerler ise zikredildikleri sıra ile 0,66 W/mK ve 0,84 W/mK olup değerler arasında %21'lik bir artış vardır. Ölçüm sonuçları Çizelge 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.55 Blok düzeneği (Akınyemi vd., 2011).



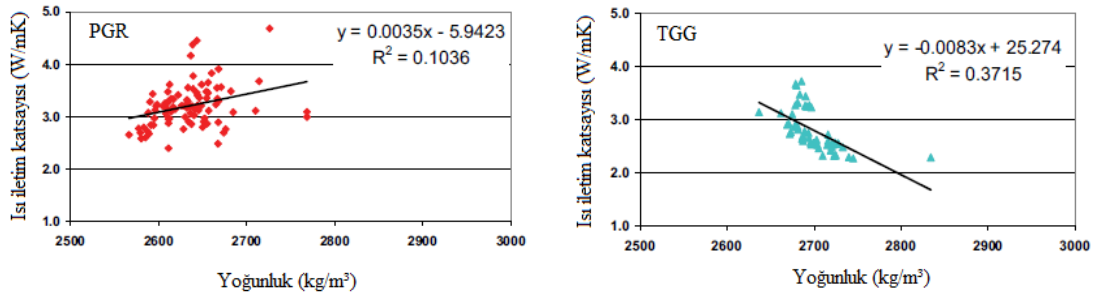
Şekil 2.56 KD2 Pro cihazı (Akınyemi vd., 2011).

Çizelge 2.4 Numunelerin ısı ı ara yüzeyli ve ısı ı ara yüzeyli ısı ı iletim katsayıları (Akinyemi vd., 2011).

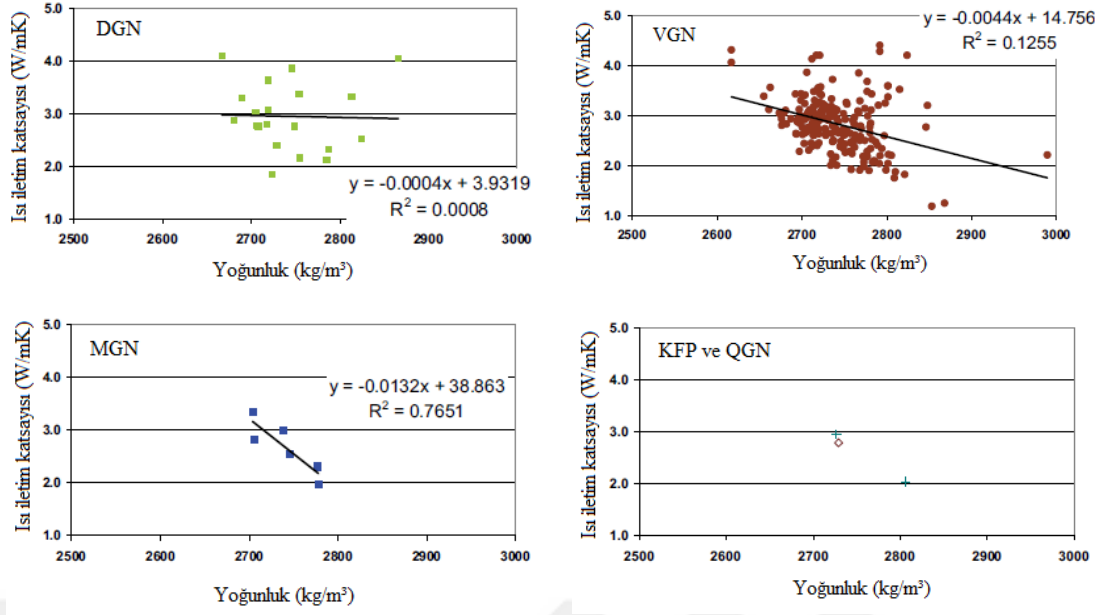
Numuneler	TIM'siz Blok Yöntemi	TIM'li Blok Yöntemi	Fark	%	TIM'siz KD2 Pro	TIM'li KD2 Pro	Fark	%
Kuru kil	0,68	0,85	0,17	20	0,66	0,84	0,18	21
Granit	2,95	3,95	1,00	25	2,93	3,96	1,03	26
Nemli kum	0,44	0,67	0,23	34	0,46	0,72	0,26	34
Nemli kil	1,16	1,69	0,53	31	1,22	1,66	0,44	26,5

Sonuç olarak; ısı ı ara yüzey malzemesi kullanılarak ve kullanılmaksızın elde edilen değerlerden de açıkça görüleceği üzere, ısı ı iletim katsayıları arasında önemli farklılıkların olduğunu ve blok ile numune arasında meydana gelen kontak direnç hatalarının azaltılmasında ısı ı ara yüzey malzemesinin etkinliğini ortaya koymuşlardır.

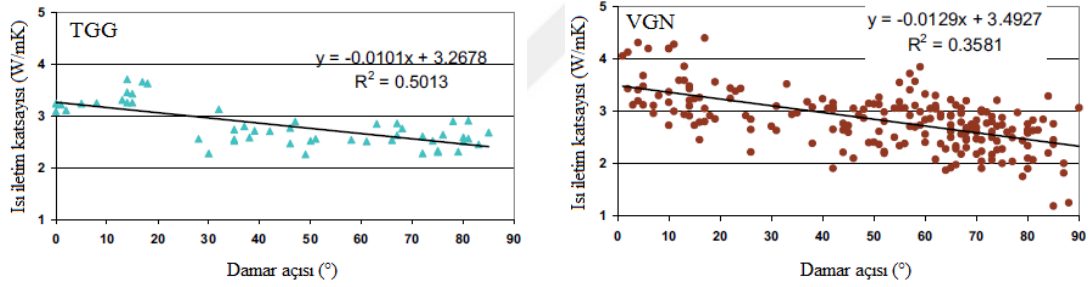
Kukkonen vd. (2011); Olkiluoto bölgesini temsil eden granit ve gnays türü kayaçların ısı ı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, 6 farklı kayaç türü için yoğunluğa ve ısı ı iletkenlik ölçüm yönü-kayaç tabakalanma veya gnays bantlaşma yönü arasındaki açığa bağlı olarak ısı ı iletim katsayısının değişimini incelemiştirlerdir. Isıl özellikler pegmatitik granit ile zayıf pozitif korelasyon, tonalitik–granodiyoritik–granitik, damarlı ve mikalı gnays ile zayıf negatif korelasyon göstermektedir (Şekil 2.57-2.58). Ölçüm yönü-tabakalanma yönü arasındaki değişim en iyi şekilde tonalitik–granodiyoritik–granitik ve damarlı gnaysda gözlenmiş, diğer kayaç türleri için bir ilişki elde edilememiştir (Şekil 2.59). En düşük ısı ı iletkenlik tabakalanmaya dik yönde (ortalama 2,4 W/mK) ve en yüksek ise tabakalanma boyunca (ortalama 3,4 W/mK) ölçülmüştür.



Şekil 2.57 Ana kayaçlarda yoğunluğa bağlı olarak ısı ı iletim katsayısının değişimi (PGR, pegmatitik granit; TGG, tonalitik–granodiyoritik–granitik gnays) (Kukkonen vd., 2011).



Şekil 2.58 Ana kayalarda yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (VGN, damarlı gnays; DGN, diatexitik gnays; MGN, mikalı gnays; KFP, potasyum-feldspat porfiri; QGN, kuvarslı gnays) (Kukkonen vd., 2011).



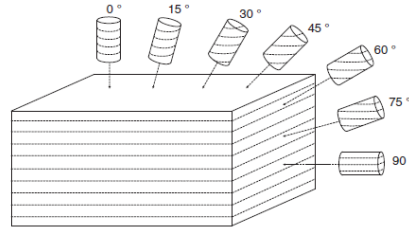
Şekil 2.59 Ana kayalarda ölçüm yönü-tabakalanma yönü arasındaki açıya bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (VGN, damarlı gnays; TGG, tonalitik–granodiyoritik–granitik gnays) (Kukkonen vd., 2011).

Kim vd. (2012); Kore'deki anizotropik kayaç oluşumlarından Asan gnaysı, Boryeong şeyli ve Yeoncheon şistinin elastisite modülü, P dalga hızı ve ısıl iletkenliklerinin anizotropik özelliklerini ortaya koymak amacıyla, sözkonusu kayaç türlerinin her biri için laboratuvar ölçekli yönsel karot alma sistemi (Cho vd., 2012) (Şekil 2.60) aracılığıyla enine izotropik düzlemde 15 derece aralıklarla farklı anizotropik açılara sahip (0°-15°-30°-45°-60°-75°-90°) ve her bir sette 7 adet olmak üzere iki veya üç set karot örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde numune eksenini boyunca elastisite modülü, P-dalga hızları ve ısıl iletkenlikler (Şekil 2.61) ölçülmüştür. Anizotropi açısına göre elastisite modülü ile P-dalga hızı ve ısı iletim katsayısının

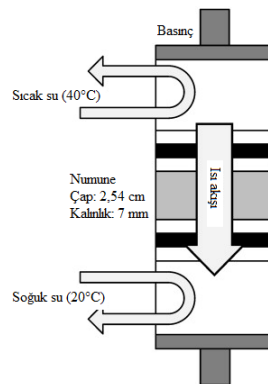
değişimi Şekil 2.62’de ve elastisite modülü - P-dalga hızı/ elastisite modülü - ısı iletim katsayısı/ ısı iletim katsayısı - P-dalga hızı arasındaki ilişkiler ise Şekil 2.63 ve Şekil 2.64’de verilmiştir.

Isı iletim katsayısı değerleri Asan gnaysı için 1,67-2,88 W/mK, Boryeong şeyli için 1,51-3,5 W/mK ve Yeoncheon şisti için ise 1,33-4,0 W/mK’dir. Aynı sıralama doğrultusunda P-dalga hızı değerleri 4360-5100 m/sn, 3520-5140 m/sn ve 2570-5850 m/sn ve elastisite modülü değerleri ise 54-68 GPa, 19-40 GPa ve 22-74 GPa’dır.

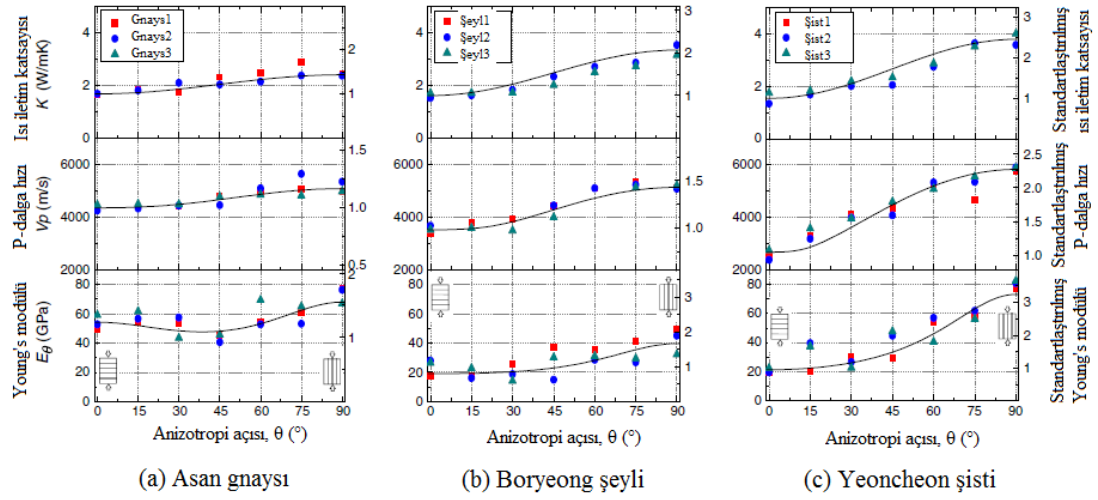
Yönel izotropik düzleme paralel özelliklerin düzleme dik özelliklere oranı olarak tanımlanan anizotropi oranı; Asan gnaysı, Boryeong şeyli ve Yeoncheon şistinin ısı iletkenlikleri için $[K(90^\circ)/K(0^\circ)]$ sırasıyla 1,4-2,1-2,5; P-dalga hızı için $[VP(90^\circ)/VP(0^\circ)]$ 1,2-1,5-2,3 ve elastisite modülü için ise 1,3-2,1-3,4 olarak belirlenmiştir. “Elde edilen anizotropi dereceleri; kayaç özelliklerinde anizotropinin göz ardı edilmesinin hatalı sonuçlar doğuracağını göstermektedir.” ifadesi araştırmacılar tarafından yapılan çalışmanın sonucu olarak vurgulanmıştır.



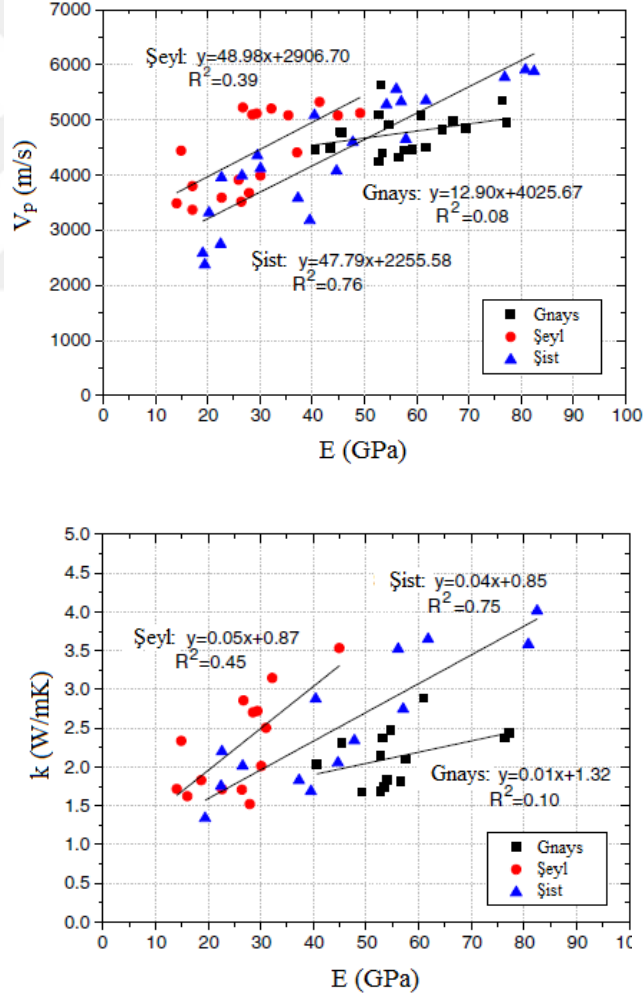
Şekil 2.60 Yönel karot alımı aracılığıyla numune hazırlama (Cho vd., 2012).



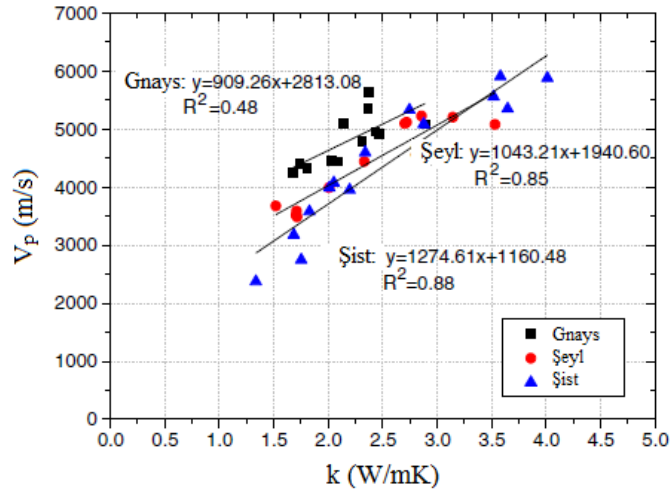
Şekil 2.61 Bölünmüş bar yöntemi ile ısı iletim katsayısı ölçüm düzeneği (Beardsmore ve Cull, 2001’den geliştirilmiştir.) (Kim vd., 2012).



Şekil 2.62 Anizotropi açısına göre elastisite modülü (E), P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısının (k) değişimi (Kim vd., 2012).



Şekil 2.63 Elastik modülü (E) ile P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısı (k) arasındaki ilişki (Kim vd., 2012).

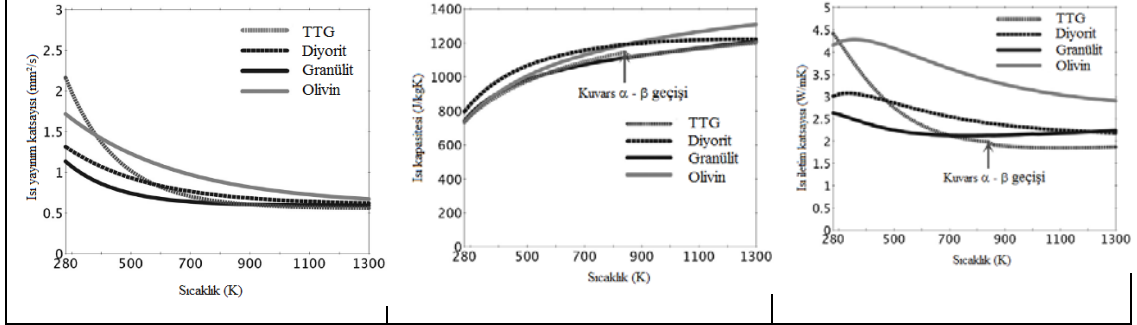


Şekil 2.64 P-dalga hızı (V_p) ve ısı iletim katsayısı (k) arasındaki ilişki (Kim vd., 2012).

Merriman vd. (2013); Archean kaya katmanlarının ısı özelliklerine yönelik olarak yaptıkları çalışmada, diyorit, mafik granülit ve tonalit-trondjhemit-granodiyorit örneklerinden oluşan 14 farklı numunenin ısı yayılım katsayısı değerlerini atmosfer basıncında 1000°C 'ye kadar olan sıcaklıklarda lazer flaş yöntemi aracılığıyla belirlemişlerdir. Demir bantları içeren numunelerde ısı yayılım katsayısı oda sıcaklığı için $3,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ iken kuvarşça zayıf trondjhemit için bu değer $0,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ 'dir. Tüm numunelerde ısı yayılım katsayısının sıcaklığa bağlı olarak azaldığını ifade etmişlerdir (Şekil 2.65). Bu sonuçları ölçülen yoğunluk ve modal mineralojiden hesaplanan ısı kapasitesi değerleri ile birleştirmek suretiyle her bir kayaç grubu için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ısı iletim katsayısı değerlerini elde etmişlerdir. Yüzeğe yakın ısı iletim katsayısı değerleri kayaç türüne bağlı olarak $2,7\text{-}4,2 \text{ W/mK}$ arasında değişmekte iken en alt kabukta bu değer yaklaşık olarak 2 W/mK 'dir. Bu değerler doğrultusunda ısı iletim katsayısının litolojiye bağlılığının zayıf olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Gornov (2015), Komsomol'sk cevher bölgesindeki Festival'noe, Pereval'noe ve Sobolinoe maden yataklarındaki jura yaşlı filişimsi sığ deniz tortullarının (silttaşı, kiltası ve kumtaşı), kretase yaşlı volkanik sedimanter kayaçların (andezit, liparit ve dasit tüfler), sokulum kayaçlarının (granodiyorit ve porfiritle) ve metasomatik kayaçların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik ayrıntılı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kayaçların ısı iletkenliği; kuyulardan minimum örnekleme aralığı yaklaşık 1 m olacak şekilde alınan toplamda 2000 'den fazla karot örnekleri üzerinde

"k-profil" kullanılarak "optik tarama" aracılığıyla belirlenmiştir. Cihaz, ısı iletkenliğinin 1-10 W/mK sınırları içerisinde \pm %5'den daha fazla olmayan bir hata ile ölçülmesine izin vermektedir.



Şekil 2.65 Üç farklı kayaç grubu ve olivin için ısıl özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Merriman vd., 2013).

Kayaçlar ve cevherler hakkındaki önemli bilgiler; kayaçların mineral bileşimleri, yapısı, dokusu ve hidrotermal-metasomatik alterasyon derecesi ile ilişkili olarak her numunedeki ısıl iletkenliğin değişimini karakterize eden ısıl homojensizlik faktörü (β) aracılığıyla elde edilmekte olup bu durum birkaç termofiziksel özelliğin aynı anda belirlenebilmesine ve ölçüm sonuçlarının temsil edilebilirliğine olanak sağlamaktadır. Çalışılan bölgedeki kayaçlara ait ısı iletim katsayısı değerleri ve bu değerlerin metasomatik alterasyon derecesi ile ilişkileri Çizelge 2.5 ve 2.6'da verilmiştir.

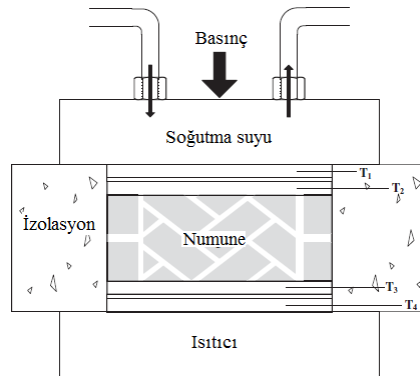
Çizelge 2.5 Konsomol'sk cevher bölgesindeki kayaçların ısı iletim katsayıları (Gornov, 2015).

Kayaçlar	Parametreler				Numune Sayısı
	k_{max} (W/mK)	k_{min} (W/mK)	k_{ort} (W/mK)	β ($k_{max}-k_{min}$)/ k_{ort}	
Andezit tüf	2,56	2,28	2,44	0,12	106
Liparit tüf	2,64	2,46	2,56	0,07	398
Silttaşı, kiltası	2,66	2,33	2,48	0,13	480
Silisleşmiş silttaşı ve kiltası	3,46	2,57	2,95	0,32	88
Hornfelsli kumtaşı	3,15	2,59	2,86	0,20	40
Granodiyorit-porfir	2,61	2,36	2,49	0,10	304
Kuars- serisit metasomatik kayaçlar	2,62	2,34	2,49	0,11	80
Gözenekli, çatlaklı Yoğun	2,24	1,98	2,10	0,13	45
Turmalin-kuvars metasomatik kayaçlar	2,89	2,62	2,76	0,10	50
Turmalin-kuvars metasomatik kayaçlar	3,18	2,85	3,04	0,10	90
Silisleşmiş, turmalinleşmiş, kloritleşmiş granodiyorit-porfir	2,98	2,68	2,85	0,10	78
Kuars-feldspat metasomatik kayaçlar	2,84	2,60	2,72	0,09	92
Turmalin-kuvars metasomatik kayaçlar	4,72	4,07	4,47	0,15	205
Kuars metasomatik kayaçlar	4,78	4,28	4,56	0,11	60

Çizelge 2.6 Konsomol'sk cevher bölgesindeki kayaçların metasomatik alterasyon dereceleri ile ısı iletim katsayıları arasındaki ilişki (Gornov, 2015).

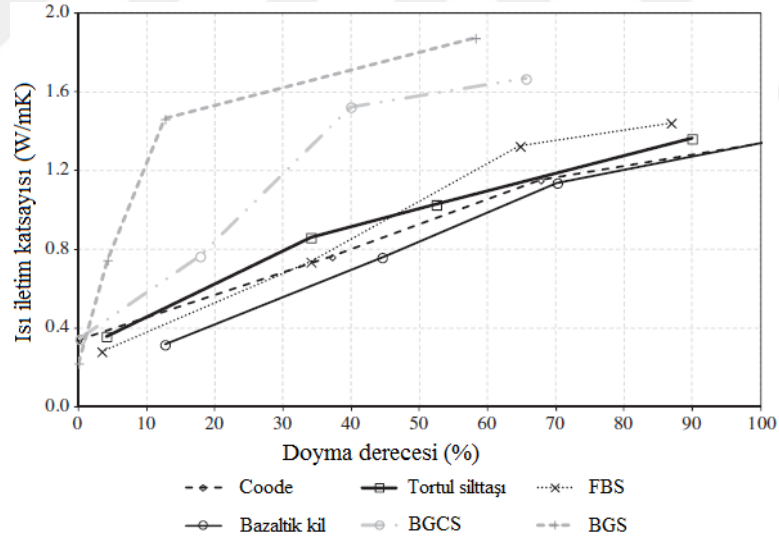
Kayaç	Ana kayaç içeriği (%)	Mineral bileşimi (%)	K_{ort} (W/mK)
Zayıf altere olmuş granitler	85 – 95 (Plajioklaz, kuvars, K-feldspat)	Plajioklaz: 50-60 Kuars: 20-25 Potasyum-feldspat: 15-20 Biyotir, klorit, turmalin, albit, titanit: 5-15 Kuars: 25-30 Turmalin: 5-7	2,40–2,50
Turmalinleşmiş, silisleşmiş granitler	40 (K-feldspat, plajioklaz)	Muskovit: 10-15 Kalsit, zirkon, klorit, apatit, titanit: 2-5 Kuars: 40-45 Turmalin: 10-15	2,62–2,92
Turmalin-kuvars metasomatik kayaçlar	10 – 15 (Feldspat, plajioklaz)	Muskovit: 5-12 Albit: 10-15 Kalsit: 5-12 Zirkon, klorit, apatit, titanit: 2-5 Kuars: 60-80	3,07–3,44
Yoğun turmalin-kuvars metasomatik kayaçlar	0 (Plajioklaz, kuvars, K-feldspat)	Turmalin: 15-20 Karbonat, klorit, apatit, zirkon, titanit: 2-5-10	3,74–4,15

Barry-Macaulay vd. (2013); zemin ve kayaçların ısıl iletkenliklerinin jeotermal enerji tesisleri ve kuyu ısı alışverişi sistemleri gibi ısıl olarak aktif zemin yapılarının tasarımında önemli bir özellik olduğunu vurgulamışlardır. Zemin ve kayaçların ısıl iletkenliklerinin; yoğunluk, nem içeriği, doyma derecesi, mineralojik kompozisyon, tane büyüklüğü ve anizotropi gibi faktörlerin etkisi altında olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kapsamda Melbourne, Avustralya çevresindeki siltli kil, kumlu kil, kum ve killi kum içeren 6 farklı zemin numunelerinde iğne prob ve silttaş, kumtaş ve bazalt olmak üzere 3 farklı kayaç türünden alınan örnekler üzerinde ise bölünmüş bar yöntemi (Şekil 2.66) kullanılarak laboratuvar ortamında ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 2.66 Bölünmüş bar düzeneği ile ısı iletim katsayısı ölçümü (Barry-Macaulay vd., 2013).

Farklı nem içeriğine sahip zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler, kuru yoğunluğa bağlı olarak zemin örneklerinin ısı iletim katsayısının arttığını, göstermiştir. Bazalt, kumtaşı ve silttaşı örnekleri üzerinde yapılan deneylerde ise; havaya doymun numunelerin ısı iletim katsayısının kuru yoğunlukla lineer olarak arttığı, suya doymun numunelerde ise bu artış oranının daha az olduğu belirlenmiştir. Zemin numunelerinin ısı iletkenlikleri üzerinde doyma derecesinin etkileri araştırılmıştır (Şekil 2.67). Taneli zeminlerin ısı iletim katsayıları düşük doyma derecelerinde hızlı bir artış göstermiş ancak daha sonra bu artış hızı yavaşlamıştır. Diğer taraftan ince taneli zeminlerin ısı iletim katsayılarının doyma derecesine bağlı olarak artışı nisbeten daha düzenli bir artış göstermektedir. Doyma derecesindeki artışa zeminlerin vermiş olduğu farklı tepkiler zeminlerin tane büyüklüklerinin farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Tane büyüklüğüne bağlı olarak taneler arasındaki temas noktalarının varlığı (az ya da çok) değişir ve bu durum suya doymunluk derecesini ve doğal olarak ısı iletim katsayısındaki artışın eğilimini etkiler.



Şekil 2.67 Doyma derecesine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Barry-Macaulay vd., 2013).

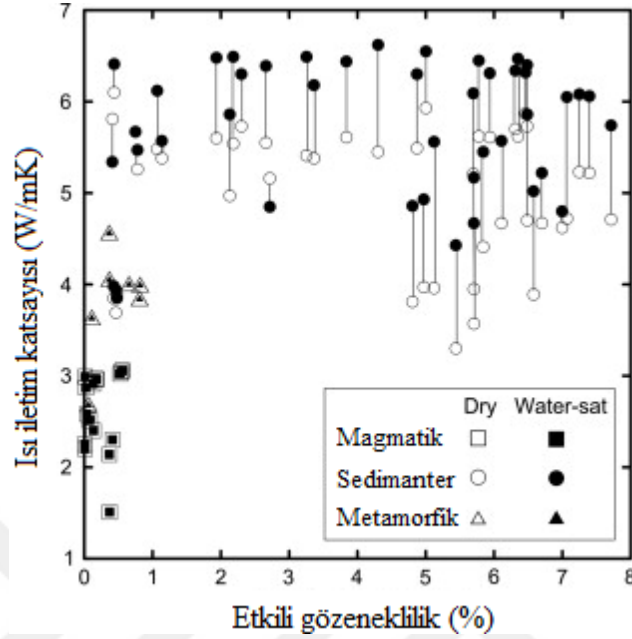
Aynı yoğunluk (1600 kg/m^3) ve su içeriğine (%20) sahip bütün zemin örneklerinin kuvars içeriklerine bağlı olarak ısı iletim katsayılarının değişimi incelenmiş; yüksek kuvars içeriğinin yüksek ısı iletkenlikle sonuçlandığı ve düşük kuvars içeriğine sahip ince taneli zeminlerin iri taneli zeminlerden önemli oranda daha düşük ısı iletkenliklere sahip olduğu görülmüştür. Anizotropinin ısı iletim katsayısı üzerindeki

etkisini belirlemek amacıyla tabakalanma yönüne farklı açılarda alınan 30 adet silttaş numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler, tabakalanma yönündeki artışa (0°'den 90°'ye doğru) bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığını göstermiştir.

Nagaraju ve Roy (2015); suya doygunluğun kayaçların ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerinin araştırılması kapsamında, magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaçlardan alınan 67 adet örnek üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Numunelerin etkili gözeneklilikleri belirlenmiş ve ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta sabit durumlu ısıl iletkenlik ölçme cihazı ile kuru ve suya doygun koşullarda ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kayaç örnekleri baz alındığında ısı iletim katsayısı değerleri kuru numuneler için 1,5-6,1 W/mK, suya doygun numuneler için 1,5-6,6 W/mK değerleri arasındadır. Sedimanter kayaçlar için ısı iletim katsayısı değerleri kuru numunelerde 3,3-6,1 W/mK olup ortalama $5,0 \pm 0,8$ (standart sapma) W/mK, suya doygun numuneler için 3,9-6,6 W/mK olup ortalama $5,7 \pm 0,8$ W/mK'dir. Mineralojik kompozisyon, boşluk geometrisi ve gözenekliliklerindeki farklılıklardan dolayı kumtaşlarının iletkenliklerinde nisbeten geniş bir aralık söz konusudur. Magmatik kayaçlar için ısı iletim katsayısı değerleri kuru numunelerde 1,5-3,1 W/mK olup ortalama $2,6 \pm 0,4$ W/mK, suya doygun numuneler için 1,5-3,2 W/mK olup ortalama $2,6 \pm 0,5$ W/mK'dir. Magmatik kayaçlarda olduğu gibi metamorfik kayaçlarda da kuru ve yaş koşullardaki iletkenlik değerleri küçük değişimler gösterir. Metamorfik kayaçlar için ısı iletim katsayısı değerleri kuru numunelerde 2,7-4,6 W/mK olup ortalama $3,8 \pm 0,6$ W/mK, suya doygun numuneler için 2,6-4,5 W/mK olup ortalama $3,9 \pm 0,6$ W/mK'dir.

Kayaçlardan alınan numunelerin gözeneklilikleri %0-%8 arasında değişmektedir. Gözenekliliğe bağlı olarak üç farklı kayaç türü için kuru ve suya doygun halde ölçülen ısıl iletkenliklerin değişimi Şekil 2.68'de verilmiştir. Etkili gözeneklilikleri %1'den küçük olan magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaç örnekleri için kuru ve suya doygun haldeki ısıl iletkenlikler arasında önemli farklılıklar yoktur. Etkili gözeneklilikleri %1'den büyük olan kayaç örnekleri kuru duruma göre suya doygun koşullarda genellikle daha yüksek ısıl iletkenlik göstermektedirler. Sedimanter kayaçlarda gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler; çalışma alanındaki kumtaşlarının, ince taneli ve iyi sıkıştırılmış örneklerde <%1'den orta derecede konsolide edilmiş örneklerde (örneğin kuvarslı kumtaşları için %5-8 ve ara bantlar

şeklinde silttaşları içeren kumtaşı için %2-6) yaklaşık %8'e kadar geniş bir gözeneklilik aralığına sahip olduğunu göstermiştir.

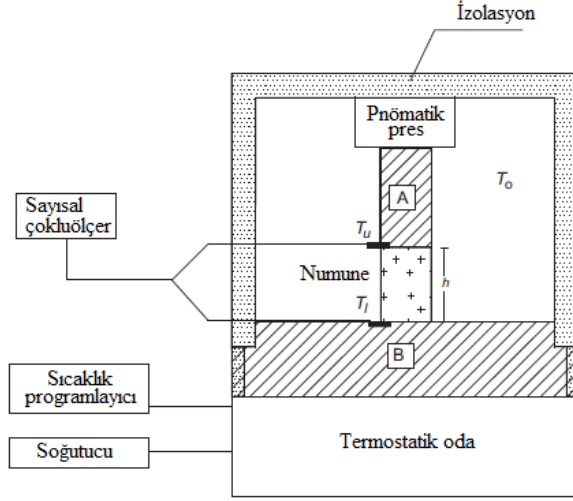


Şekil 2.68 Kuru ve suya doymuş koşullarda etkili gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Nagaraju ve Roy, 2015).

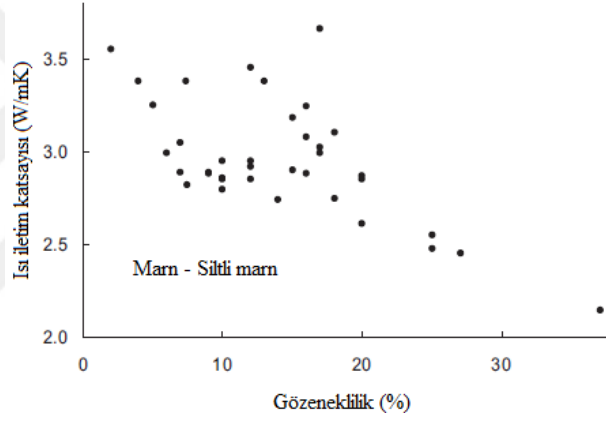
Pasquale vd. (2015); sedimanter ve kristalen kayaçların ısı iletkenliklerini bölünmüş bar yöntemi (Şekil 2.69) aracılığıyla ölçmüşler, kristalen kayaçların yoğunluk ve sedimanter kayaçların yoğunluk ve gözeneklilik değerlerini belirleyerek, kayaçların yoğunluk ve gözenekliliklerine bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimini incelemişlerdir.

Sedimanter kayaçların ısı iletim katsayısı değerleri 2,2-4,6 W/mK aralığında değişmekte olup en düşük değer kalkerli marna en yüksek değer ise dolomite aittir. Gözeneklilik değerleri ise %3 (radyolarit, kıltaşı ve anhidrit) ile %30 (kalkarenit ve kalkerli marn) arasında değişmektedir. Aynı litolojiye ve numune sayısına sahip sedimanter kayaçlar için (marn ve siltli marn) ısı iletim katsayısı ve gözeneklilik arasındaki ilişki Şekil 2.70'da verilmiştir.

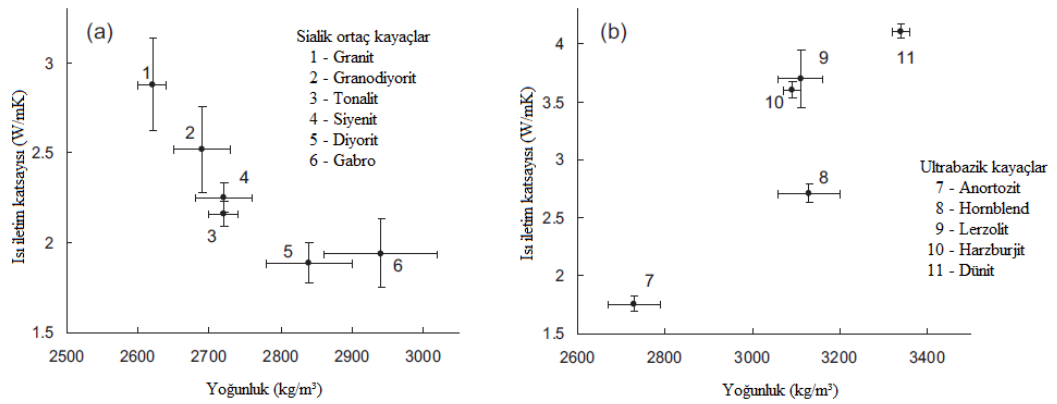
Düşük gözenekliliğe (%1,5) sahip kristalen kayaçların ısı iletim katsayısı değerleri ise 1,8-4,1 W/mK arasında değişmekte olup yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi Şekil 2.71'de verilmiştir.



Şekil 2.69 Laboratuvarında ısıl iletkenliğin belirlenmesi için kullanılan bölünmüş bar düzeneği (Pasquale vd., 2015).



Şekil 2.70 Marn ve siltli marn için gözenekliliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Pasquale vd., 2015).



Şekil 2.71 Kristalen kayalarda yoğunluğa bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Pasquale vd., 2015).

Kristalen kayaçlarda ısı iletkenlik ve yoğunluk arasında bir ilişki gözlenememiştir. Ancak siyalitik ortaç ve ultrabazik kayaçlar ayrı ayrı ele alındığında; siyalitik kayaçlar için yoğunluğa bağılı olarak ısı iletim katsayısının azaldığı ve ultrabazik kayaçlar için ise arttığı söylenebilir. Granitten gabroya doğru yoğunluğun artmasıyla birlikte ısı iletim katsayısının azalması hornblend artışına paralel olarak kuvars içeriğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, kuvars yüksek ısı iletkenliğe (7,69 W/mK) ve düşük yoğunluğa (2650 kg/m³) sahip olmasına karşın hornblend düşük ısı iletkenlik (2,81 W/mK) ve yüksek yoğunluğa (3180 kg/m³) sahiptir (Horai, 1971).

Ultrabazik kayaçlar için ise; yoğunluğun artmasıyla birlikte ısı iletim katsayısının artması olivin içeriği ile açıklanabilir. Çünkü olivin yüksek ısı iletkenlik (4,0 W/mK) ve yoğunluğa (3300 kg/m³) sahiptir. Anortozit olivin içermez ve bu nedenle en düşük yoğunluk ve ısı iletim katsayısı değerleri ile karakterize edilmektedir. Anortozitin bu özellikleri, ana kayaç oluşum minerali olan plajiyoklazın düşük ısı iletkenlik (1,97 W/mK) ve yoğunluğa (2650 kg/m³) sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Isı iletkenliğin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için numune kalınlığı ile tane boyutu arasındaki oranın 15'den büyük olması gerektiği hususunun (Beck, 1965) sedimanter kayaçlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda her zaman dikkate alındığı yazarlar tarafından vurgulanmıştır. Hatta granit, granodiyorit ve lerzolit gibi bazı kristalen kayaçların ortalama ısı iletim katsayısına ait büyük standart sapma değerlerinin tane boyutu ile ilişkilendirilebileceğini ifade etmişlerdir.

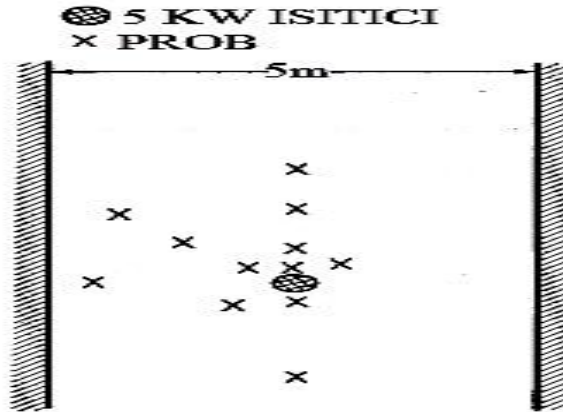
Araştırmacılara göre kayaçlardaki çatlaklar ve ısı iletim direnç sonuçları fazlasıyla etkileyebilmektedir. Bununla birlikte; Walsh ve Decker (1966) ve Clauser ve Huenges (1995), bu etkinin suya doymuş kayaçlarda gerçekleştirilen ölçümlerde kuru kayaçlardakine nazaran daha az olduğu görüşündedirler.

Ayrıca; vakumlama yapılmaksızın suya doymuş hale getirilen kayaç örneklerinde mikro çatlaklar oluşabileceğine ve bu durumun özellikle düşük gözenekli kayaç örneklerinde gerçekleştirilen ısı iletkenlik ölçümlerinde önemli hatalara neden olabileceğine işaret etmişlerdir.

2.8 Yeraltı Kaya Yapılarının Depolama Amaçlı Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Jeffrey vd. (1979) tarafından gerçekleştirilen çalışma; İsveç'te Stripa madeninde, granitin yerinde ısı özelliklerinin ölçülmesi suretiyle bölgenin nükleer atıkların depolanmasına uygunluğunun belirlenmesi amacıyla yönelik bir araştırma olup ölçümler, ana galeriden ayrılan ve yeryüzünden itibaren 338 m ile 360 m arasında değişen derinliklerde bulunan galerilerde gerçekleştirilmiştir. Nükleer atıklar; çevre kayacın içerisine yerleştirilen değişken güç çıkışlı silindirik elektriksel ısıtıcılar, termokupllar, ekstensometreler (uzama ölçerler) ve gerilimölçerler aracılığıyla simule edilmiştir.

5 kW'lık sabit bir çıkış gücüne sahip, 0,16 m çapında ve 2,59 m uzunluğundaki bir ısıtıcı, merkezi kuyu tabanından 4,25 m aşağıda olacak şekilde yerleştirilmiş, termokupl ve diğer ölçerler ise ısıtıcının etrafında farklı şekilde konumlandırılmışlardır (Şekil 2.72).



Şekil 2.72 Stripa BHT ölçüm düzeneği (Jeffrey vd., 1979).

Deneyleerde; kayacın homojen, izotropik ve lineer olduğu, ısıtıcının kayac ile mükemmel temas halinde bulunduğu ve ısı transferinin sadece iletim yoluyla gerçekleştiği kabul edilmiştir. Sonlu hat kaynağı çözümüne uygun en küçük kareler yöntemi aracılığıyla 5 kW'lık geniş çaplı bir ısıtıcı kullanılarak elde edilen sıcaklık verileri değerlendirmeye alınarak termofiziksel özellikler belirlenmiştir. Yerinde ölçümlerden elde edilen bu değerlerin laboratuvarında elde edilen değerlerden biraz daha yüksek olduğu ve numune boyutunun deneyleerde önemli olmadığı vurgulanmıştır.

Sonuç olarak; kaya kütlesinin yerinde ısı özelliklerini belirlemek için sonlu hat kaynağı modeli kullanılarak araştırmacılar tarafından bir “en küçük kareler şeması” geliştirilmiş ve nihai değerler sıcaklık ölçümlerinden bağımsız olarak tahmin edilmiştir. Stripa granitinin ısı iletim katsayısı 3,69 W/m°C ve termal difüzyivitesi ise $1.84 \cdot 10^{-6}$ m²/s olarak elde edilmiştir.

Ayrıca araştırmacılar; kaya kütlesi içerisindeki süreksizliklerin kayacın bölgesel heterojenliğine yol açtığını ancak bunun kayacın yığın ısı geçirgenliğinde önemli değişikliklere neden olmayacağını belirtmişlerdir. Aynı zamanda “suya doygun kayacın ısı geçirgenliğinin kuru numunelerin ısı geçirgenliğinden %10 kadar daha yüksek olabileceğine ve hatta bu durumun düşük poroziteli kayalar için de geçerli olabileceğine” vurgu yapmışlardır.

Blackford vd. (1985); Avustralya Atom Enerjisi Komisyonu Araştırma Kuruluşu (AAEC Research Establishment) için bir nükleer atık depolama alanının belirlenmesine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmada, kayaların ısı iletkenliklerini ölçmek için ısı kaynağı prob yöntemini (heat source probe) kullanmışlardır. Farklı depolama alanı oluşturacak yığınlar içerisinde açılan deliklerde ısı iletkenlik ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, yığın içerisindeki deliklerde kullanılmaya uygun 50 mm kalınlıkta polietilen bir malzeme ile kaplanmış olan bir prob dizayn etmişlerdir. Prob ve astar arasındaki zayıf ısı temas ve astarın etrafındaki dolgu malzemesinin ısı geçirgenliğinin bilinmemesi, yığın malzemesinin ısı geçirgenliğinin ölçülebilmesi için uzun ısıtma ve soğutma süreleri gerektirmiştir (> 10 saat).

Sıcaklığın mevsimsel değişimlerden etkilenmemesi amacıyla 9 m’lik bir derinlikte ve çevre malzemede makul bir sıcaklık artışı sağlamak için 12-18 saat aralığındaki bir zaman dilimi boyunca 5-20 W/m aralığında bir ısıtma gücü oluşturularak ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlemi sonlandırıldıktan hemen sonra soğuma aşamasındaki sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Ölçüm verilerinin en küçük karelere uydurma tekniği aracılığıyla değerlendirilmesi sonucunda; 1.77-3.12 W/mK arasında değişen ısı iletim katsayısı değerleri elde edilmiş, kumtaşının ısı iletkenlik değeri ise 5.10 W/mK olarak bulunmuştur. Prob ve çevresindeki sıcaklık dağılımı bir ısı transferi programı aracılığıyla hesaplanmış ve ölçümlerden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

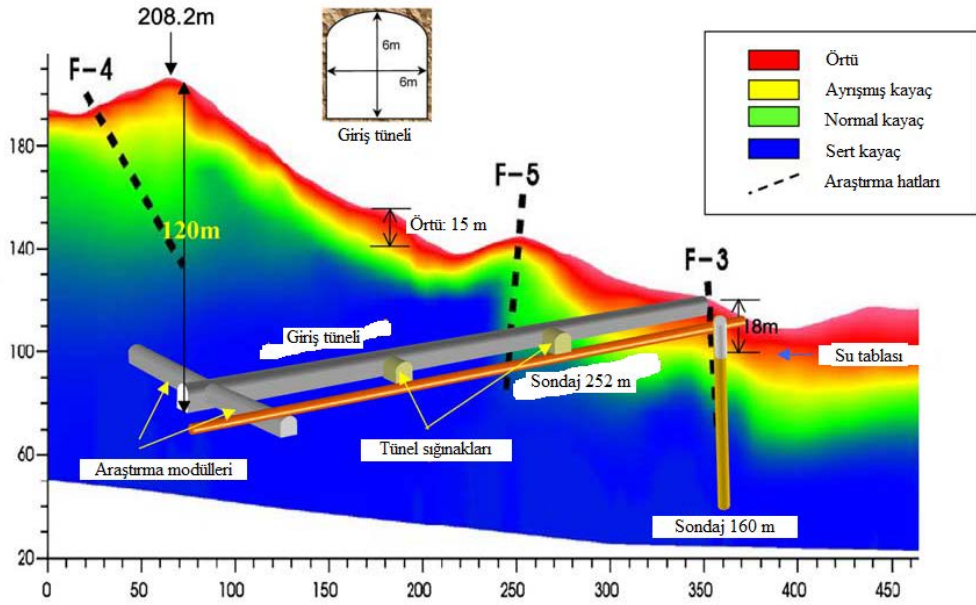
Jockwer vd. (2007), İsviçre’de bulunan MontTerri yeraltı araştırma laboratuvarında yüksek seviyeli radyoaktif atıkların kil formasyonu içerisinde depolanabilme olasılığını araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda; kil formasyonu elektrikli ısıtıcılar aracılığıyla 100°C’ye kadar ısıtılmış ve 18 ay boyunca araştırma sahasına yakın bölgelerdeki ısıl – hidrolojik – mekanik - kimyasal (Thermal – Hydrological - Mechanical- Chemical/THMC) süreçler gözlemlenmiştir.

10 cm çapında ve 2 m uzunluğunda bir ısıtıcı; 7 m derinliğinde ve 30 cm çapında açılan bir deliğin içerisine yerleştirilmiştir. Deliğin geri kalan kısmı (5 m), en dış çapı 28 cm ve en iç çapı 11 cm olan yüksek oranda sıkıştırılmış bentonit blokları ile doldurulmuştur. Isıtıcının en dış yüzeyindeki sıcaklık 100°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Isıtıcı deliği; ısıtılan ana kayacın kurummasını önlemek için, açık galeriye zıt yönde gaz geçirmez şekilde kapatılmıştır. Ayrıca ısıtıcı deliğe 0.35-3.65 m arasındaki mesafelerde 17 adet delik delinmiş ve bu delikler sıcaklık, toplam basınç, gözenek basıncı, nem ve ısıtıcının civarındaki radyal yer değiştirmelerin sürekli olarak izlenmesi, gaz çıkışının ve kilin su içeriğinin belirlenmesine yönelik jeoelektrik ölçümler için uygun şekilde donatılmıştır.

Kil formasyonundan açığa çıkan karbondioksit ve hidrojen sülfür gazları en önemli gaz bileşenleridir. Bu bileşenler; radyoaktif atıkların atılmasının, uzun vadeli güvenlik durumu açısından önem taşıdığını göstermektedir. Deliklerde; sıcaklığa bağlı olarak oluşan basınç artışının açığa çıkan gaz miktarı ile uyuşmaması, deney bölgesindeki kilin gaz geçirmez olmadığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Su dağılımı ile ilgili jeoelektriksel ölçümler ise; sıcaklıktaki artışın bir sonucu olarak, ısıtmanın ilk aylarında bir öz direnç düşüşü olduğunu sonraki aylarda ise öz direncin sabit kaldığını göstermektedir.

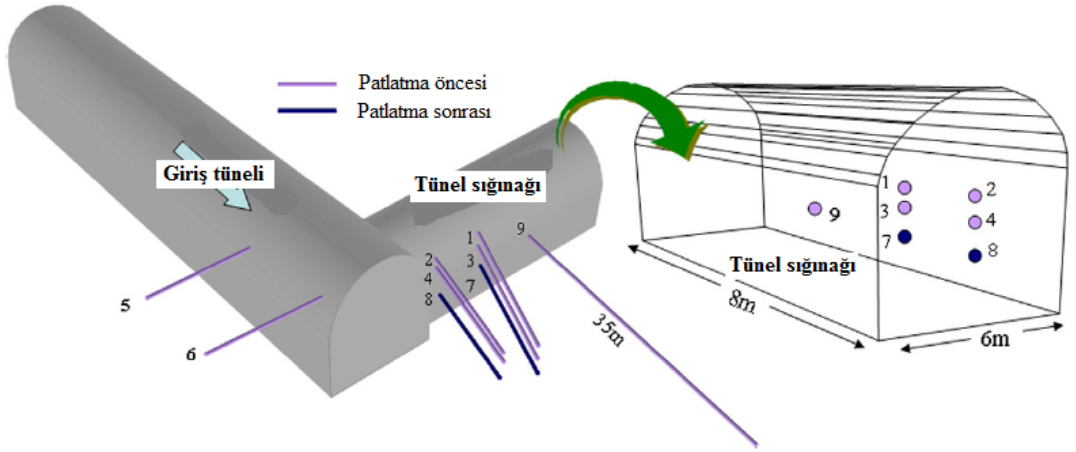
Kwon vd. (2006), yüksek seviyeli radyoaktif atıkların uygun jeolojik formasyonlarda güvenli bir şekilde depolanması amacıyla yönelik olarak yeraltında bir araştırma laboratuvarı oluşturulması çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında; depolama konseptinin fizibilite, güvenlik, uygunluk ve stabilitesini değerlendirmek amacıyla çevresel, sosyo-ekonomik durum, jeokimyasal, jeolojik (yüzey, sismik kırılma, elektrik öz direnç ve sondaj çalışmaları) ve kaya stabilite (kayaç özellikleri ve başlangıç ve sınır koşulların belirlenmesi suretiyle modelleme çalışmaları) araştırmaları yapılmış ve K56°B doğrultusunda, 10° eğimli, 6mx6m kesitinde, 230 m

uzunluğunda ve 120 m derinlikte bir yeraltı araştırma tüneli dizaynı oluşturulmuştur (Şekil 2.73).



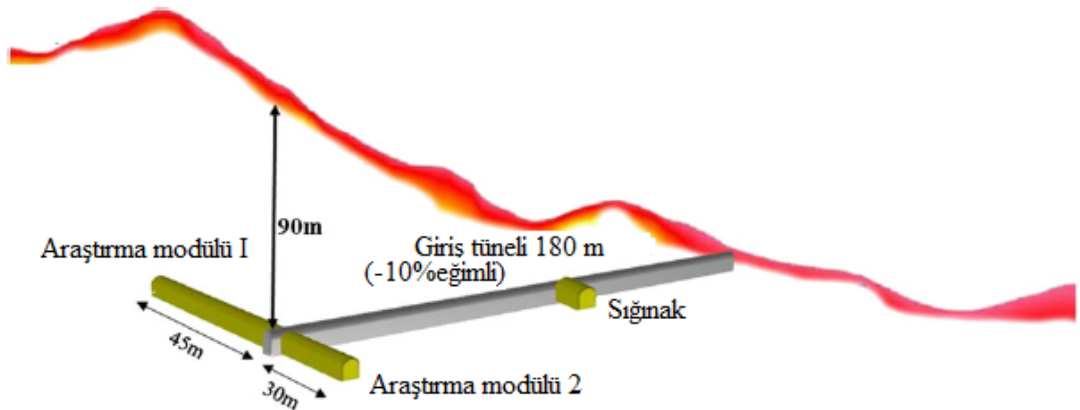
Şekil 2.73 Yeraltı araştırma tünelinin şematik görünümü (Kwon vd., 2006).

Kwon vd. (2008) ve Kwon vd. (2009); bir yeraltı kazısının ısıl, mekanik ve hidro-mekanik davranışları üzerinde kazı nedeniyle bozulmuş bölgenin etkisinin araştırılması kapsamında, tünel girişinden 60 m'lik bir mesafede 8 m uzunluğunda bir tünel sığınacağı inşa edilmiştir. Giriş tünelinin kazısından önce 7 adet ve giriş tünelinin inşasından sonra 2 adet olmak üzere toplam 9 adet delik delinmiş, yerinde ve deliklerden elde edilen karot örnekleri üzerinde laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda kaya kütle özellikleri belirlenmiştir (Şekil 2.74). Yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler ve hidro-mekanik ve termo-mekanik analizler sonucunda elde edilen verilerden; bir kazı hasar bölgesi varlığının, kazının yapıldığı yeraltı tüneline yakın bölgelerdeki termal, hidrolik ve mekanik davranışları etkileyebileceği ve yeraltı radyoaktif atık depolarının tasarımı sırasında önemli bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

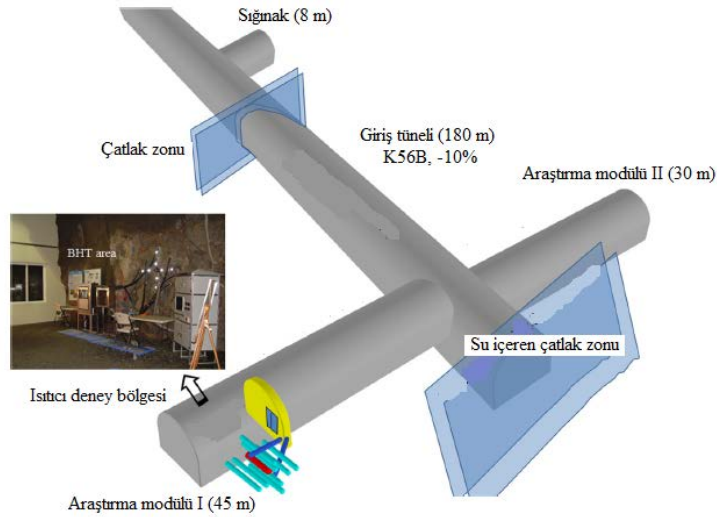


Şekil 2.74 Kazı hasar bölgesi etkilerinin incelenmesi çalışmaları (Kwon vd., 2008).

Kwon vd. (2011) ve Kwon vd. (2013), yüksek seviyeli radyoaktif atıkların güvenli yönetimi için KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute/Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü) tarafından önerilen ve yeryüzünün birkaç yüz metre altında kristalen kayalar içerisinde nükleer atıkların depolanması suretiyle kontrolünü içeren atık kontrol sisteminin güvenliğinin, stabilitesinin, teknik uygulanabilirliğinin ve güvenilirliğinin teyit edilmesi amacı doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yeraltı araştırma laboratuvarı 180 m uzunluğunda ve yüzeyden itibaren 90 m derinliğinde bir giriş tüneli ve 45m ve 30 m uzunluklarında iki araştırma modülünden oluşmaktadır (Şekil 2.75). Kuyu ısıtıcı deneyi araştırma modülü 1'de yeraltı suyu ile ilgili çalışmalar ise araştırma modülü 2'de gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.76).

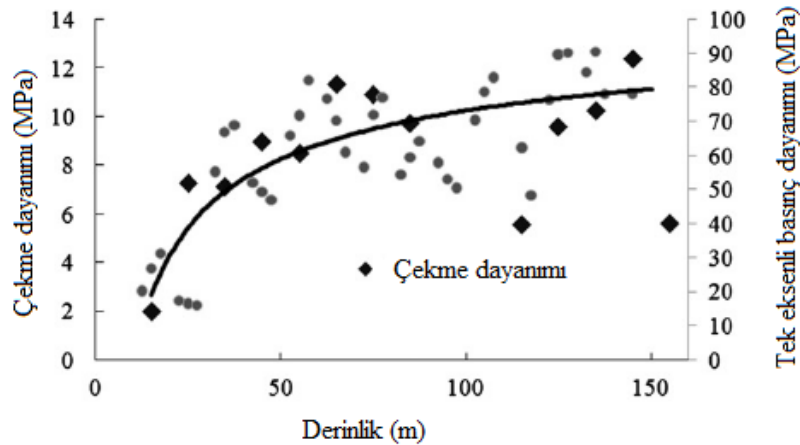


Şekil 2.75 Yeraltı araştırma tüneli tasarımı (Kwon vd., 2011).

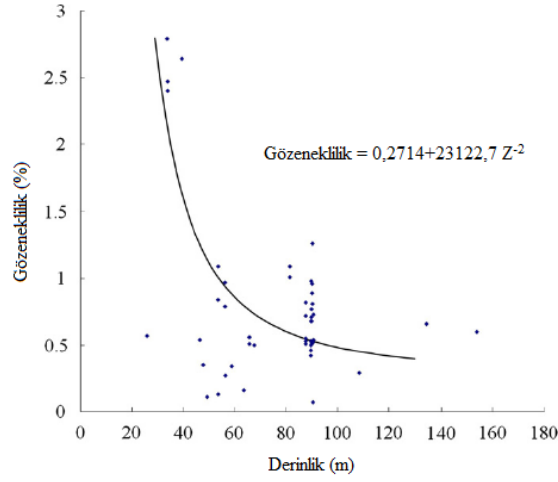


Şekil 2.76 BHT deney bölgesi (Kwon vd., 2013).

Bölgenin tanımlanması açısından, tünelin inşa ve işletim aşamaları süresince değişik kayaç özellikleri yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler aracılığıyla ölçülmüştür. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) 70 MPa, ortalama kayaç yoğunluğu 2640 kg/m³ ve ortalama Young Modülü 43 GPa'dır. Yeraltı araştırma tüneli sığ derinlikte açıldığından dolayı ölçülen dayanım değerleri granitin normal dayanım değerlerinden daha düşüktür. Şekil 2.77, çekme ve tek eksenli basınç dayanımlarının derinliğe bağlı olarak değişimini göstermektedir. Etkin gözeneklilik farklı noktalarda ölçülmüş ve gözenekliliğin derinliğe bağlı olarak değişimi Şekil 2.78'de verilmiştir. Ortalama etkin gözeneklilik %0,8'dir. Granitik kayaçların tek eksenli basınç dayanımı gözeneklilik artışına bağlı olarak azalmaktadır.

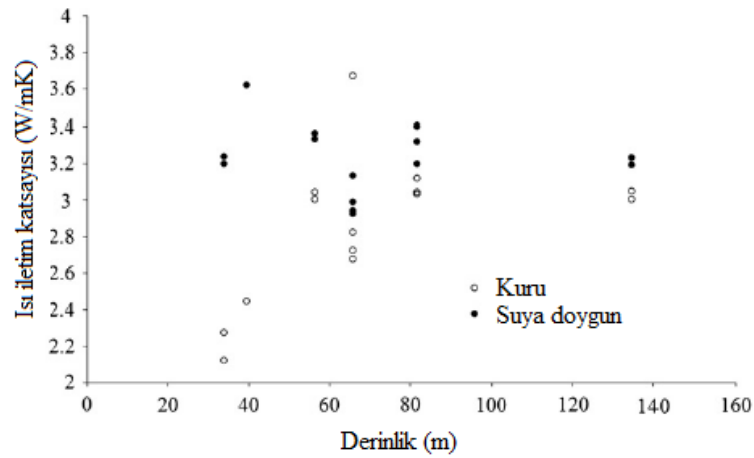


Şekil 2.77 Yeraltı araştırma tüneline derinliğe bağlı olarak çekme ve tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi (Kwon vd., 2011).



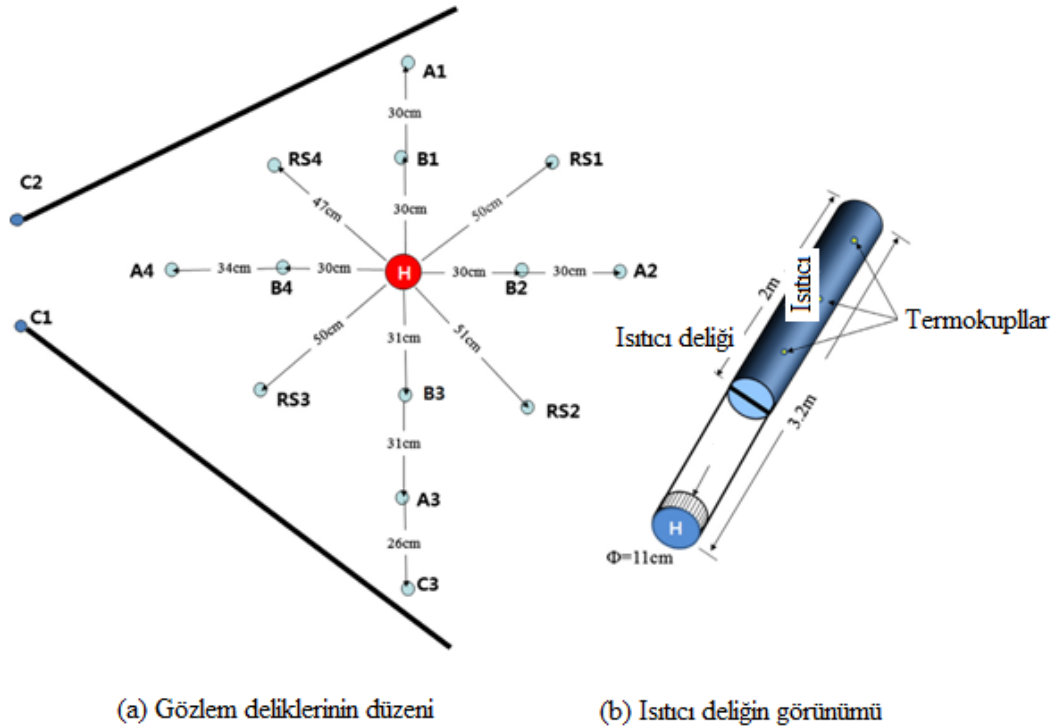
Şekil 2.78 Yeraltı araştırma tüneline derinliğe bağlı olarak gözenekliliğin değişimi (Kwon vd., 2011).

Isı iletim katsayısı ölçümleri sıcak tel yöntemi esaslı QTM-500 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Galson vd. (1987), QTM (sıcak tel) ve bölünmüş bar yöntemi ile elde edilen 15 numuneye ait 0,6-5,4 W/mK arasında değişen ısı iletim katsayılarını karşılaştırmışlar ve bölünmüş bar yöntemiyle elde edilen değerlerin QTM ile elde edilen değerlerden doymuş ve kuru koşullarda sırasıyla %4 ve %10 daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Kuru koşullarda ortalama ısı iletim katsayısı 2,89 W/mK olup doymuş durumdaki ortalama ısı iletim katsayısı 3,2 W/mK değerinin yaklaşık %90'ı kadardır. Şekil 2.79'de görüldüğü gibi kuru durumdaki ısı iletim katsayısı derinliğe göre üssel bir şekilde artmakta iken doymuş durumdaki derinlik etkisi verilerin sınırlı olması nedeniyle belirlenememiştir.



Şekil 2.79 Derinliğe bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi (Kwon vd., 2011).

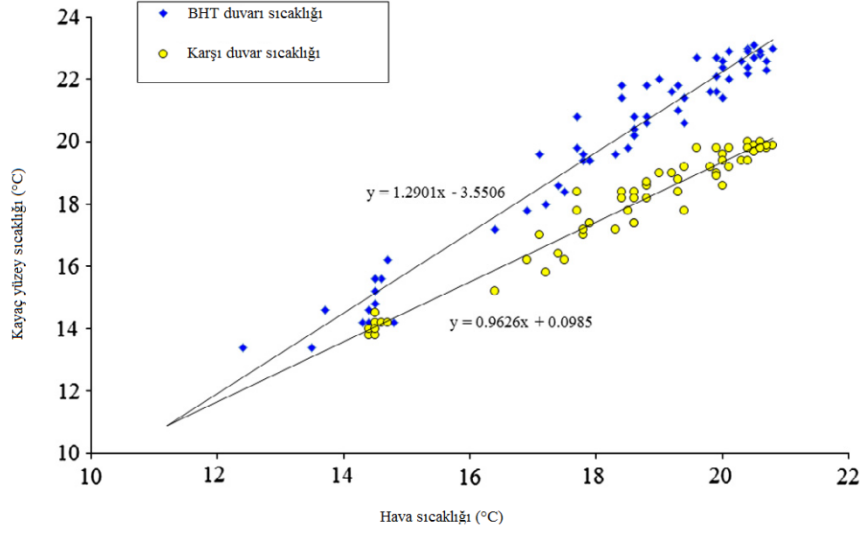
Kuyu ısıtıcı deneyinde; zeminin 1,5 m yukarısında, 110 mm çapında ve 3,2 m uzunluğunda açılan bir deliğe 11 cm çapında ve 2 m uzunluğunda bir ısıtıcı yerleştirilmiştir. Isıtıcı deliğin çevresine de Şekil 2.80’de gösterildiği gibi farklı mesafelerde 38 mm çapında 3,2 m ile 5,7 m arasında değişen derinliklerde 15 adet delik delinmiştir. Isıtıcıdan itibaren yaklaşık olarak 0,6 m mesafede konumlandırılan A tipi deliklere 0,5-1 m aralıklarla 9 adet ve 0,6 m mesafede konumlandırılan B tipi deliklere ise 0,3-1 m aralıklarla 12 adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Isıtıcıdan itibaren 0,88 m mesafede bulunan C3 numaralı delikte ise 8 adet termokupl bulunmaktadır.



Şekil 2.80 BHT delik düzeni (Kwon vd., 2013).

Aralık 2007-Eylül 2010 arasında devam eden ısıtma deneyi süresince ısıtıcı sıcaklığı tamponun ısıtma kriterleri ve ısıtıcı bölmesinde sıcaklığın 100°C'nin altında muhafaza edilmesi gerekliliği dikkate alınarak seçilen 90°C'lik hedef sıcaklığa kademeli bir şekilde arttırılmıştır. Aşırı ısıtma olayına kayacın vereceği tepkiyi ölçmek amacıyla ısıtıcı sıcaklığı 118°C'ye çıkarılarak deney devam ettirilmiş ve Ağustos 2011'de ısıtıcı devre dışı bırakılarak 4 ay süresince soğuma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince BHT alanı içindeki ve dışındaki hava ve tünel duvarı sıcaklıkları ile kayaç sıcaklıkları sürekli olarak kaydedilmiştir. Deney başlangıcında 96 adet

sıcaklık sensöründen okunan bakir kayaç sıcaklık değerlerinin ortalaması 14,7°C iken deney süresince kaydedilen en yüksek sıcaklık değerleri yaklaşık olarak A tipi deliklerde 37°C iken B tipi deliklerde 50°C civarındadır. BHT duvarı ve karşı taraftaki duvarda ölçülen hava ve kayaç yüzey sıcaklıkları arasındaki ilişki Şekil 2.81’de verilmiştir.



Şekil 2.81 BHT duvarı ve karşı taraftaki duvarda ölçülen hava ve kayaç yüzey sıcaklıkları arasındaki ilişki (Kwon vd., 2013).

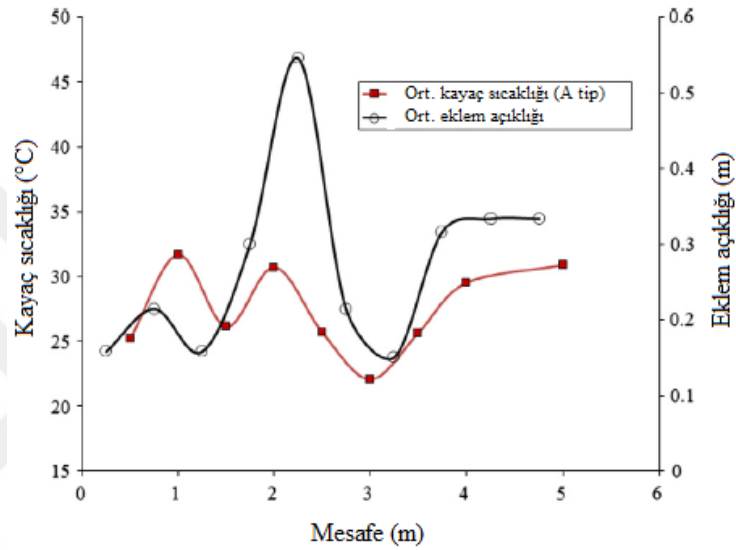
Şekil 2.82’de BHT alanındaki kayaçlarda mevcut olan eklemler görülmektedir. Tünel duvarından olan mesafe ve ortalama eklem açıklıklarının sıcaklıkla değişimini gösteren grafik (Şekil 2.83), sıcaklık dağılımı üzerinde eklemlerin etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Tünel duvarından 3-3,5 m mesafedeki düşük sıcaklık değerleri bu derinlikler civarında sıklıkla bulunan eklemler boyunca akan yeraltı suyunun etkisiyle açıklanabilir. Eklem açıklıkları konturu aynı zamanda sıcaklık dağılımını da etkileyebilen bozulmuş bir zonun gelişimini de göstermektedir.



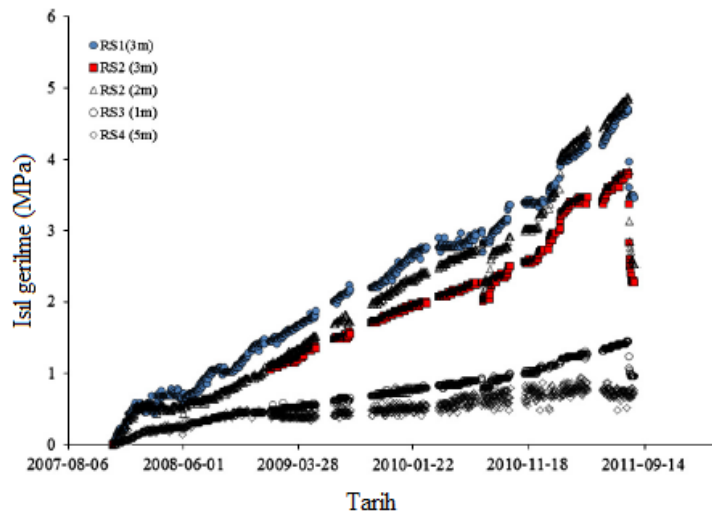
Şekil 2.82 BHT alanındaki kayaçlarda görülen eklemler (Kwon vd., 2013).

Tünel etrafındaki nisbeten düşük sıcaklıklar; tünel duvarı boyunca ısı taşınımının, ısıtıcıdan itibaren olan mesafenin ve kazı bozunma bölgesinin olası etkileri aracılığıyla açıklanabilir.

Sıcaklık değişiminin neden olduğu ısıl gerilme değişimi hemen hemen doğrusal olarak artmış, nisbeten daha büyük bir artış 1 m ve 5 m hariç 2 m ve 3 m'lik bir derinlikte gözlenmiştir. Isıl gerilmedeki maksimum artış 5 MPa olmuştur (Şekil 2.84).



Şekil 2.83 Eklem açıklığı ve A tipi gözlem deliklerindeki ortalama kayaç sıcaklığının mesafeye bağlı olarak değişimi (Kwon vd., 2013).



Şekil 2.84 Zamana bağlı olarak ısıl gerilme değişimi (Kwon vd., 2013).

3. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

3.1 Arazi Çalışmaları ve Sonuçları

Kayaçların ısı iletkenliklerinin yerinde ölçülmesi amacına yönelik olarak öncelikle ölçümlerin yapılabilmesine olanak sağlayacak bir yeraltı maden işletmesinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda ülkemizde meydana gelen maden kazaları ve buna bağlı olarak daha fazla önem kazanan iş sağlığı ve güvenliği kriterleri de dikkate alınarak çalışmaların kömür işletmelerinden ziyade yeraltı metal maden işletmelerinde yapılması planlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan görüşmeler sonucunda; arazi çalışmalarının Yıldızlar Holding bünyesinde bulunan Rasih ve İhsan yeraltı kurşun-çinko (Pb-Zn) işletmesinde yapılmasına karar verilmiştir.

3.1.1 Çalışma alanının konumu

Çalışma alanı Yozgat İli Akdağmadeni İlçesi'nin kuzeydoğusunda ilçe merkezine 13 km uzaklıkta bulunan Rasih ve İhsan yeraltı kurşun-çinko işletmesidir. İşletmenin yer bulduru haritası Şekil 3.1'de verilmiştir. İşletmede kurşun-çinko üretimi dolgulu oda topuk üretim yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmekte, üretilen cevherler işletmeye ait olan ve Sivas-Ankara karayolu üzerinde bulunan cevher zenginleştirme tesislerinde zenginleştirilerek endüstrinin kullanımına hazır hale getirilmektedir. Elde edilen konsantre cevher Trabzon Limanı aracılığıyla yurt dışına pazarlanmaktadır.

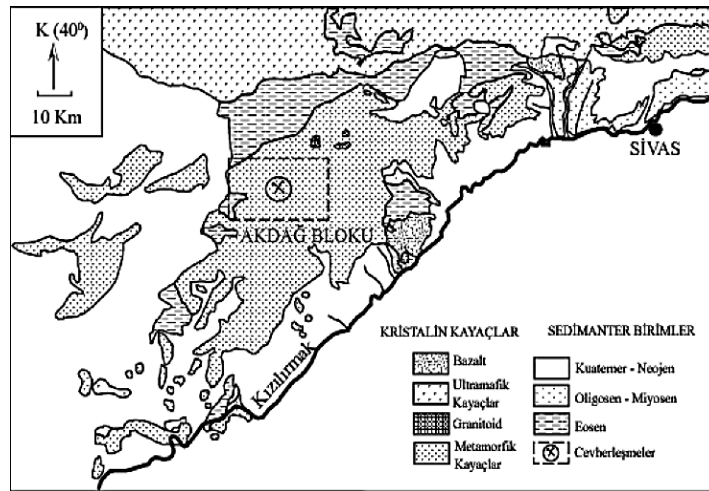


Şekil 3.1 Akdağmadeni yer bulduru haritası

3.1.2 Çalışma alanının jeolojisi

Yeraltı maden işletmesinin de içinde bulunduğu çalışma alanında yer alan litolojik birimler metamorfik ve magmatik kayalardan oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda; bu tür kayalarda yer alan cevherleşmelerin bölgede yer alan granitlerle ilişkili olarak, skarn tipinde oldukları belirtilmiştir. Çolakoğlu vd. (2001) 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 belirlenmiş ve 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 kayalar, tabanda metapelitik kayaların saf türevleriyle temsil edilmekte ve üstlerinde metakarbonat ve amfibolit ara katkılı kalsilikatik gnayslar yer almaktadır. Bu kayalar 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 kayalar ise fels olarak adlandırılmıştır (Çolakoğlu vd., 2001).

Çalışma alanının da içinde bulunduğu bölgeyi içeren Akdağmadeni genel jeoloji haritası Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Akdağmadeni genel jeoloji haritası (Whitney vd., 2001).

3.1.3 Yerinde ısı iletkenlik ölçüm prosedürü

Kayaçların ısı iletim katsayılarının yerinde ölçümü amacıyla Bölüm 2.3’de açıklanan ve farklı yerlerde başarılı uygulamaları olan “Kuyu Isıtıcı Deneyi (Borehole Heater Test)” yöntemi kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra bu yöntem “BHT” simgesi ile gösterilecektir.

Yerinde ısı iletim katsayısının tespitine yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- i. Uygulanacak olan BHT yönteminin çalışma alanında oluşturulması amacıyla; 4,5 kW’lık kuru ortamda çalışabilen bir rezistans, 10 adet K tipi prob, 10 kanal aracılığıyla ölçüm ve kayıt yapabilen bir veri kayıt cihazı (data logger) ve çalışmanın gerçekleştirildiği ortamdaki hava sıcaklığı ve rutubet değişimlerinin sürekli olarak kaydedilebilmesi amacıyla el tipi bir sıcaklık-nem ölçer cihazı temin edilmiştir.
- ii. Yerinde ölçümlerin yapılacağı yerler; yeraltı maden işletmesi faaliyetlerine engel olunmaması, ölçümlerin sorunsuz ve sağlıklı bir şekilde yürütülmesinin sağlanması vb. hususlar göz önünde bulundurularak ve işletme sorumluları ile gerçekleştirilen diyaloglar aracılığıyla belirlenmiştir.
- iii. Yerinde ölçümlerle laboratuvar ölçümleri arasındaki farklılıkların kayaçların içinde bulunduğu doğal ortamlardaki gerilmeler ve ortamın sahip olduğu iklimsel koşullardan (sıcaklık, rutubet vb.) kaynaklanabileceği hususları göz önüne alınarak, ölçüm noktalarının farklı derinliklerde olmasına özen gösterilmiştir.
- iv. Ölçüm yapılacak bölgelerde deneylerin uygulanması sırasında gerekli olacak elektrik, su, basınçlı hava vb. donanımların kullanılabilir ve uygulanabilir durumda olmasına dikkat edilmiştir.
- v. Yerinde ölçümlerin gerçekleştirileceği aynaların yüzeyinin mümkün olduğunca düzgün olmasına gayret edilmiştir.
- vi. Yukarıda vurgulanan hususlar dikkate alınarak yeraltı işletmesinde; yüzeyden itibaren 157 m derinlikte ve 1615 kotundaki K2 Panosunda 2 (K2B/K2E), 185 m derinlikte (1590 Ana Yol) ve 215 m derinlikte (1560 Ana Yol) birer ölçüm noktası olmak üzere 3 farklı derinlikte ve farklı kayaç türlerinde 4 ölçüm noktası belirlenmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Çalışma bölgelerinin özellikleri.

Ölçüm Bölgelerinin				
Adı		Kotu	Yüzeiden itibaren derinliği (m)	Aralarındaki düşey mesafe (m)
K2B	(K2	1615	157	0
K2E	PANOSU)	1615	157	27
1590		1590	185	30
1560	ANA YOL	1560	215	

- vii. Ölçüm noktalarında öncelikli olarak; 4,5 kW'lık ısıtıcı için 6 cm çapında ve 50 cm derinliğinde, ısıtıcının etrafına yerleştirilecek olan 10 adet prob için ise ısıtıcıdan itibaren 30 cm, 40 cm ve 60 cm mesafelerde ve 50 cm derinliğinde delikler delinmiştir.
- viii. Isıtıcı ve prob lar delikler içerisine yerleştirildikten sonra delik içerisinde kalan boşluklar, doğal iletim ortamının bozulmaması amacıyla, deliklerden çıkan malzeme ile doldurularak kapatılmıştır. Delikler kapatılmadan önce prob lar ile data logger bağlantıları termokupllar aracılığıyla sağlanmıştır.
- ix. Ölçüm noktalarında deneysel çalışmalara başlamadan önce kayaçların başlangıç sıcaklık, nem vb. değerleri kaydedilmiştir.
- x. Sistem çalıştırılarak kayaç ısıtılmaya başlanmış ve belirli aralıklarla ilgili ölçümler kayıt altına alınmıştır.
- xi. Ölçümler devam ederken eş zamanlı olarak çalışma ortamının nem ve sıcaklık değerleri el tipi sıcaklık-nem ölçer cihaz ile kaydedilerek ortamın nem ve sıcaklık değişiminin ölçülmesi ve bu değişimin kayaçların ısı iletim katsayısı üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır.
- xii. Sağlıklı ve düzenli bir veri akışının sağlanabilmesi için deney süresince hem ortam hem deneysel koşullar sürekli olarak kontrol altında tutulmuştur.
- xiii. Ayrıca; yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği bütün bölgelerden, kayaçların mineralojik ve kimyasal analizlerinin, yoğunluk ve gözenekliliklerinin, su emme ve kılcal su emme katsayılarının, P-dalga hızlarının ve ısı iletim katsayılarının laboratuvar ortamında belirlenmesi amacıyla, örnekler alınmıştır.

xiv. Yerinde ölçüm sonuçlarının değerlendirilerek kayaçların ısı iletim katsayılarının belirlenmesi için; uygulanmasının ve sonuçlarının güvenilirliği, kısa süreli ölçümler ve ısıtıcıya yakın mesafelerdeki proablardan alınan verilerin değerlendirilmesine uygunluğu açısından “Hat Isı Kaynağı Yöntemi (Line Heat Source)” seçilmiştir. Bu çalışmada “LHS” simgesi ile gösterilecektir. Yöntem aşağıda verildiği gibi formülüle edilmiştir (Carslaw ve Jeager, 1959).

Isı kaynağından bir “r” mesafesindeki sıcaklık artışı (ΔT) aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi k t} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad [3.1]$$

Q : Isı miktarı (J/m)
k : Isı iletim katsayısı (W/m°C)
D : Isı yayılım katsayısı (m²/sn)
t : Zaman (sn)

Eğer sabit bir ısı miktarı; akımın şiddetindeki ani bir değişimden ziyade bir zaman periyodu boyunca kütesiz bir ısıtıcıya uygulanır ise, sıcaklık değişimi aşağıda verildiği gibi olacaktır.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad [3.2]$$

q : Isı kaybı (W/m)
k : Isı iletim katsayısı (W/m°C)
D : Isı yayılım katsayısı (m²/sn)
t : Zaman (sn)
Ei : Üstel integral

$$-Ei(-a) = \int_a^\infty \left(\frac{1}{u}\right) \exp(-u) du \quad [3.3]$$

$$-Ei = \gamma - \ln a + a - \frac{a^2}{4} + \dots \quad [3.4]$$

γ : Euler sabiti ($\gamma = 0,5772$)

$$\gamma = \frac{r^2}{4Dt} \quad [3.5]$$

Zamanın uzun olması durumunda Ei açılım serisinde lna dışındaki terimler ihmal edilebilir.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) \right] = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln t - \ln\left(\frac{r^2}{4DC_E}\right) \right] \quad [3.6]$$

$$C_E = \exp \gamma \quad [3.7]$$

Sonuç olarak, $\Delta T - \ln t$ grafiği $q/4\pi k$ denkleminin verdiği eğime eşit eğimde doğrusal bir hat olmalıdır. Doğrusal hattın x eksenini kestiği noktadaki değer t_0 değeri olup bu değer ısı yayılım katsayısını bulmak için kullanılabilir.

$$D = \frac{r^2}{4C_E t_0} \quad [3.8]$$

Isı akışı durdurulduktan sonra sıcaklık farkı aşağıdaki eşitlik aracılığıyla elde edilmektedir.

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} \left[-Ei\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) + Ei\left(\frac{-r^2}{4D(t-t_1)}\right) \right] \quad t > t_1 \quad [3.9]$$

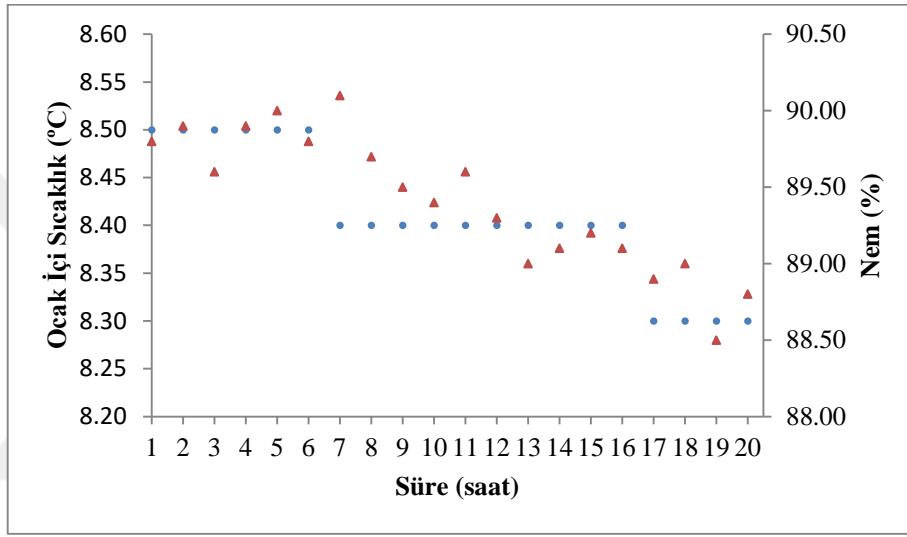
3.1.4 Yerde ölçüm sonuçları

3.1.4.1 Sıcaklık-nem ölçümleri ve sonuçları

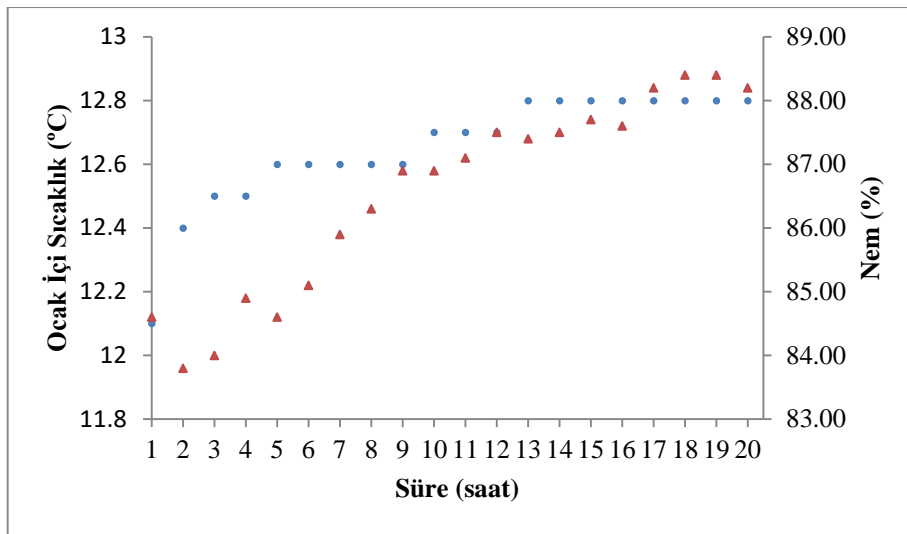
Ortam havasının sıcaklık ve nem değerlerinin ölçümü için el tipi sıcaklık-nem ölçer cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.3). Cihaz; 5 dakika aralıklarla ölçüm alacak şekilde ayarlanmış ve ölçüm bölgelerinde yaklaşık 20 saat süre boyunca sıcaklık ve nem değerleri kaydedilmiştir. Ocak içi sıcaklık ve nem değişimleri Şekil 3.4-3.7'de görülmektedir. Ocak içi hava sıcaklığı, K2 Panosunun B bölgesinde 8°C, aynı panonun E bölgesinde 12°C, 1590 kotundaki ana yolda 9-10°C ve 1560 kotundaki anayolda ise 12°C civarlarındadır. K2E bölgesi dışındaki diğer bölgeler göz önüne alındığında sıcaklığın beklendiği üzere derinliğe bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Ocak içi nem değerleri ise %84 ile %90 aralığında değişmektedir.



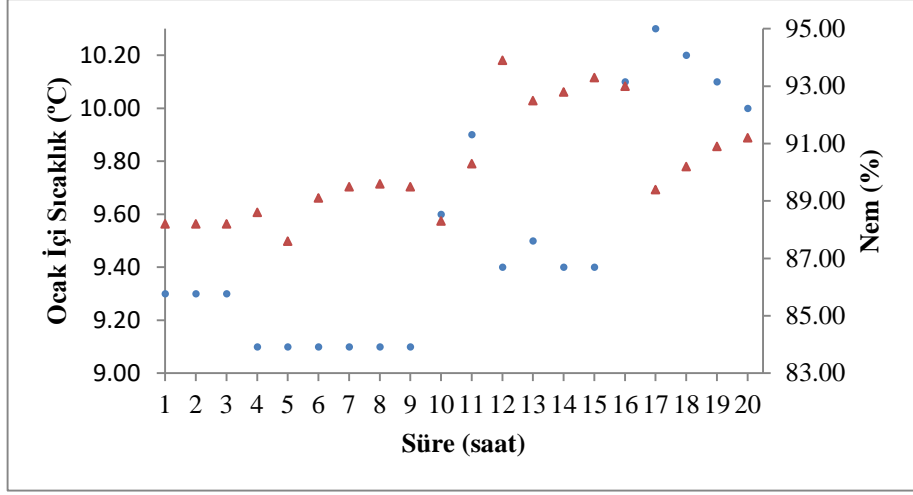
Şekil 3.3 El tipi sıcaklık-nem ölçer cihazı.



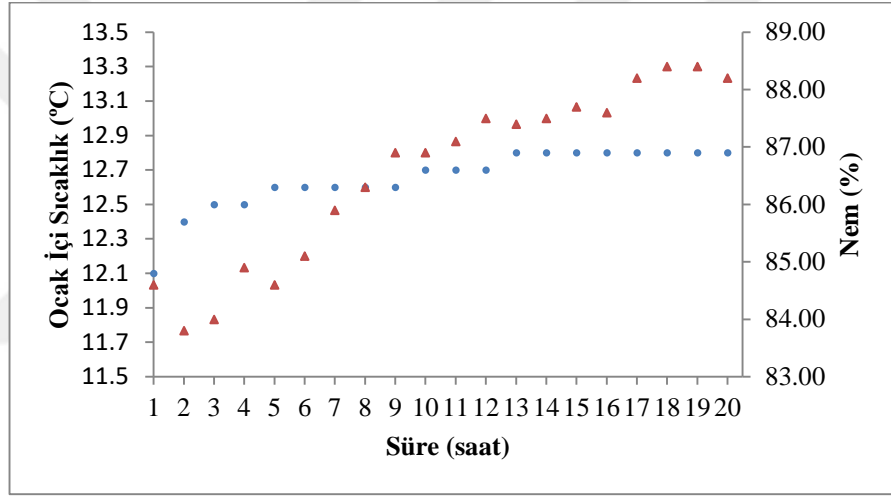
Şekil 3.4 K2B sıcaklık-nem ölçümleri.



Şekil 3.5 K2E sıcaklık-nem ölçümleri.



Şekil 3.6 1590 Ana Yol sıcaklık-nem ölçümleri.



Şekil 3.7 1560 Ana Yol sıcaklık-nem ölçümleri.

3.1.4.2 Yerinde ısı iletim katsayısı ölçümleri ve sonuçları

Yerinde ısı iletim katsayısının belirlenebilmesi için; elektrik, su ve basınçlı hava donanımlarının yeterliliği, çalışma bölgesi yüzeyinin uygunluğu ve düzgünlüğü vb. hususlar dikkate alınarak seçilen bölgelerde Kuyu Isıtıcı Deneyi (BHT) yöntemi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. BHT yöntemi, gücü belli olan ısıtıcı etrafına belirli mesafelerde probların yerleştirilmesi ve çalışma süresine bağlı olarak elde edilen sıcaklık verilerinin data logger aracılığıyla kaydedilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 3.8'de BHT yönteminin 1560 Ana Yol'da uygulaması görülmektedir.



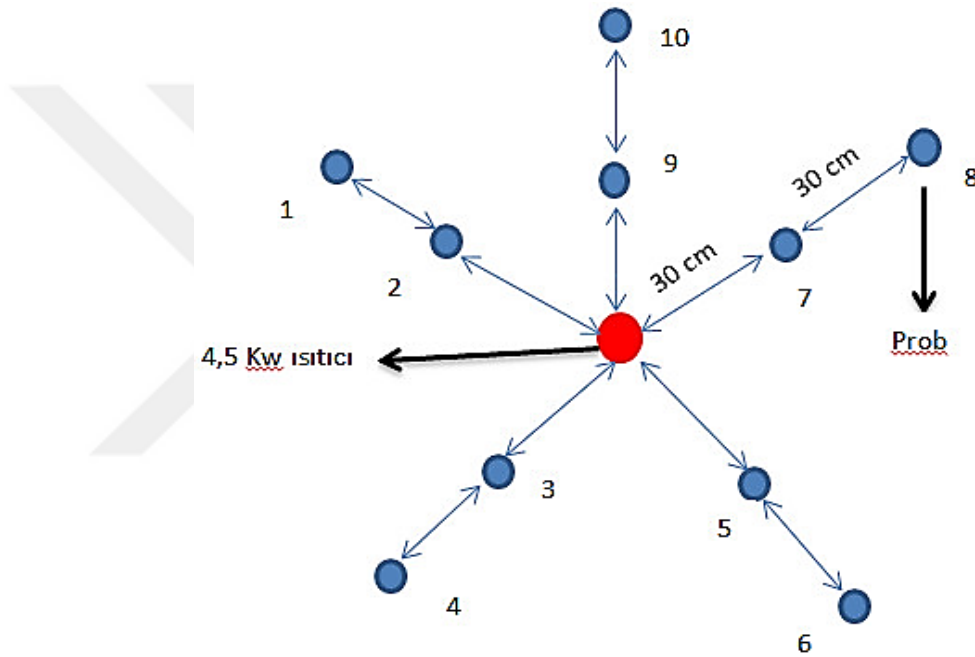
Şekil 3.8 BHT yönteminin 1560 Ana Yol'da uygulaması.

Isıtıcı merkezde konumlandırılmış ve 6 cm çapında ve 50 cm derinliğinde açılmış olan deliğe yerleştirilmiştir. İlk sıra problar (5 adet) ısıtııcıdan itibaren 30 cm'lik, ikinci sıra problar (5 adet) ise 40 cm'lik (ilk sıra problelerden 10 cm sonra) mesafelerde ve farklı doğrultularda olmak üzere toplam 10 adet prob 50 cm derinliğindeki deliklere yerleştirilmiştir. Problelerin ısıtııcının etrafına konumlandırılması işlemi kayaç yüzeyinin izin verdiği ölçüde simetrik olarak gerçekleştirilmiştir.

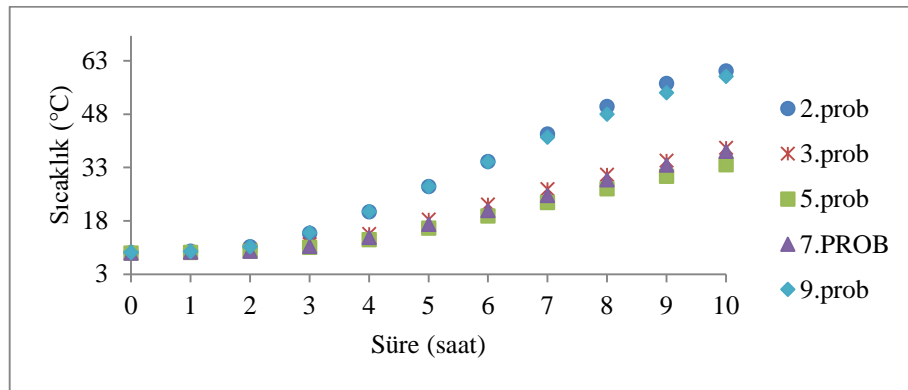
Yerinde ısı iletim katsayısı ölçümleri yüzeyden itibaren 157 m ile 215 m arasında değişen derinliklerde gerçekleştirildiği için, ölçümlerin mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenme durumu söz konusu değildir. Ayrıca, problelerin delikler içerisine yerleştirilmelerinden sonra kalan boşlukların delikten çıkan malzeme ile doldurulmasının prob ile kayaç arasındaki ısı teması etkilemediği düşünülmektedir. Bu hususlar ve olası olumsuz durumların etkisi dikkate alınarak ölçüm bölgelerindeki ölçüm sürelerinin 10 saatten az olmaması hedeflenmiş ve uygulamada K2B, K2E, 1590 Ana Yol ve 1560 Ana Yol'larındaki ölçüm süreleri zikredildikleri sıra ile 11, 14, 14 ve 15 saat olarak gerçekleşmiştir. Deney süresince, her bir ölçüm noktasındaki 10 adet prob verileri data logger cihazı aracılığıyla sürekli olarak

kaydedilmiştir. Problardaki sıcaklık okumaları LHS yönteminin gerektirdiği doğrultuda ΔT -İnt grafiklerine işlenmiştir.

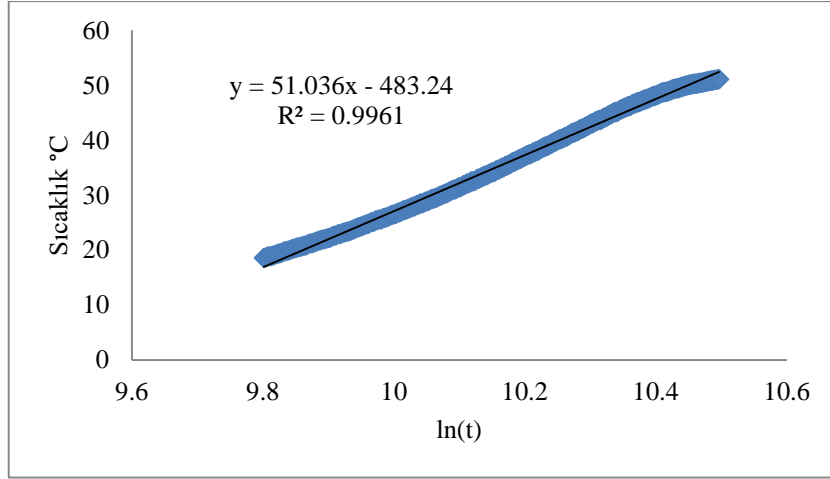
Yöntemin ölçüm bölgelerinde uygulanmasına yönelik ölçüm düzeneklerine, her bölgede süreye bağlı olarak ısınma durumuna ve üç ölçüm bölgesinde 10 ve bir ölçüm bölgesinde (K2B) 5 olmak üzere toplamda 4 ölçüm bölgesindeki 35 farklı prob okumalarının doğrusal kısımlarına ait grafikler bölgeler bazında ve K2B-K2E-1590 Ana Yol-1560 Ana Yol sıralaması şeklinde Şekil 3.9-3.54 arasında verilmiştir.



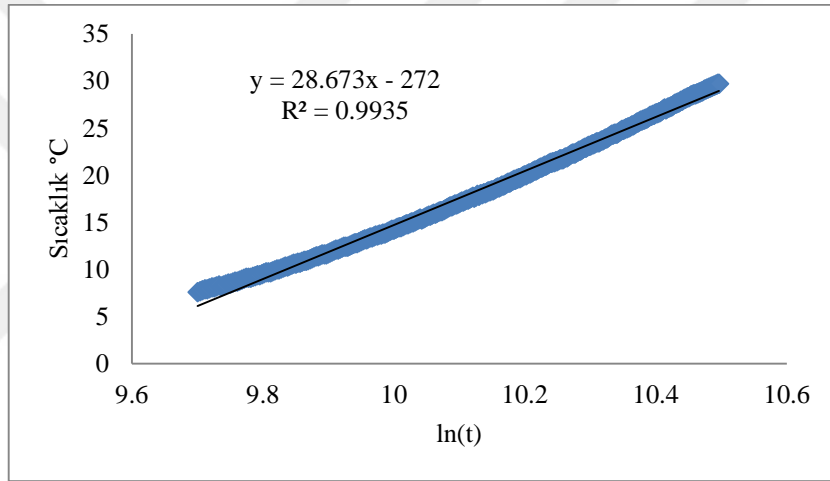
Şekil 3.9 K2B BHT ölçüm düzeni.



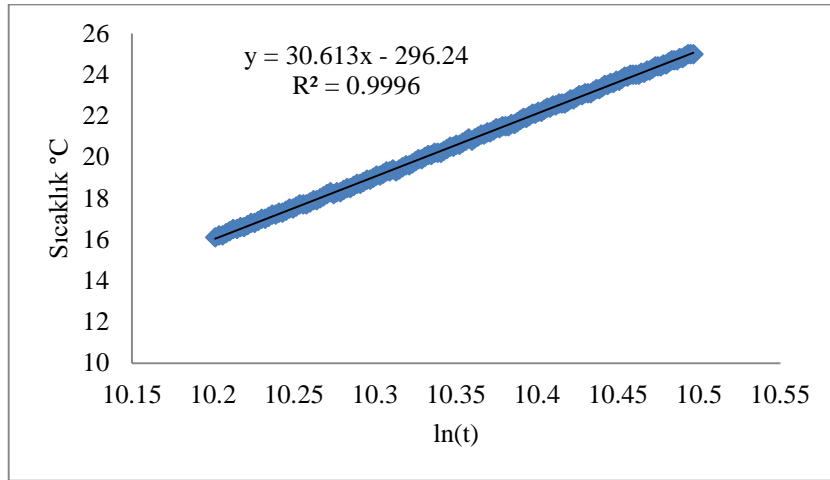
Şekil 3.10 K2B ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problelerin ısınma eğrisi.



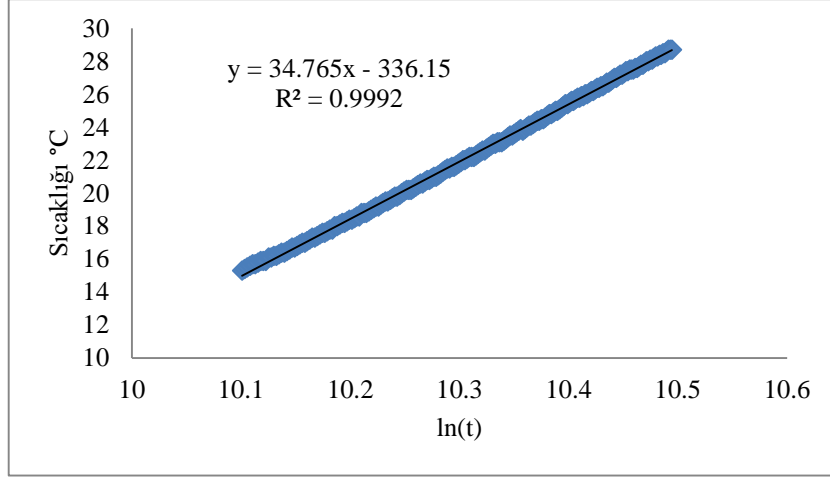
Şekil 3.11 K2B - 2 numaralı prob okumaları.



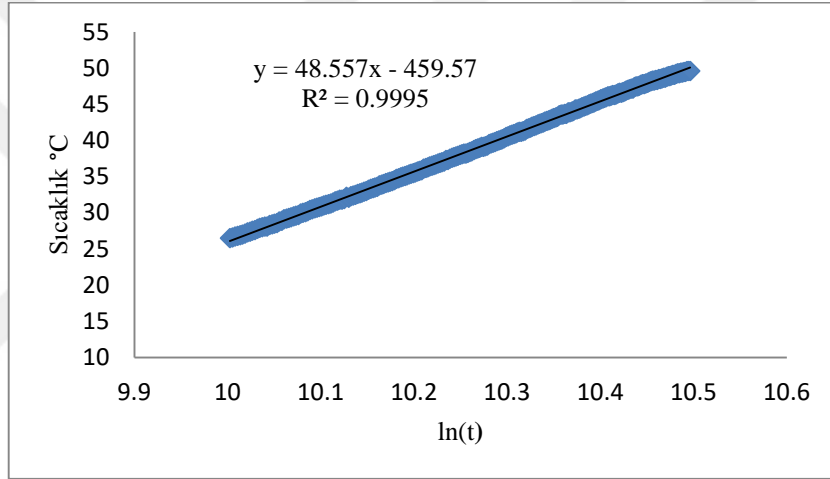
Şekil 3.12 K2B - 3 numaralı prob okumaları.



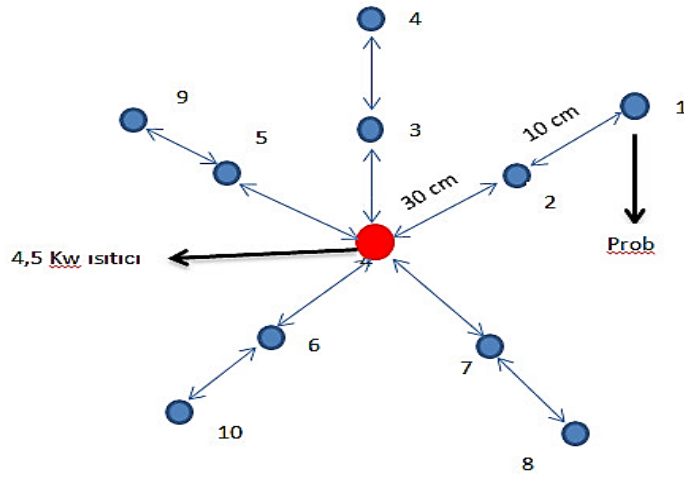
Şekil 3.13 K2B - 5 numaralı prob okumaları.



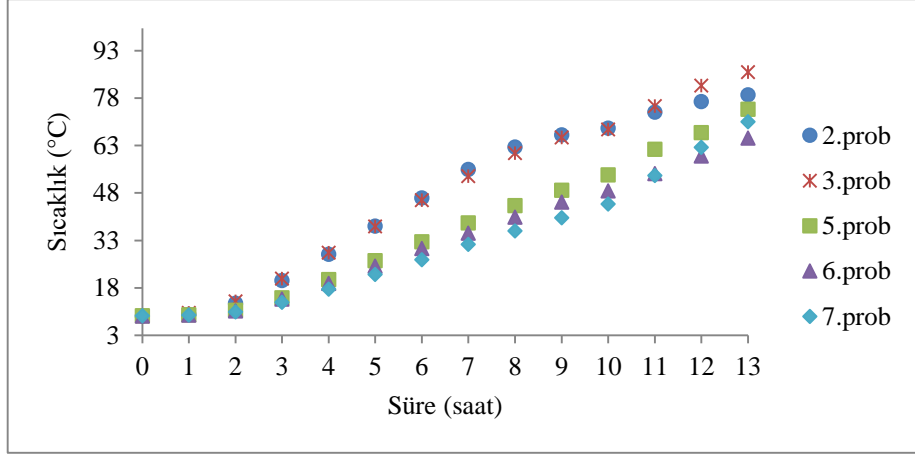
Şekil 3.14 K2B - 7 numaralı prob okumaları.



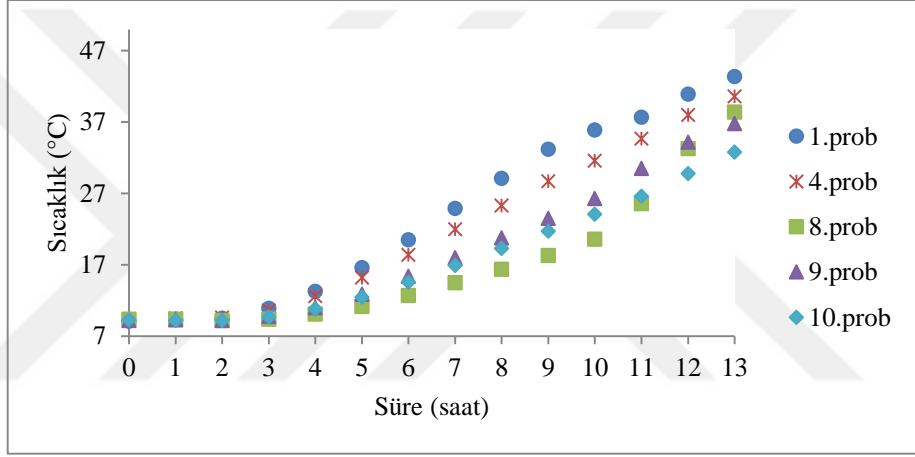
Şekil 3.15 K2B - 9 numaralı prob okumaları.



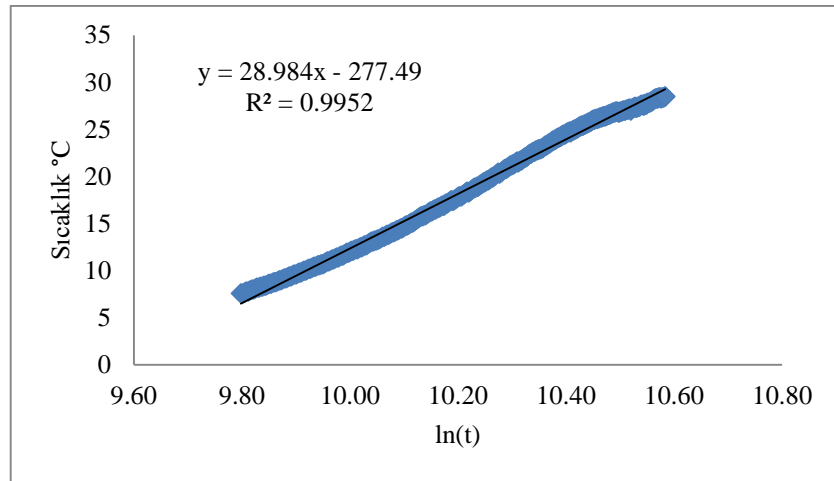
Şekil 3.16 K2E BHT ölçüm düzeneği.



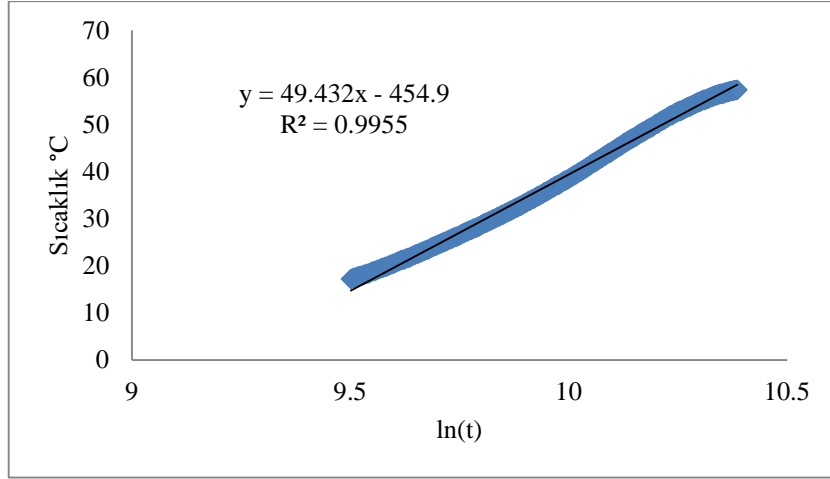
Şekil 3.17 K2E ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi.



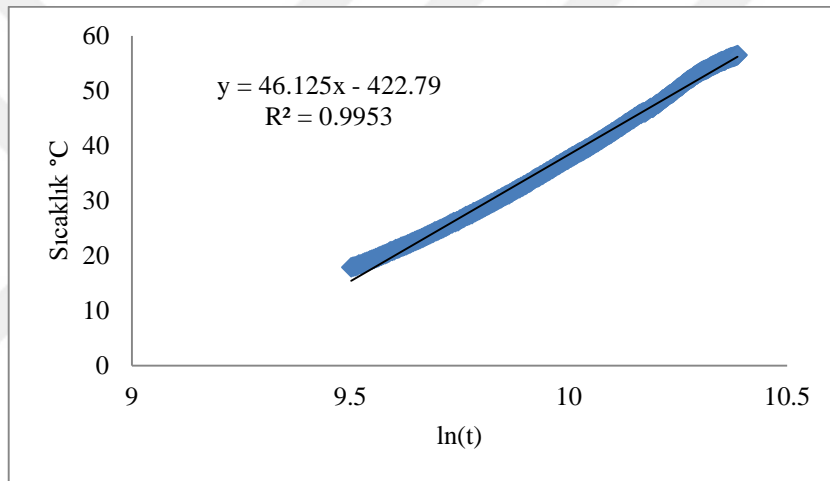
Şekil 3.18 K2E ısıtıcıya 40 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi.



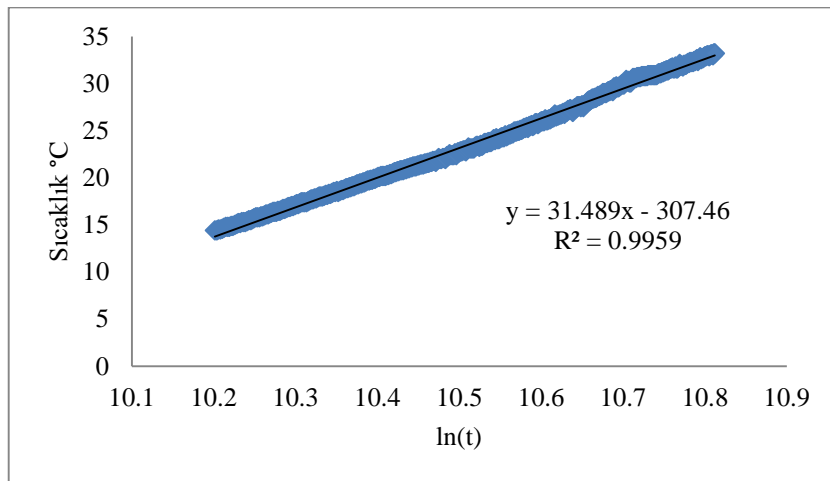
Şekil 3.19 K2E - 1 numaralı prob okumaları.



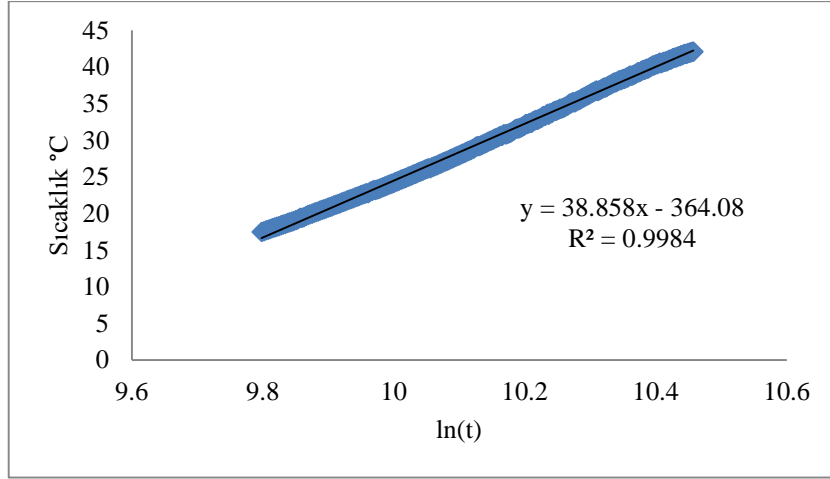
Şekil 3.20 K2E - 2 numaralı prob okumaları.



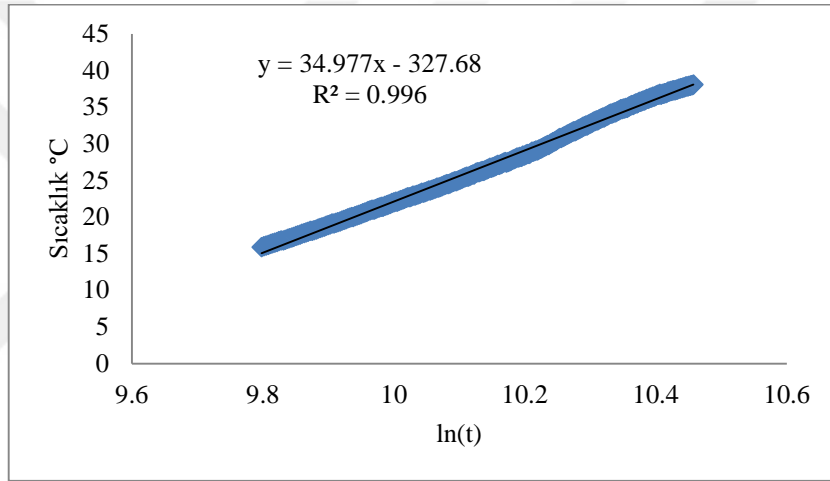
Şekil 3.21 K2E - 3 numaralı prob okumaları.



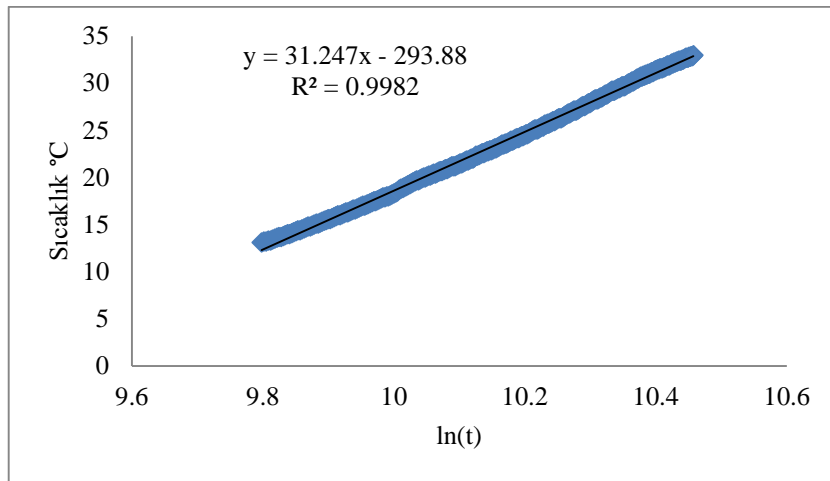
Şekil 3.22 K2E - 4 numaralı prob okumaları.



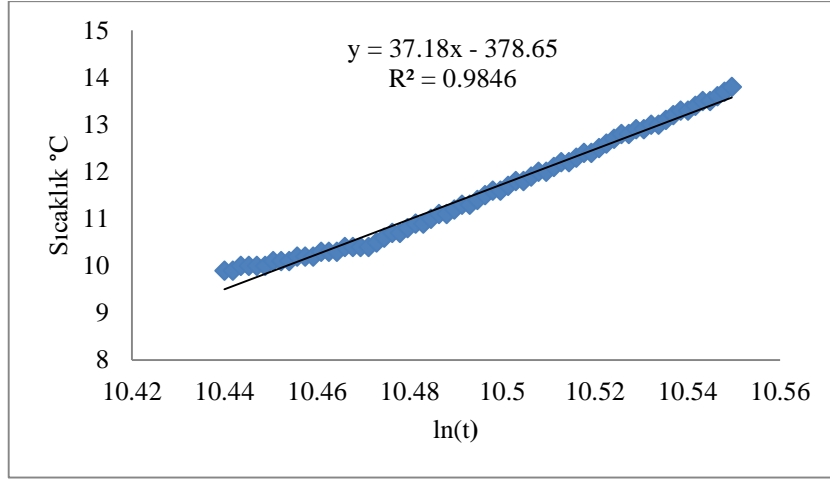
Şekil 3.23 K2E - 5 numaralı prob okumaları.



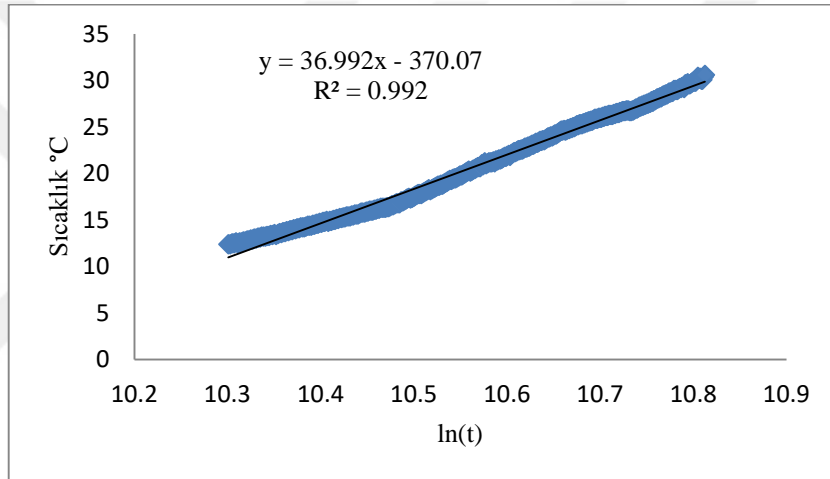
Şekil 3.24 K2E - 6 numaralı prob okumaları.



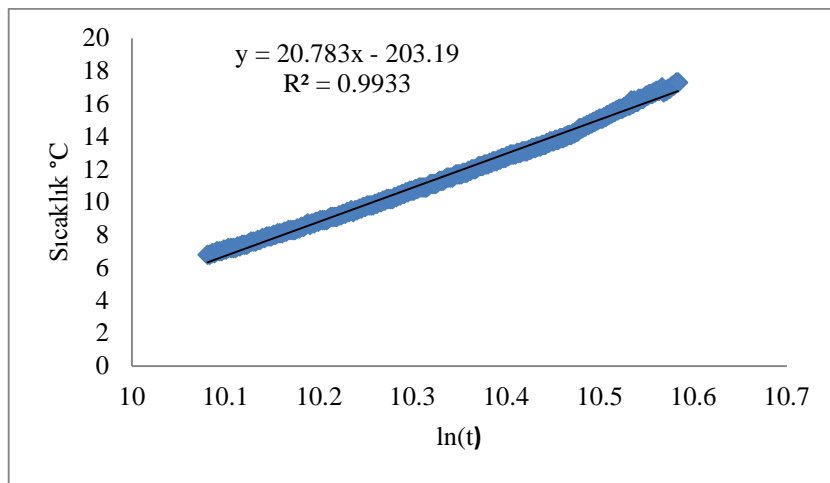
Şekil 3.25 K2E - 7 numaralı prob okumaları.



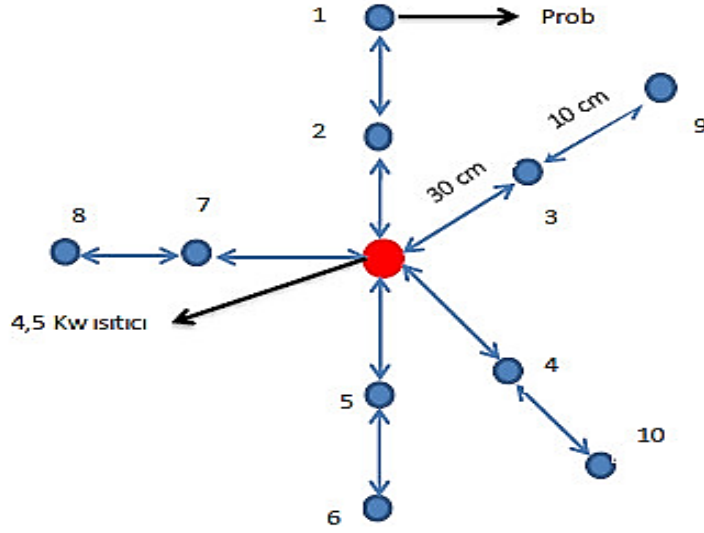
Şekil 3.26 K2E - 8 numaralı prob okumaları.



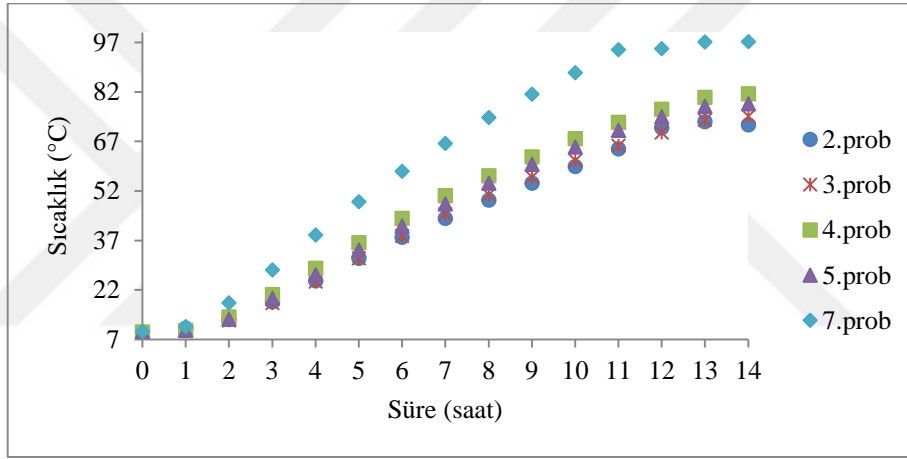
Şekil 3.27 K2E - 9 numaralı prob okumaları.



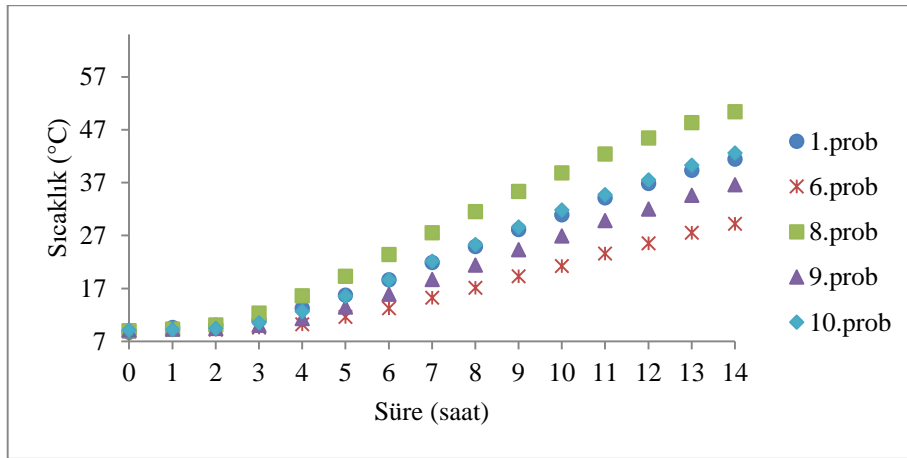
Şekil 3.28 K2E - 10 numaralı prob okumaları.



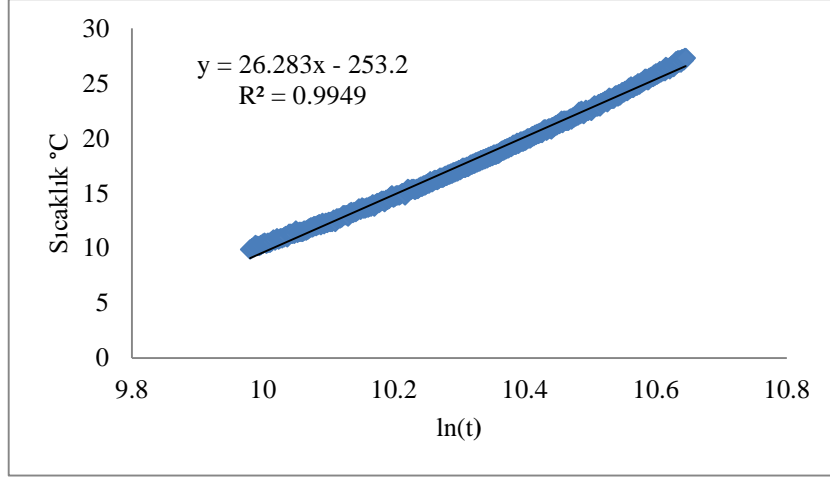
Şekil 3.29 1590 Ana Yol'da BHT ölçüm düzeneği.



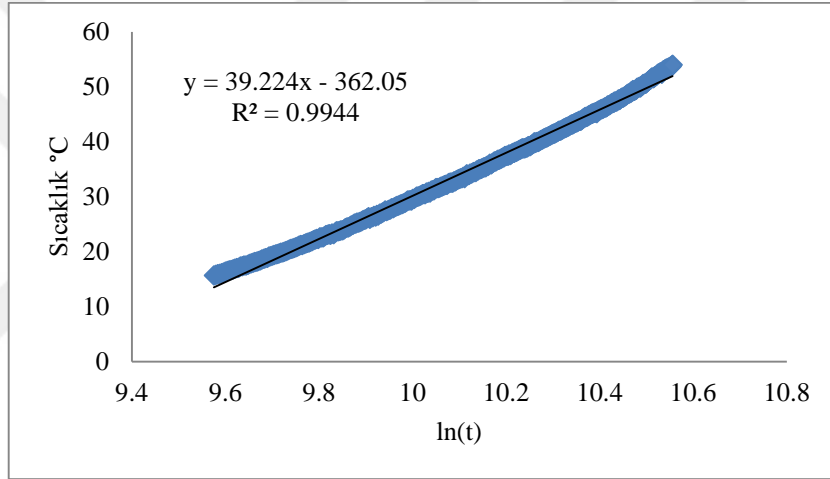
Şekil 3.30 1590 ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi.



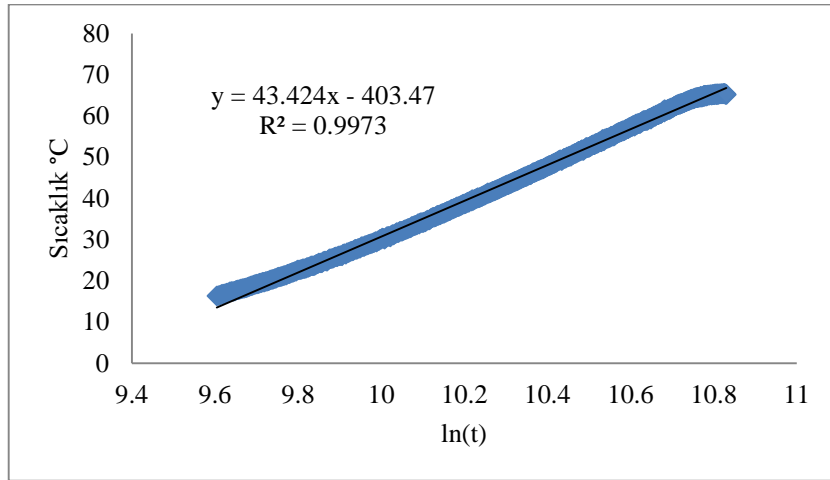
Şekil 3.31 1590 ısıtıcıya 40 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi.



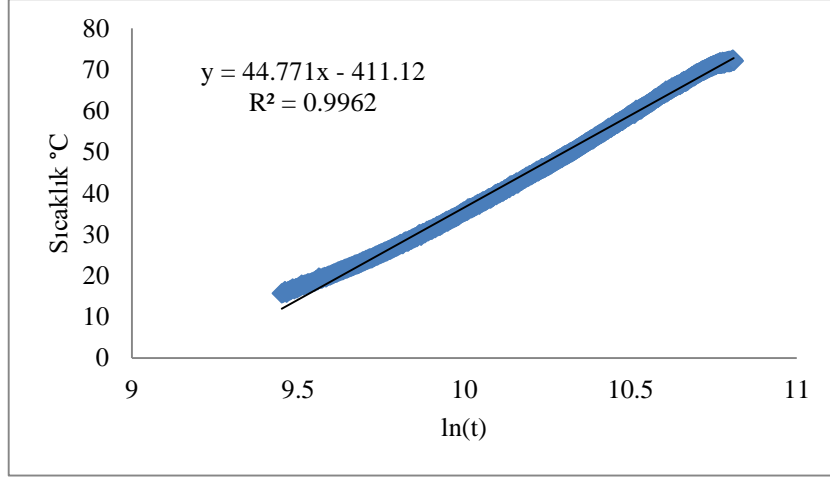
Şekil 3.32 1590 Ana Yol - 1 numaralı prob okumaları.



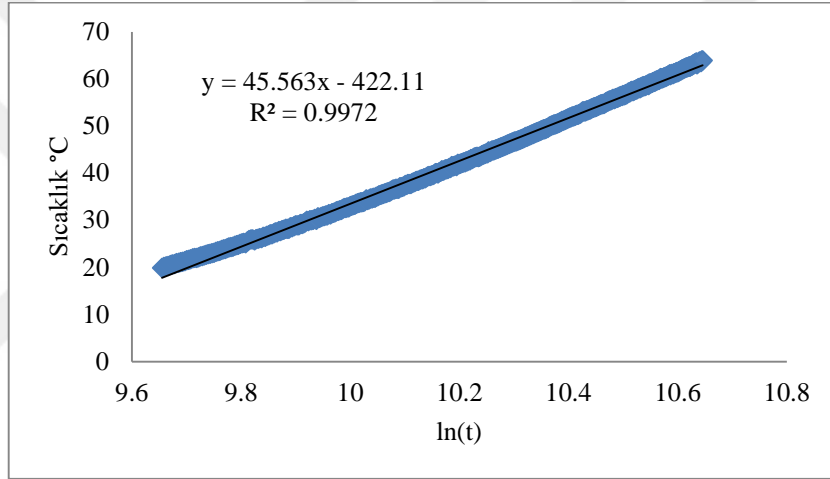
Şekil 3.33 1590 Ana Yol - 2 numaralı prob okumaları.



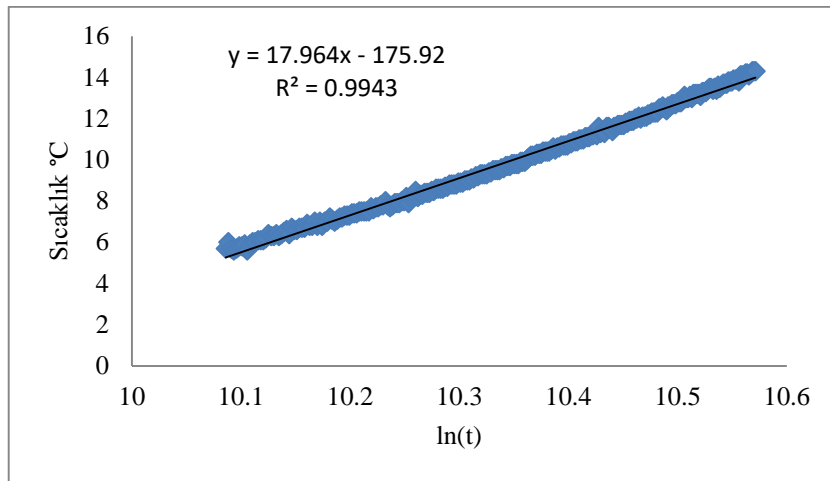
Şekil 3.34 1590 Ana Yol - 3 numaralı prob okumaları.



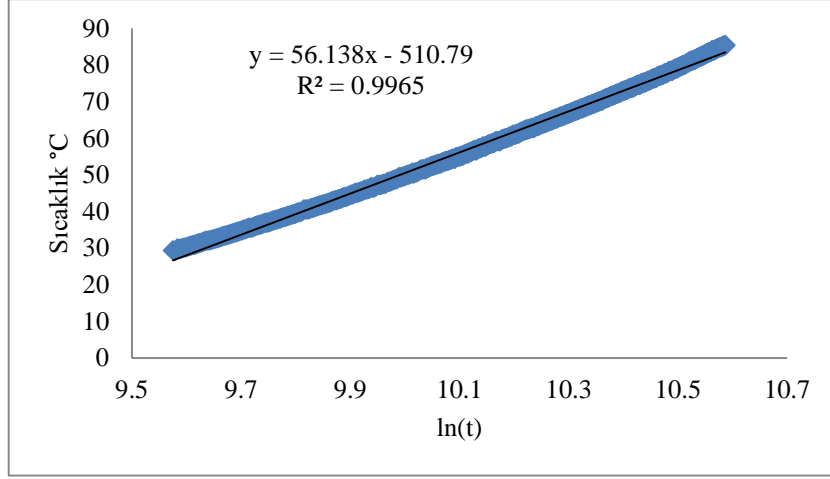
Şekil 3.35 1590 Ana Yol - 4 numaralı prob okumaları.



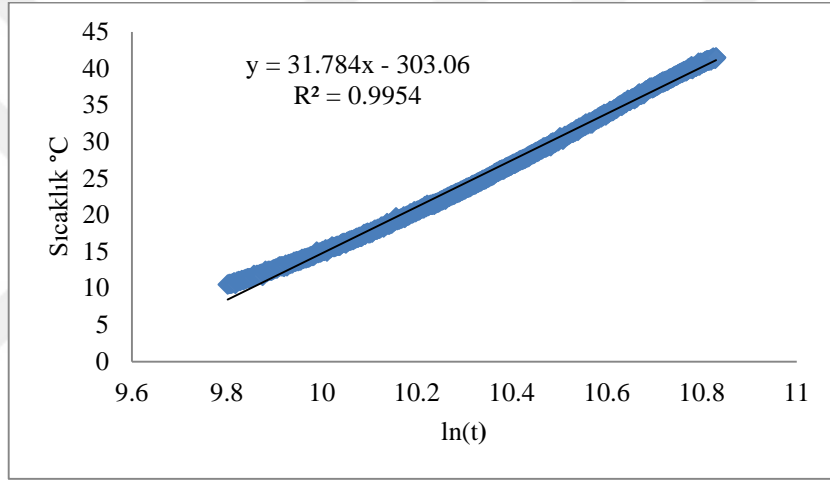
Şekil 3.36 1590 Ana Yol - 5 numaralı prob okumaları.



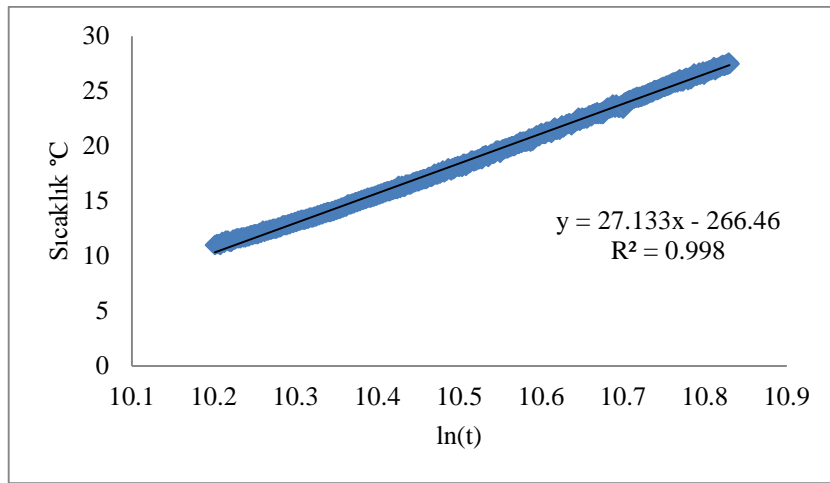
Şekil 3.37 1590 Ana Yol - 6 numaralı prob okumaları.



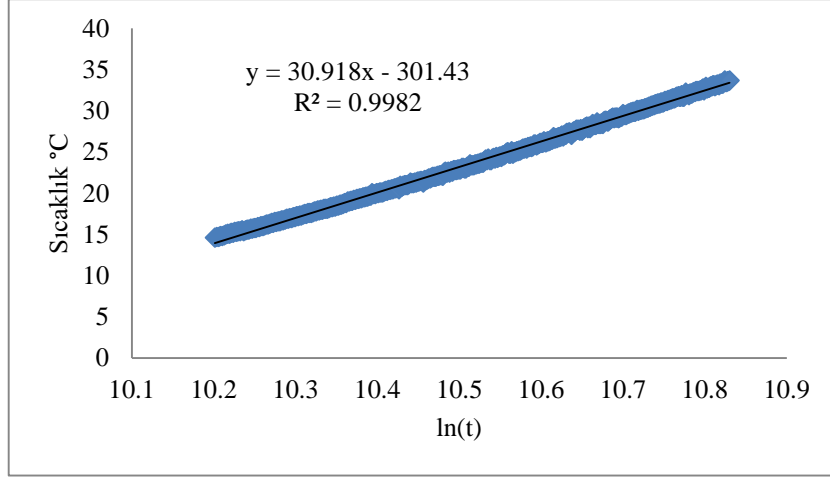
Şekil 3.38 1590 Ana Yol - 7 numaralı prob okumaları.



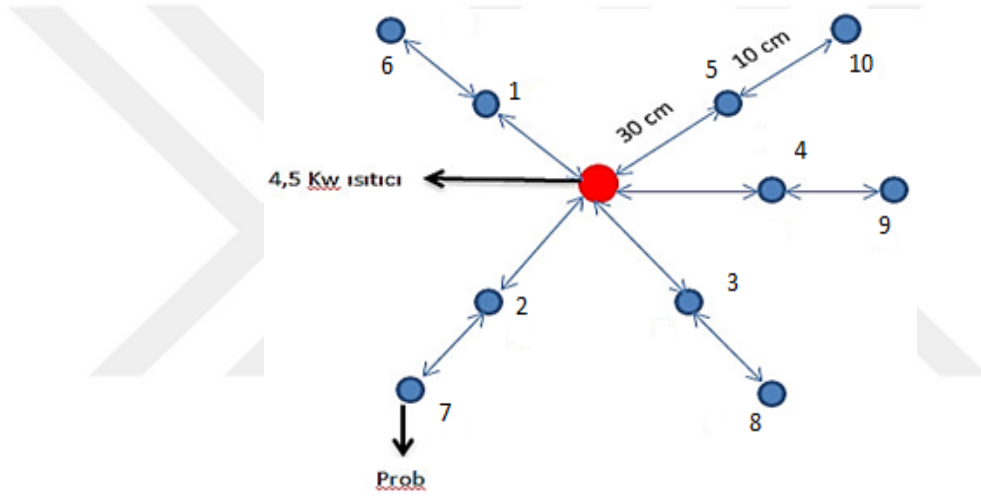
Şekil 3.39 1590 Ana Yol - 8 numaralı prob okumaları.



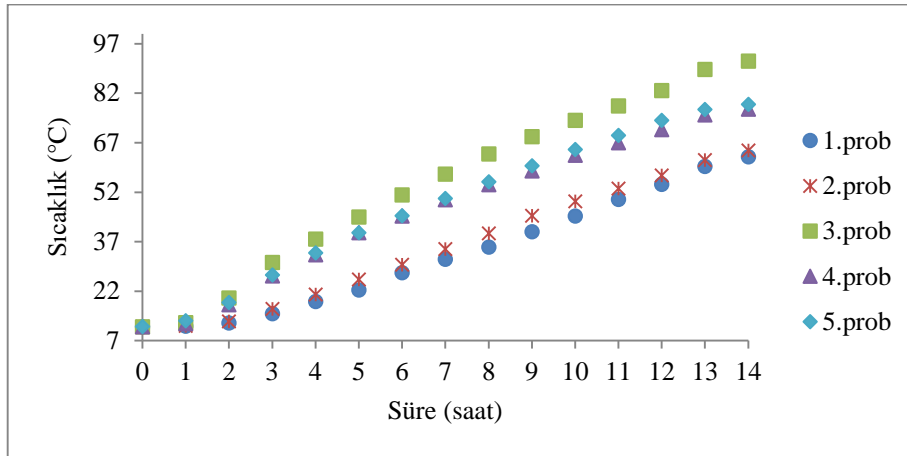
Şekil 3.40 1590 Ana Yol - 9 numaralı prob okumaları.



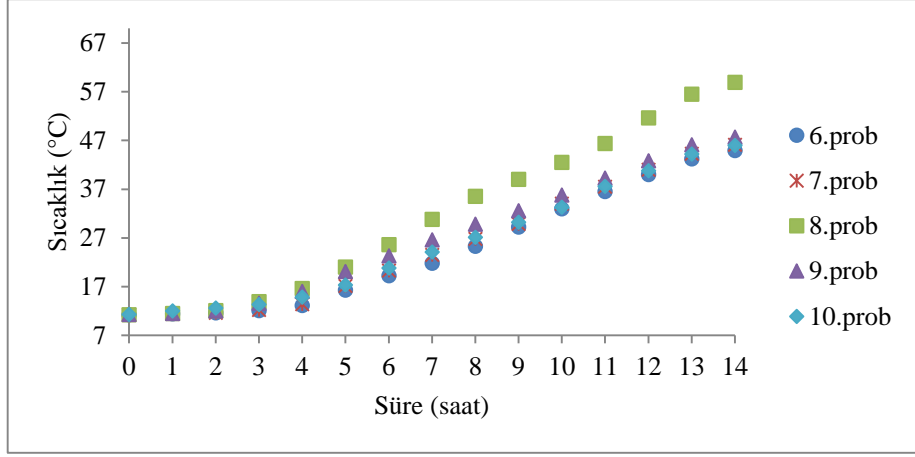
Şekil 3.41 1590 Ana Yol - 10 numaralı prob okumaları.



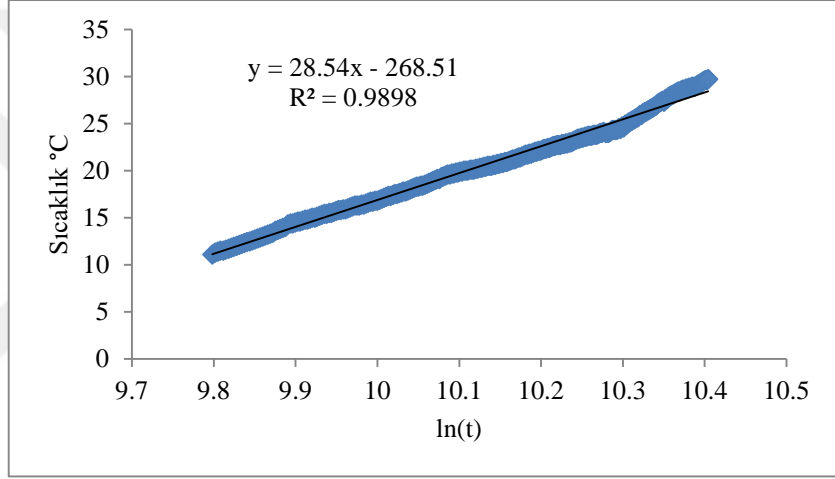
Şekil 3.42 1560 Ana Yol'da BHT ölçüm düzeneği.



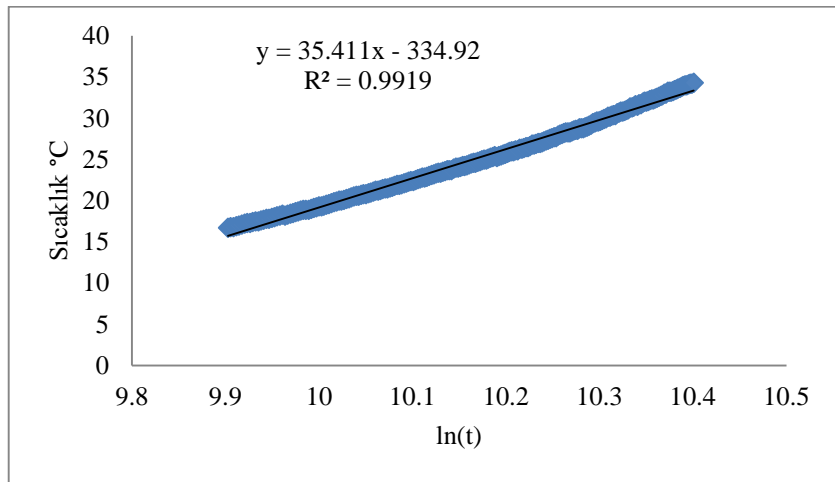
Şekil 3.43 1560 ısıtıcıya 30 cm mesafedeki problemin ısınma eğrisi.



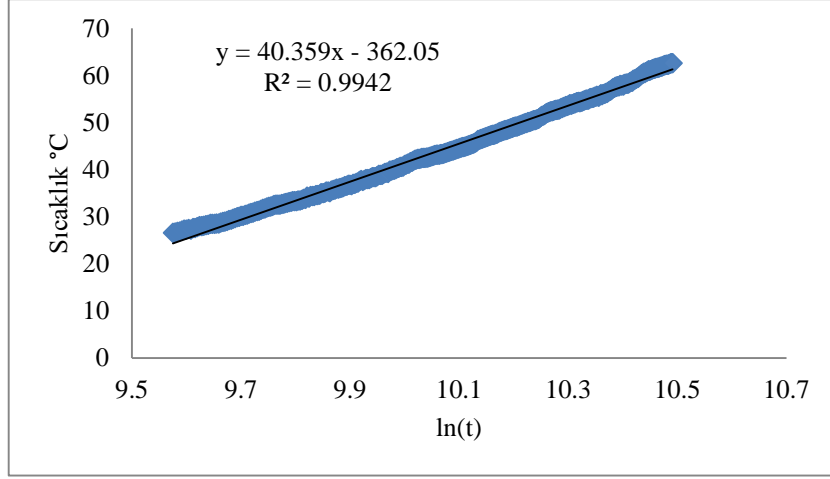
Şekil 3.44 1560 ısıtıcıya 40 cm mesafedeki problemlerin ısınma eğrisi.



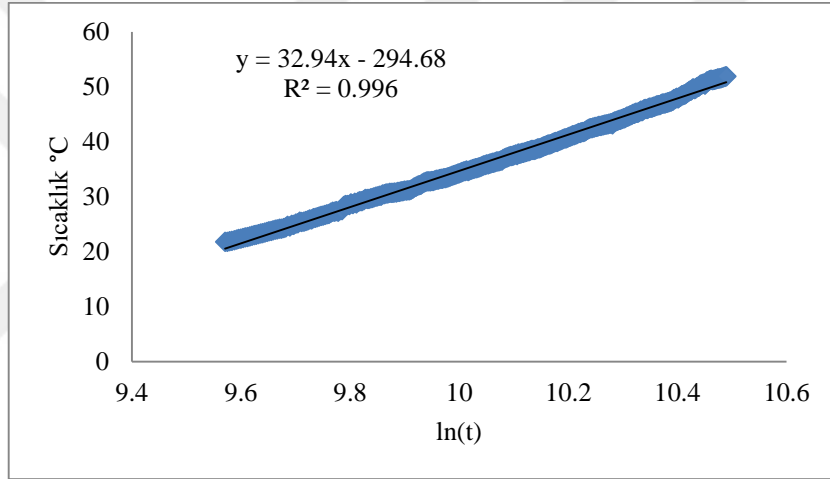
Şekil 3.45 1560 Ana Yol -1 numaralı prob okumaları.



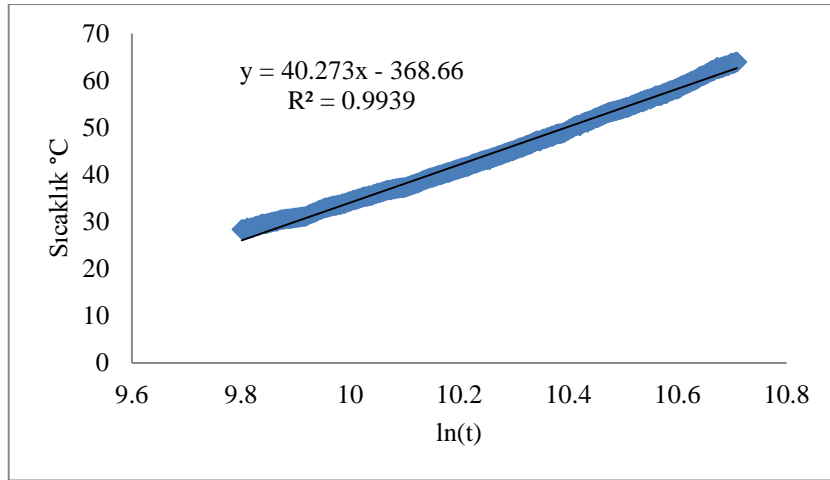
Şekil 3.46 1560 Ana Yol -2 numaralı prob okumaları.



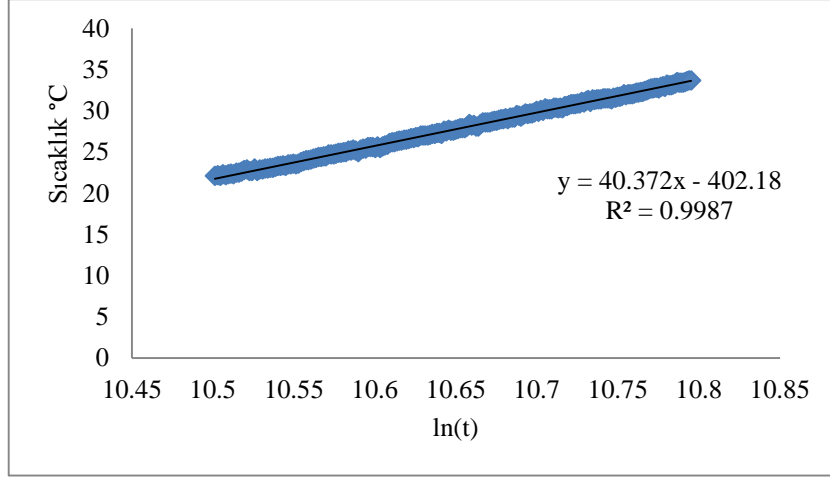
Şekil 3.47 1560 Ana Yol -3 numaralı prob okumaları.



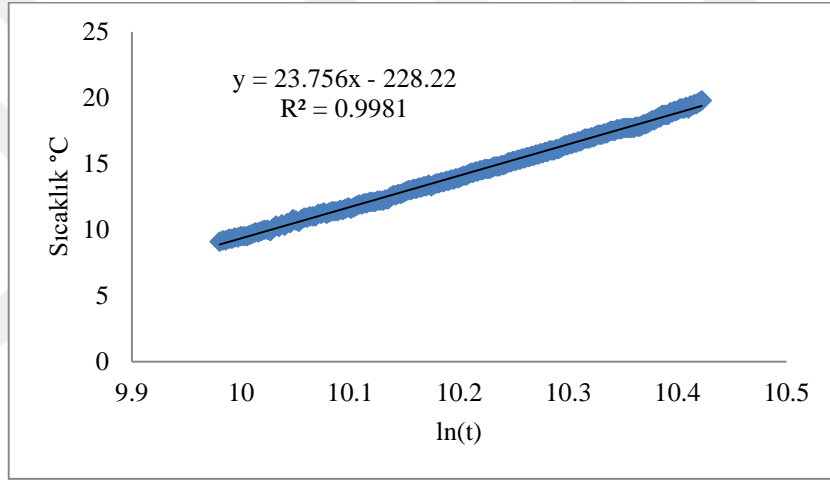
Şekil 3.48 1560 Ana Yol -4 numaralı prob okumaları.



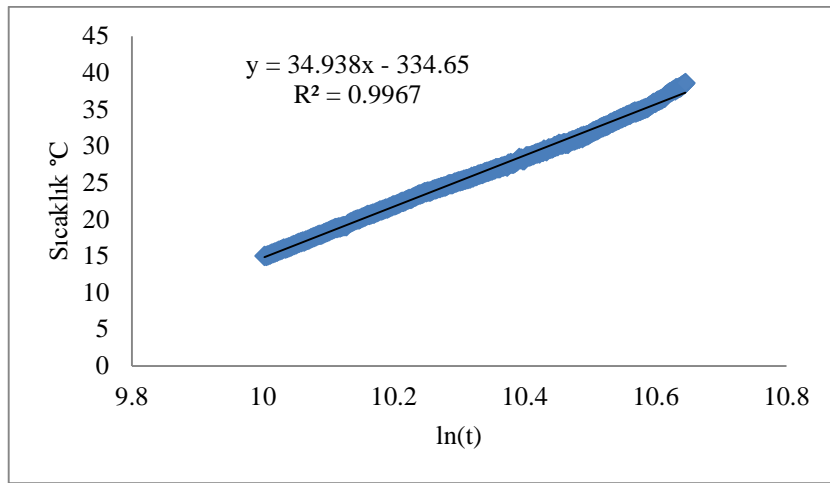
Şekil 3.49 1560 Ana Yol -5 numaralı prob okumaları.



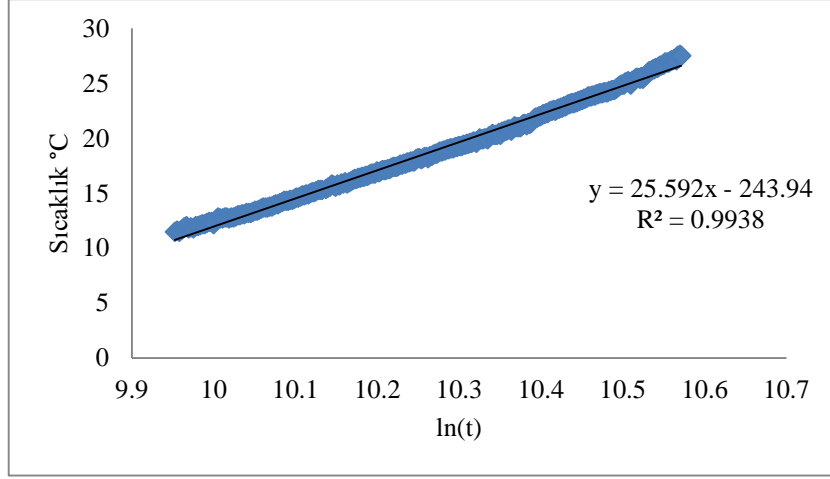
Şekil 3.50 1560 Ana Yol -6 numaralı prob okumaları.



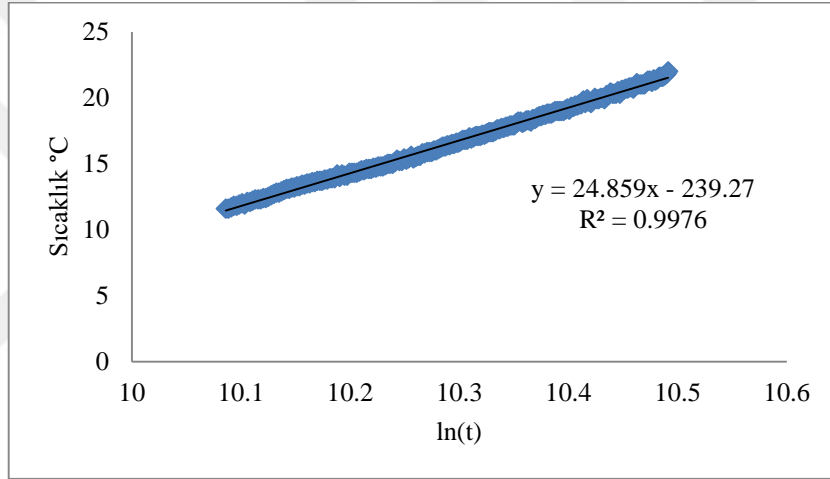
Şekil 3.51 1560 Ana Yol -7 numaralı prob okumaları.



Şekil 3.52 1560 Ana Yol -8 numaralı prob okumaları.



Şekil 3.53 1560 Ana Yol -9 numaralı prob okumaları.



Şekil 3.54 1560 Ana Yol -10 numaralı prob okumaları.

Yerinde yapılan ölçümler sonucunda 1560 Ana Yol için grafiksel analiz yöntemiyle hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Hesaplamalarda $\Delta T - \ln(t)$ eğiliminin doğrusal hattı göz önüne alındığı için bütün prob okumalarına ait grafiklerde güven aralıkları 0,99’dur. $\ln(t_0)$ değerleri, prob grafiklerinde görülen doğrusal hatların x eksenini kestiği noktalardaki değerlerdir. t_0 değeri ise, $\ln(t_0)$ değerinin üstel fonksiyonun alınması ile elde edilmektedir. Hesaplamada kullanılan r^2 , problemlerin merkezdeki ısıtıcıya olan mesafelerinin metrekare cinsinden ifadeleridir. q değeri ise, ısıtıcının toplam gücünün birim metre başına değeridir. Hesaplanan bu değerler, eşitlik 3.8 ve 3.9’da yerlerine konularak ısı yayılım katsayısı (κ) ve ısı iletim katsayısı (k) elde edilmektedir.

$$\kappa = \frac{r^2}{4 C_E t_0} = \frac{0,09}{4 * 1,781 * 12188}$$

$$\kappa = 1,037 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sn}$$

$$k = \frac{q}{4 \pi m} = \frac{1500}{4 * 3,14 * 28,54}$$

$$k = 4,185 \text{ W/mK}$$

Çizelge 3.2 1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz).

Prob No	Formül	R ²	ln(t ₀)	t ₀ (sn)	r ² (m ²)	κ (10 ⁻⁶) (m ² /sn)	k _{t₀} (W/mK)
1	y = 28,54x - 268,51	0,99	9,408	12188	0,09	1,04	4,185
2	y = 35,411x - 334,92	0,99	9,458	12811	0,09	0,98	3,373
3	y = 40,359x - 362,05	0,99	8,970	7869	0,09	1,61	3,156
4	y = 32,94x - 294,68	0,99	8,946	7677	0,09	1,64	3,626
5	y = 40,273x - 368,66	0,99	9,154	9452	0,09	1,34	2,965
6	y = 40,372x - 402,18	0,99	9,962	21202	0,16	1,06	2,958
7	y = 23,756x - 228,22	0,99	9,607	14866	0,16	1,51	5,027
8	y = 34,938x - 334,65	0,99	9,578	14449	0,16	1,55	3,418
9	y = 25,592x - 243,94	0,99	9,531	13793	0,16	1,63	4,667
10	y = 24,859x - 239,27	0,99	9,625	15140	0,16	1,48	4,804
Ortalama							3,818

1560 Ana Yol için elde edilen değerlerin LHS yöntemine göre çözümlenmiş ve problemlerin kayaca yerleştirilme düzenine göre hesaplanmış ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Prob sıcaklık okumalarının, ısı iletim katsayısının hesaplanmasına olanak sağlayacak sıcaklık değerlerine ulaşamaması durumunda doğal olarak katsayı hesabı yapılamamış ve çizelgede bu noktalara ait kısımlar boş bırakılmıştır. LHS yönteminin çözümlenmesi eşitlik 3.7’ye göre yapılmıştır. Eşitlikteki ln(t) değerleri, problemlerdeki başlangıç sıcaklık değerleri (t₀) ile son sıcaklık değerleri (t_s) arasındaki farkın (ΔT) 20°C olduğu anı veren zamanın logaritmik değeridir.

$$k_{30} = \frac{q}{4 \pi \Delta T} \left[\ln t - \ln \left(\frac{r^2}{4 \kappa C_E} \right) \right]$$

$$k_{30} = \frac{1500}{4 * 3,14 * 20} \left[10,10 - \ln \left(\frac{0,09}{4 * 1,036 \times 10^{-6} * 1,781} \right) \right] = 4,164 \text{ W/mK}$$

Çizelge 3.3 1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK).

Prob No	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
1	4,164	3,987	3,590	3,256	–	–	–
2	3,363	3,543	3,254	3,057	–	–	–
3	–	2,874	3,014	2,992	2,910	2,835	2,696
4	3,155	3,587	3,674	3,251	3,187	–	–
5	–	2,809	3,026	2,994	3,063	–	–
6	2,855	2,937	–	–	–	–	–
7	4,901	4,252	–	–	–	–	–
8	3,378	3,451	3,253	–	–	–	–
9	4,734	4,393	–	–	–	–	–
10	3,202	3,261	–	–	–	–	–
Ort	3,719	3,509	3,302	3,110	3,053	2,835	2,696

1560 Ana Yol için çizilmiş bulunan prob grafiklerindeki doğrusal hatlar üzerinde bulunan herhangi iki nokta arasındaki değere göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri ise Çizelge 3.4’de verilmiştir. ΔT ve $\ln t$ grafiğinin doğrusal olan bölgelerinde seçilen iki nokta arasındaki değerlerin okunması suretiyle ısı iletim katsayısı hesaplaması aşağıda verilen eşitlik aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

$$k = \frac{q (\ln t_2 - \ln t_1)}{4 \pi (\Delta T_2 - \Delta T_1)} \text{ W/mK} \quad [3.10]$$

- q : Isı miktarı (W/m)
k : Isı iletim katsayısı (W/mK)
 $\ln t_1$: 1. noktanın grafikten okunan $\ln t$ değeri
 $\ln t_2$: 2. noktanın grafikten okunan $\ln t$ değeri
 ΔT_1 : 1. noktanın başlangıç sıcaklığından itibaren farkı
 ΔT_2 : 2. noktanın başlangıç sıcaklığından itibaren farkı

$$k = \frac{1500 (10,41 - 10,106)}{4 * 3,14 (41,2 - 31,2)} \text{ W/mK}$$

$$k = 3,632 \text{ W/mK}$$

Çizelge 3.4 1560 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK).

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{40}	3,632	3,904	4,644	4,451	3,677	3,101	3,904	2,661	3,709	3,016
								Ortalama		3,670

Yerinde yapılan ölçümler sonucunda 1590 Ana Yol için; grafiksel analize, LHS yöntemine ve doğrusal hatlar üzerinde bulunan herhangi iki noktaya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri ise Çizelge 3.5-3.7’de verilmiştir. Ölçümler sonucunda 6 numaralı prob için LHS çözümlemesinde sadece 30°C’deki sıcaklık noktasında okuma yapılabilmiş ve başka sıcaklık değerinde okuma yapılamadığı için sonuç doğrulanamamıştır. Dolayısıyla LHS ve iki noktaya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri 6 nolu prob için hesaplanmamıştır.

Çizelge 3.5 1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz).

Prob No	Formül	R ²	ln(t ₀)	t ₀ (sn)	r ² (m ²)	κ (10 ⁻⁶) (m ² /sn)	k _{to} (W/mK)
1	y = 26,283x - 253,20	0,99	9,63	15269	0,16	1,47	4,544
2	y = 39,224x - 362,05	0,99	9,23	10202	0,09	1,24	3,045
3	y = 43,424x - 403,47	0,99	9,29	10844	0,09	1,16	2,750
4	y = 44,771x - 411,12	0,99	9,18	9728	0,09	1,30	2,668
5	y = 45,563x - 422,11	0,99	9,26	10555	0,09	1,20	2,621
6	y = 17,964x - 175,92	0,99	9,79	17907	0,16	1,35	6,648
7	y = 56,138x - 510,79	0,99	9,10	8945	0,09	1,41	2,127
8	y = 31,784x - 303,06	0,99	9,53	13835	0,16	1,62	3,757
9	y = 27,133x - 266,46	0,99	9,82	18408	0,16	1,22	4,402
10	y = 30,918x - 301,43	0,99	9,75	17143	0,16	1,31	3,863
						Ortalama	3,309

Çizelge 3.6 1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK).

Prob No	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
1	4,602	4,386	–	–	–	–	–
2	2,964	3,547	3,381	3,169	3,072	–	–
3	3,164	3,106	3,026	2,924	2,858	–	–
4	3,241	3,154	3,204	2,935	2,827	2,772	–
5	2,985	3,002	2,922	3,463	3,263	–	–
7	2,702	2,703	2,634	2,541	2,951	2,399	2,525
8	4,032	3,918	3,879	–	–	–	–
9	4,502	4,364	–	–	–	–	–
10	3,964	3,899	–	–	–	–	–
Ort	3,573	3,564	3,174	3,006	2,994	2,585	2,739

Çizelge 3.7 1590 Ana Yol ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK).

Prob No	1	2	3	4	5	7	8	9	10
k ₄₀	3,941	2,882	2,719	2,672	2,707	2,528	3,440	4,631	3,633
							Ortalama		3,234

Yerinde yapılan ölçümler sonucunda K2E için; grafiksel analize, LHS yöntemine ve doğrusal hatlar üzerinde bulunan herhangi iki noktaya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri ise Çizelge 3.8-3.10'da verilmiştir. Ölçümler sonucunda 10 numaralı prob için LHS çözümlemesinde sadece 30°C'deki sıcaklık noktasında okuma yapılabilmiş ve başka sıcaklık değerinde okuma yapılamadığı için sonuç doğrulanamamıştır. Bu sebepten dolayı bu değer anomali olarak kabul edilmiştir. Aynı durum iki noktaya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı için de geçerlidir.

Çizelge 3.8 K2E ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz).

Prob No	Formül	R ²	ln(t ₀)	t ₀ (sn)	r ² (m ²)	κ (10 ⁻⁶) (m ² /sn)	k _{t0} (W/mK)
1	y = 28,984x - 277,49	0,99	9,58	14473	0,16	1,55	4,120
2	y = 49,432x - 454,9	0,99	9,57	14384	0,09	1,56	2,416
3	y = 46,125x - 422,79	0,99	9,17	9568	0,09	1,32	2,589
4	y = 31,489x - 307,46	0,99	9,76	17419	0,16	1,25	3,793
5	y = 38,858x - 364,08	0,99	9,37	11725	0,09	1,07	3,073
6	y = 34,977x - 327,68	0,99	9,37	11713	0,09	1,08	3,414
7	y = 31,247x - 293,88	0,99	9,41	12150	0,09	1,04	3,822
8	y = 37,18x - 378,65	0,98	10,18	26482	0,16	0,85	3,212
9	y = 36,992x - 370,07	0,99	10,00	22116	0,16	1,02	3,228
10	y = 20,783x - 203,19	0,99	9,78	17619	0,16	1,27	5,746
Ortalama							3,297

Çizelge 3.9 K2E ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK).

Prob No	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
1	4,183	4,166	–	–	–	–
2	2,913	2,836	2,674	2,590	2,750	2,742
3	3,189	3,072	2,912	2,786	2,778	2,614
4	3,717	3,641	–	–	–	–
5	3,324	3,276	3,201	2,856	2,662	–
6	3,704	3,598	3,460	3,147	2,852	–
7	3,837	3,805	3,335	2,980	2,684	–
8	2,625	2,305	–	–	–	–
9	3,285	3,173	–	–	–	–
Ort	3,420	3,319	3,116	2,872	2,745	2,678

Çizelge 3.10 K2E ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK).

Prob No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k ₄₀	4,120	3,614	2,300	3,527	2,977	3,045	2,950	2,250	2,979
Ortalama									3,085

Yerinde yapılan ölçümler sonucunda K2B için; grafiksel analize, LHS yöntemine ve doğrusal hatlar üzerinde bulunan herhangi iki noktaya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri ise Çizelge 3.11-3.13’de verilmiştir. 1, 4, 6, 8 ve 10 numaralı problemlerde yeteri kadar ısınma olmadığı için grafiksel analiz çözümü uygulanamamış ve bu problemler değerlendirmeye alınmamıştır.

Çizelge 3.11 K2B ısı iletim katsayısı değerleri (Grafiksel analiz).

Prob No	Formül	R ²	ln(t ₀)	t ₀ (sn)	r ² (m ²)	κ (10 ⁻⁶) (m ² /sn)	k _{t0} (W/mK)
2	y = 51,036x - 483,24	0,99	9,47	12947	0,09	0,98	2,340
3	y = 28,673x - 272,00	0,99	9,49	13178	0,09	0,96	4,165
5	y = 30,613x - 296,24	0,99	9,68	15946	0,09	0,79	3,901
7	y = 34,765x - 336,15	0,99	9,67	15823	0,09	0,80	3,435
9	y = 48,557x - 459,57	0,99	9,46	12894	0,09	0,98	2,460
Ortalama							3,260

Çizelge 3.12 K2B ısı iletim katsayısı değerleri (LHS, W/mK).

Prob No	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
2	2,464	2,526	2,418	2,455
3	4,270	3,268	-	-
5	4,020	3,914	-	-
7	3,564	3,442	-	-
9	2,226	2,591	2,557	2,567
Ort	3,309	3,148	2,487	2,511

Çizelge 3.13 K2B ısı iletim katsayısı değerleri (İki nokta arası, W/mK).

Prob No	2	3	5	7	9
k ₄₀	2,372	3,631	3,491	3,160	2,887
Ortalama					3,108

3.2 Laboratuvar Çalışmaları ve Sonuçları

3.2.1 Numunelerin hazırlanması

Yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği bölgelerden alınan örnekler MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarlarına getirilmiştir. Laboratuvara getirilen örneklerden numune üzerinde gerçekleştirilecek deney standartlarına uygun boyutlarda ve sayılarda numuneler hazırlanmıştır. Her deney için standartlar ve numune hazırlanmasına yönelik ayrıntılar ilgili bölümlerde verilecektir.

3.2.2 Isı iletim katsayısı ölçümleri ve sonuçları

Isı iletim katsayısı ölçümü için karotiyer cihazı ile alınan 2 inç çapındaki silindirik numuneler, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan kontak direnç etkisi nedeniyle oluşabilecek ısı iletim farklarının ortaya çıkmaması 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 (Kersten, 1949; Higashi, 1952; Penner, 1963) hususları silindirik karot numunelerinin düzeltme ve boyutlandırma işlemlerinde dikkate alınmıştır. Sonuç olarak numuneler; yataklanmaya paralel, yaklaşık 1 cm kalınlığında ve 2 inç çapındadır. Şekil 3.55'de ısı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler görülmektedir.



Şekil 3.55 Isı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan numuneler.

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; laboratuvar ölçüm sonuçları ile yerinde elde edilen sonuçların karşılaştırılarak kayaçların ısı iletim özelliklerini etkileyen parametrelerin ortaya konulabilmesi adına, 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 doygun hale getirilmiş ve suya doygun haldeki ısı iletim katsayıları ölçülmüştür.

Isı iletim katsayısı tayini için MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarında mevcut olan ve birçok araştırma ve proje çalışmalarında kullanılmış olan Unitherm 2022 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.56). 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.



Şekil 3.56 Anter Unitherm 2022 model muhafazalı ısı akış ölçer cihazı.

Numunelerin kuru ve suya doygun haldeki ve ortam koşullarındaki ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 3.14–3.16 arasında verilmiştir.

Çizelge 3.14 Kuru numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri.

Numune No	28 °C	38 °C	48 °C	58 °C	68 °C	78 °C	88 °C
K2B	1,769	1,772	1,802	1,813	1,873	1,866	1,900
K2E	1,861	1,900	1,937	1,973	2,030	2,050	2,065
1590	1,701	1,696	1,765	1,763	1,801	1,792	1,825
1560	1,764	1,766	1,798	1,801	1,829	1,855	1,870

Çizelge 3.15 Nemli (%30-50) numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri.

Numune No	28 °C	38 °C	48 °C	58 °C	68 °C	78 °C	88 °C
K2B	1,890	1,882	1,924	1,928	2,012	1,982	2,014
K2E	2,002	2,018	2,063	2,100	2,138	2,167	2,198
1590	1,801	1,803	1,846	1,839	1,900	1,891	1,903
1560	1,832	1,838	1,854	1,867	1,887	1,921	1,963

Çizelge 3.16 Suyu doymun numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri.

Numune No	28 °C	38 °C	48 °C	58 °C	68 °C	78 °C	88 °C
K2B	1,934	1,958	1,992	1,981	2,059	2,049	2,072
K2E	2,115	2,147	2,197	2,205	2,254	2,286	2,281
1590	1,845	1,856	1,904	1,892	1,962	1,949	1,971
1560	1,885	1,902	1,922	1,951	1,968	2,020	2,075

3.2.3 Numunelerin tanımlanmasına yönelik fiziksel testler

Çalışma bölgesindeki kayaçların fiziksel özelliklerinin ortaya konulabilmesi amacıyla; kayaçlardan alınan silindirik karot numunelerinden 5*5 cm boyutlarında, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi için ise uygun özelliklere sahip numuneler hazırlanmıştır.

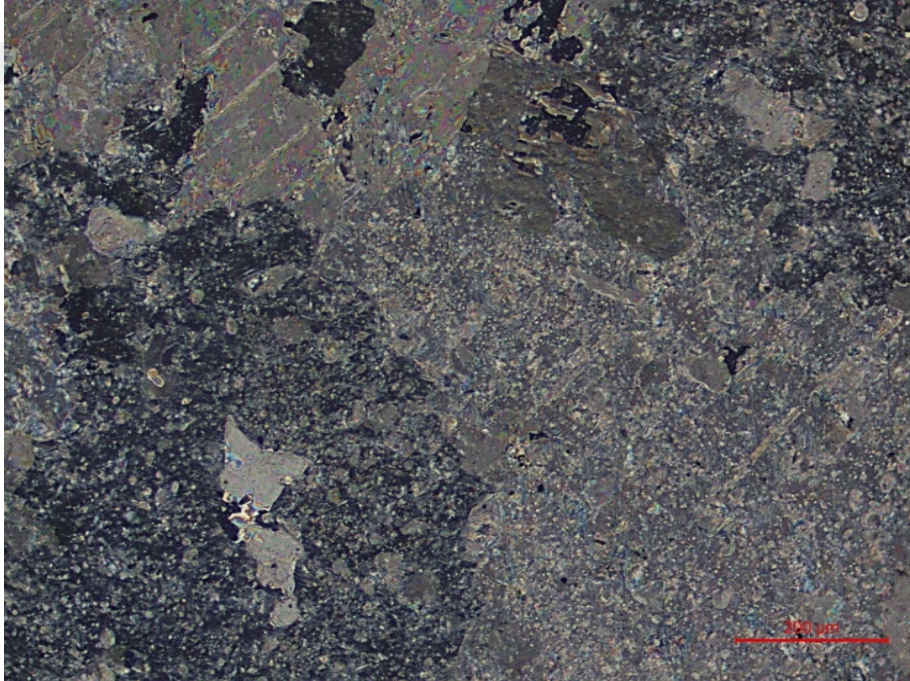
Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayısı değerleri arasındaki olası farklılıkların araştırılabilmesi için hazırlanan bu numuneler üzerinde yoğunluk ve gözeneklilik (porozite), su emme ve kılcal su emme katsayısı belirleme deneyleri ilgili TSE standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; V_p ve V_s (P ve S dalga hızları) ultrasonik dalga hızlarının kayaçların ısı iletim katsayıları üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik olarak, 5*5 cm boyutundaki 24 adet numune üzerinde ortam koşullarındaki durum için ultrasonik hız deneyi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalara ait sonuçlar aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

3.2.3.1 Örneklerin kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları

Yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği bölgelerden alınan örneklerden kimyasal ve mineralojik analiz için uygun numuneler hazırlanmıştır. Toz haline getirilen numuneler kimyasal analize, örneklerden alınan ince kesitler ise mineralojik analize tabi tutulmuşlardır. Bölgeler bazında kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.17-3.20’de, ince kesit görüntüleri ise Şekil 3.57-3.60’da verilmiştir.

Çizelge 3.17 K2B numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Na ₂ O	0,0429
MgO	9,2
Al ₂ O ₃	0,413
SiO ₂	11,83
CaO	40,67
Fe ₂ O ₃	1,34
K ₂ O	0,0549
TiO ₂	0,0213
MnO	0,212
P ₂ O ₅	0,029
Toplam	63,8131



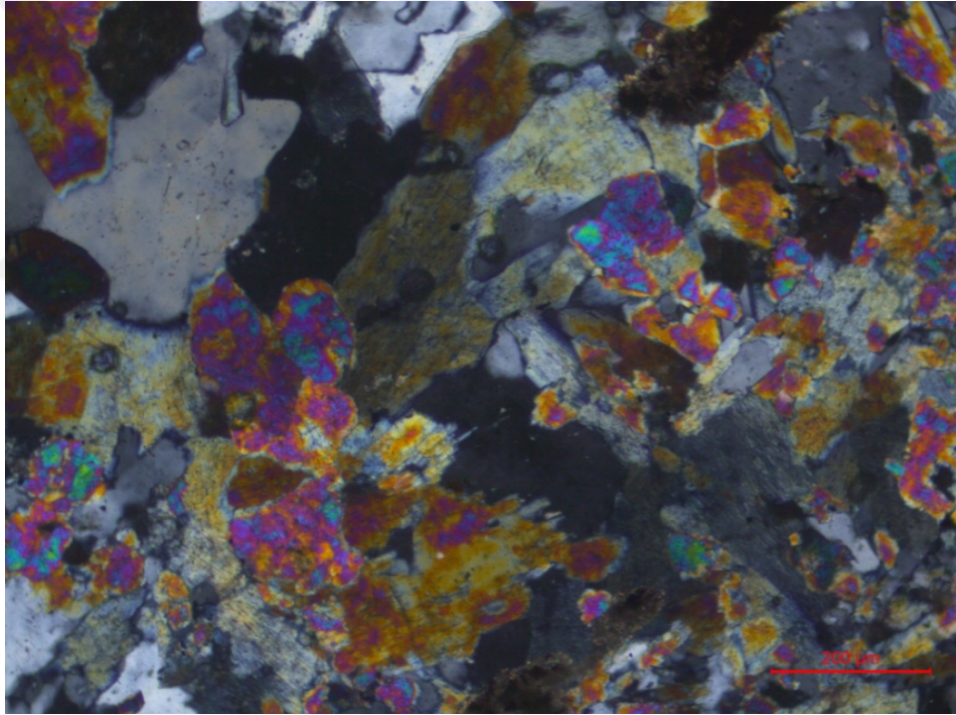
Şekil 3.57 K2B numunesi ince kesit görünümü.

K2B örneği üzerinde yapılan ince kesit analizi sonucunda kayacın mineralojik adı mermer, kayaç dokusu ise Granoblastik doku olarak tanımlanmıştır. Kayacın mineral

bileşimi; Kalsit, Dolomit ve eser miktarda Amfibol grubu minerallerden oluşmaktadır.

Çizelge 3.18 K2E numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Na ₂ O	0,367
MgO	3,23
Al ₂ O ₃	9,27
SiO ₂	61,63
CaO	12,59
Fe ₂ O ₃	6,17
K ₂ O	2,18
TiO ₂	0,662
MnO	0,532
P ₂ O ₅	0,16
Toplam	96,791

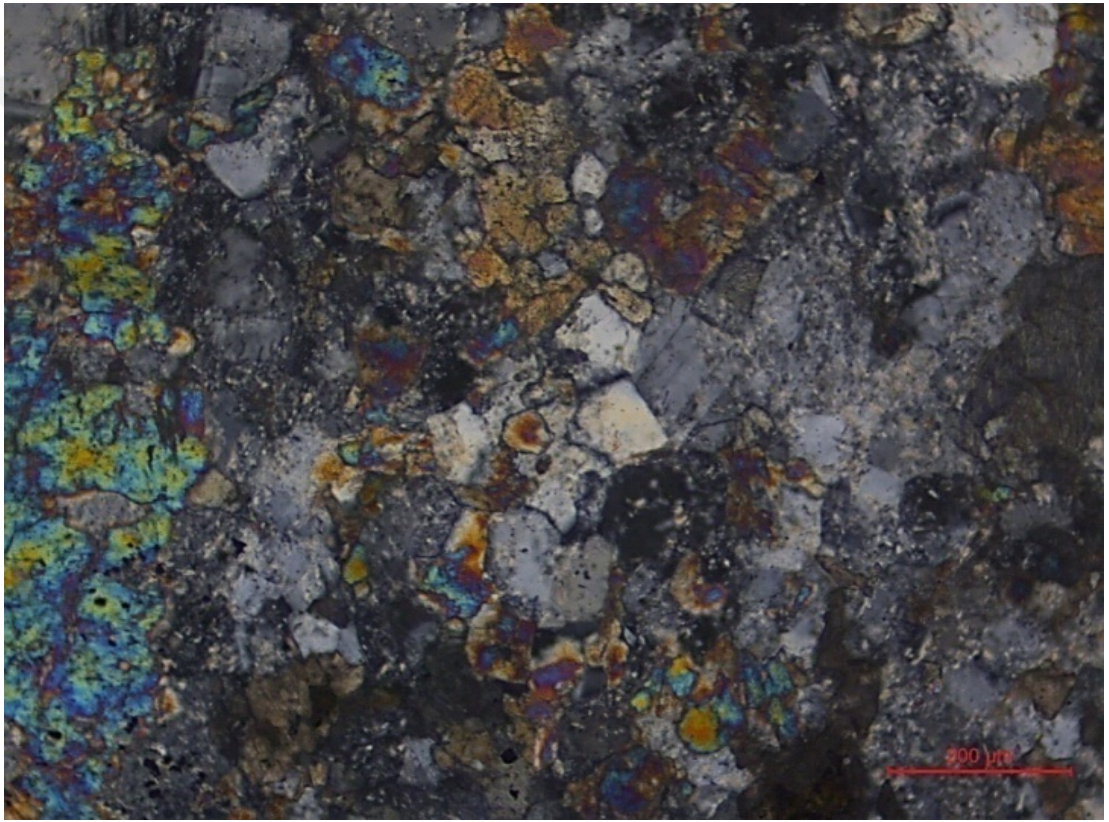


Şekil 3.58 K2E numunesi ince kesit görünümü.

K2E örneği üzerinde yapılan ince kesit analizi sonucunda örnek, mineralojik açıdan Kalksilikatik Gnays, mineral dokusu açısından ise Granoblastik doku olarak tanımlanmıştır. Kayaç mineral bileşenleri; Epidot, Kalsit, Feldspat ve Piroksen olup mineral kompozisyonu %60 Epidot ağırlıklıdır.

Çizelge 3.19 1590 Ana Yol numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Na ₂ O	1,34
MgO	5,04
Al ₂ O ₃	11,11
SiO ₂	54,96
CaO	14,08
Fe ₂ O ₃	5,85
K ₂ O	3,31
TiO ₂	0,952
MnO	0,444
P ₂ O ₅	0,219
Toplam	97,305

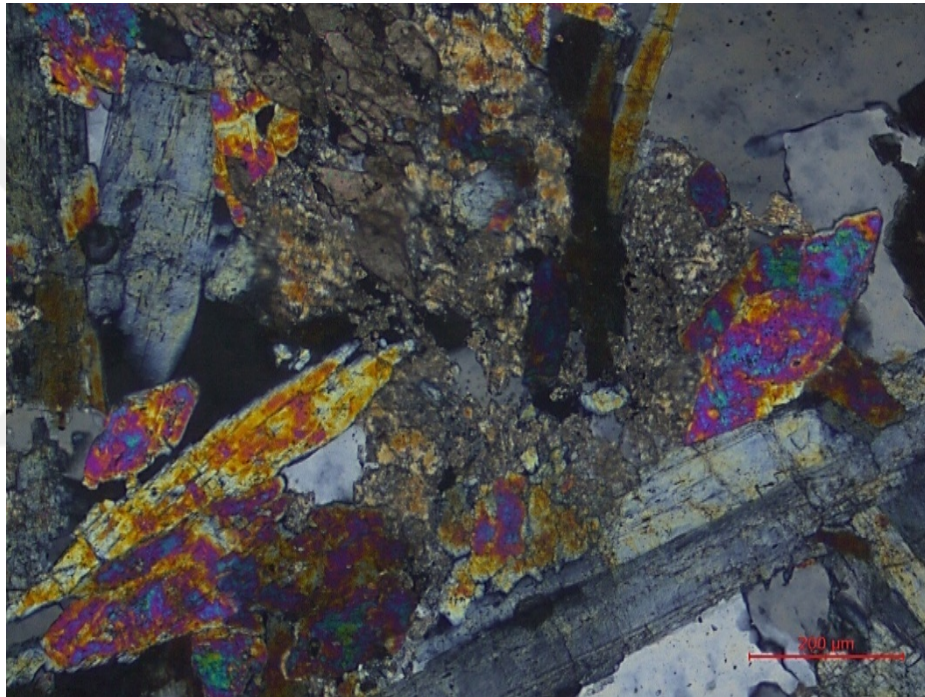


Şekil 3.59 1590 Ana Yol numunesi ince kesit görünümü.

1590 Ana Yol örneği üzerinde yapılan ince kesit analizi sonucunda örnek, mineralojik açıdan Kalksilikatik Gnays, kayaç dokusu ise Granoblastik doku olarak tanımlanmıştır. Mineral bileşimi; Feldspat, Epidot, Titanit (Sfen), Silimanit, Piroksen ve Kalsit olup kayaçta killeşme ve %10-15 arasında Epidot minerali gözlenmiştir.

Çizelge 3.20 1560 Ana Yol numunesi kimyasal analiz sonuçları.

Na ₂ O	0,0587
MgO	5,75
Al ₂ O ₃	10,44
SiO ₂	45,52
CaO	20,67
Fe ₂ O ₃	12,87
K ₂ O	0,0198
TiO ₂	0,935
MnO	0,946
P ₂ O ₅	0,204
Toplam	97,4135



Şekil 3.60 1560 Ana Yol numunesi ince kesit görünümü.

1560 Ana Yol örneği üzerinde yapılan ince kesit analizi sonucunda örnek, mineralojik açıdan Kalksilikatik Gnays, mineral dokusu açısından ise Granoblastik doku olarak tanımlanmıştır. Kayaç mineral bileşenleri; Epidot, Kuvars, Kalsit, Feldspat, Piroksen ve Opak mineralleri olup ağırlıkça %50-60 oranında Epidot ve %15 civarında Kuvars'tır.

3.2.3.2 Yoğunluk ve gözeneklilik (porozite) belirleme deney sonuçları

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.

Görünür yoğunluk deneyi 6 adet 5x5 cm'lik numune üzerinde TS EN 1936 standardına göre yapılır. Numuneler ilk önce yıkanır ve sonra 70 °C'lik etüvde 24 saat kurumaya bırakılır. Birbirini izleyen 24 saat aralıklarda kütle tartımları yapılır ve ağırlığın %1'i aşmadığı durumda numune sabit kütleyle (M_d) gelmiş kabul edilir. Numuneler daha sonra açık gözeneklerdeki havayı boşaltmak için 22 milibar emme gücüne sahip kapaklı vakum cihazında 2 saat bekletilir. Vakum işlemi devam ederken numunelerin boyunu geçecek şekilde su doldurulur, su dolduktan sonra vakum kesilir ve atmosfer basıncında 24 saat numune bekletilir. Bekleme süresi bittikten sonra numuneler suda tartılır ve (M_h) bulunur, yüzeyleri kurularak havada suya doymuş tartım yapılır ve (M_s) bulunur.

Gerçek yoğunluk (ρ_r) ise ASTM 5550-06 standardına göre Helyum piknometresi yöntemi ile yapılır. Cihaz, maksimum 135 cm³ hacmindeki çeşitli malzemelerin helyum gazı kullanarak hacim ve yoğunluk değerini belirlemede kullanılır. Helyum piknometresi Arşimet'in akışkan taşması prensibini ve Boyle Kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulmayı amaçlar. He gazının malzemede etki edeceği gözenek sayısının fazla olmasından dolayı helyum piknometresi ile yoğunluk tespiti diğer yöntemlerden daha güvenilir ve hassastır. Burada ' ρ_{rh} ' 20 °C'deki suyun görünür yoğunluğudur.

$$\rho_b = \frac{M_d}{M_s - M_h} \rho_{rh} \quad [3.11]$$

$$n_0 = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} 100 \quad [3.12]$$

$$n = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r} \right) 100 \quad [3.13]$$

ρ_b	:	Görünür yoğunluk
ρ_r	:	Gerçek yoğunluk
n_0	:	Açık gözeneklilik
n	:	Toplam gözeneklilik
ρ_{rh}	:	Suyun 20°C'deki görünür yoğunluğu
M_d	:	Kuru kütle
M_s	:	Doymuş kütle
M_h	:	Sudaki kütle

Ölçüm bölgelerinden alınan numuneler üzerinde standartlara uygun olarak yapılan yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deney sonuçları Çizelge 3.21’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.21 Numunelerin, gerçek ve görünür yoğunluk, açık ve toplam gözeneklilik değerleri.

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

3.2.3.3 Su emme katsayısı belirleme deney sonuçları

Kayaçlarda su emme katsayısı kayaç türüne, açık gözenekliliğe ve çatlak yapısına bağlı olarak değişir. Özellikle sedimanter kayaçlarda su emme katsayısı metamorfik ve magmatik kayaçlara göre oldukça yüksektir.

Kayaçlarda su emme katsayısı (A_b) tayini TS EN 13755 standardına göre yapılmıştır. Su emme deneyi 6 adet 5x5x5 cm’lik küp numune üzerinde yapılır. Numuneler ilk önce yıkanır, 70 °C’lik etüvde 24 saat kurumaya bırakılır. Birbirini izleyen 24 saat aralıklarda kütle tartımları yapılır ve ağırlığın %0,1’i aşmadığı durumda numune sabit kütleye (M_d) gelmiş kabul edilir. Daha sonra suya daldırılan numuneler 48 saat bekletilir ve ilk tartım alınır. Birbirini izleyen 24 saat aralıklarda kütle tartımları yapılır ve ağırlığın %0,1’i aşmadığı durumda numune sabit kütleye (M_s) gelmiş kabul edilir.

$$A_b = \frac{M_s - M_d}{M_d} 100 \quad [3.14]$$

- A_b : Su emme (%)
 M_d : Kuru kütle (gr)
 M_s : Doymuş kütle (gr)

Çalışma bölgesindeki numuneler üzerinde standartlara uygun olarak yapılan su emme katsayısı deney sonuçları Çizelge 3.22’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.22 Numunelerin su emme katsayısı değerleri.

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

3.2.3.4 Kılcal su emme katsayısı belirleme deney sonuçları

Kayaçlarda kılcal su emme katsayısı (C) tayini deneyi TS EN 1925 standardına göre yapılır. 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 kütleyle (M_d) gelmiş kabul edilir. Daha sonra numune alt yüzeyinden itibaren 3 mm yükseklikte suya daldırılır. Kayaçların su emmiş kütleleri (M_i); 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.

$$C = \frac{M_i - M_d}{A \sqrt{t_i}} \quad [3.15]$$

- C : Kılcal su emme katsayısı ($\text{gr}/\text{m}^2\text{sn}^{0,5}$)
M_d : Kuru kütle (gr)
M_i : Numunenin su emmiş durumdaki kütlesi (gr)
A : Suyu batırılmış yüzeyin alanı (m²)
t_i : Deney başlangıcından ardışık M_i kütlelerinin ölçüldüğü süreler (sn)

Çalışma bölgesindeki numuneler üzerinde standartlara uygun olarak yapılan su emme katsayısı deney sonuçları Çizelge 3.23'de verildiği gibidir.

Çizelge 3.23 Numunelerin kılcal su emme katsayıları.

Numune No	1590	1560	K2E	K2B
Kcs Katsayısı	0,69	0,66	0,56	0,23

3.2.3.5 Ultrasonik hız deneyi sonuçları

Akustiğin 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 (Babacan vd, 2012).

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 (ASTM, 2005).

Ultrasonik hız deneyinde, uzunluğu belli olan kayaç numunesine gönderilen ultrasonik hız dalgalarının numunenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülüp P ve S dalgaları hesaplanabilir. Verici jeofondan üretilen elektriksel sinyal mekanik titreşime dönüştürülerek kayaç numunesine gönderilir, numune içinden geçen sinyal karşı taraftaki alıcı tarafından kaydedilir. Hız ölçümü yapılırken, alıcı ve verici başlıklar ile numune arasına bir jel sürülmesi ve numune ile alıcı-verici başlıklara belli bir kuvvet uygulanarak başlıkların numuneye iyice temas ettirilmesi çok önemlidir. Böylece doğru bir şekilde kayaç numunesi içindeki yayılım süresinden hız belirlenir. Ultrasonik test cihazı ve ölçümde kullanılan numuneler Şekil 3.61’de verilmiştir.

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad [3.16]$$

$$V_s = \frac{L}{T_s} \quad [3.17]$$

- V_p : P-dalgasının yayılma hızı (m/s)
 V_s : S-dalgasının yayılma hızı (m/s)
 L : Numunenin boyu (sinyalin kat ettiği mesafe, m)



Şekil 3.61 Ultrasonik test cihazı ve ölçümde kullanılan numuneler.

Ultrasonik hız deneyleri 5x5 cm'lik 24 adet karot numunesi üzerinde gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 3.24'de verilmiştir.

Çizelge 3.24 Numunelerin P ve S dalga hızları.

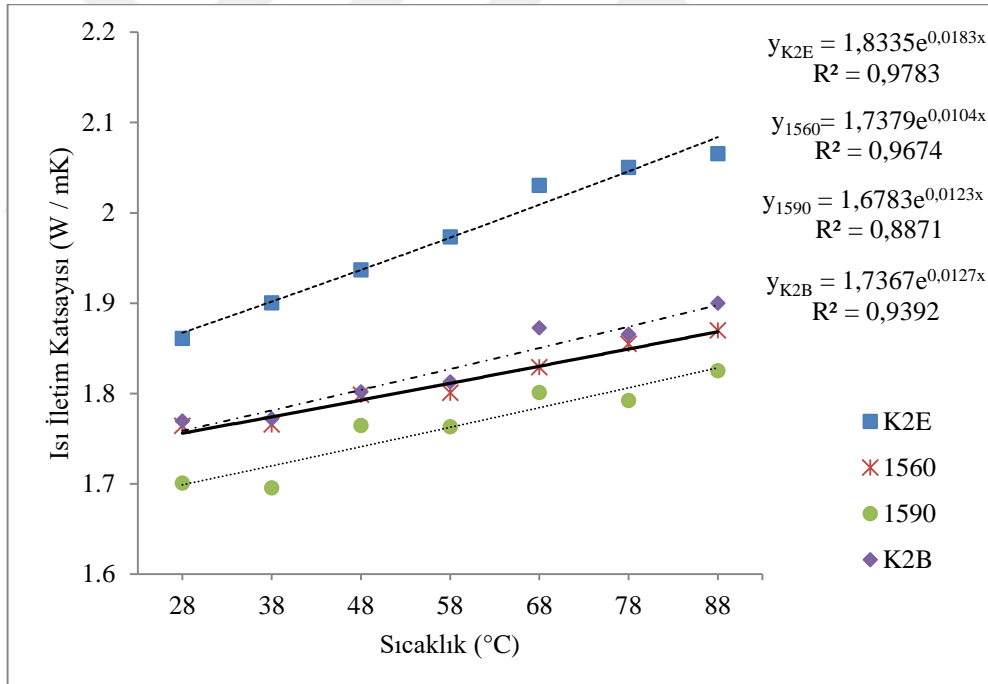
Numune	V_p (m/sn)	V_s (m/sn)
K2B	6720	6493
K2E	7069	6846
1590	6878	6341
1560	6962	6764

4. ARAZİ VE LABORATUVAR SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde K2B, K2E, 1590 ve 1560 lokasyonlarında yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen ısı iletim katsayısı ölçümleri arasındaki ilişkiler; Bölüm.2’de verilen literatür göz önüne alınarak ve laboratuvarında gerçekleştirilen ve ısı iletim katsayısı üzerinde etkisi olduğu düşünülen mineralojik ve kimyasal analizlerden, yoğunluk ve gözeneklilik, su emme, kılcal su emme ve ultrasonik hız deneylerinden elde edilen kayaca özgü özellikler ve sıcaklık açısından incelenecektir.

4.1 Sıcaklığa Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi

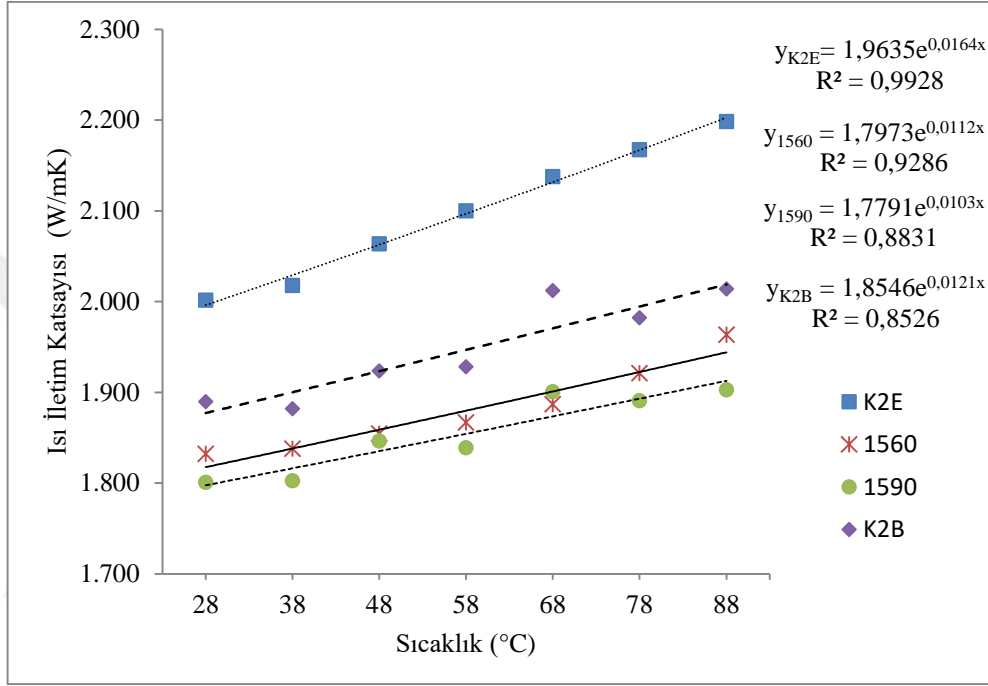
Kayaçların ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimini görebilmek amacı ile; kuru, nemli ve suya doymun haldeki numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deney sonuçları, kayaçların ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak arttığını göstermektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Kuru numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi.

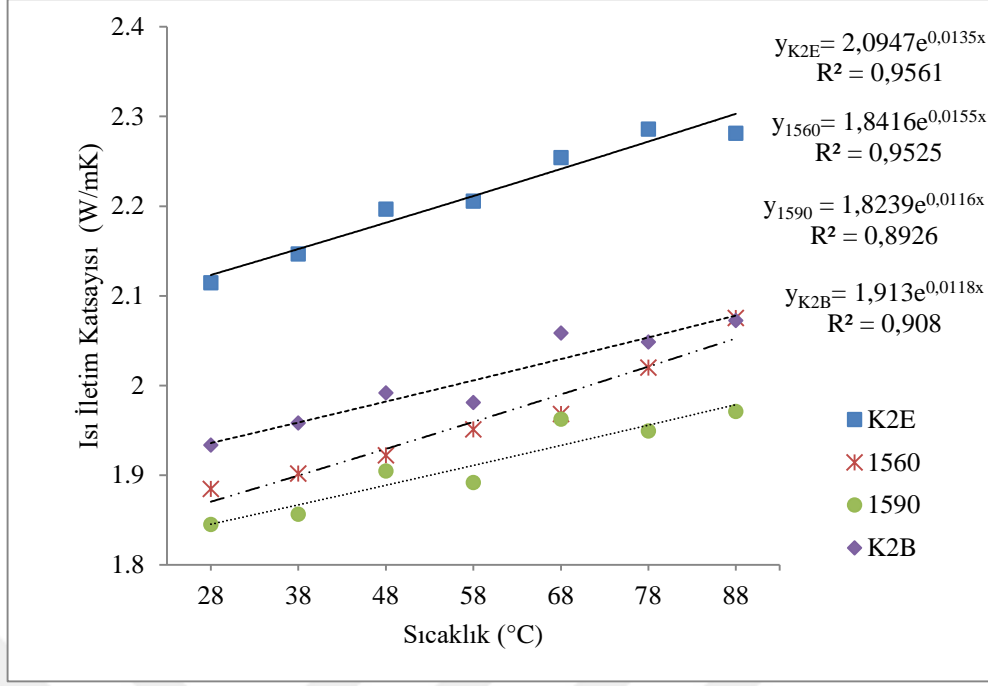
Grafikten de görüleceği üzere; belirleme katsayısı en yüksek olan numuneler K2E bölgesine en az olan numuneler ise 1590 Ana Yola ait numuneler olup bütün numunelerde sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayıları %6 ile %12 arasında bir oranda artmaktadır.

Şekil 4.2’de; kayaç numunelerinin, sıcaklığı 24-30°C ve nem oranı %30-50 olan ortam şartlarında bekletilmesi ve daha sonra ısı iletim katsayılarının ölçülmesi sonucu elde edilen katsayı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Belirleme katsayısı en yüksek olan numuneler K2E bölgesine en az olanlar ise K2B bölgesine ait olan numunelerdir. Sonuç olarak bütün numunelerde, sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayılarının %6 ile %12 arasında değişen bir oranda arttığı görülmektedir.



Şekil 4.2 Nemli numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi.

24 saat su içinde bekletilerek suya doymun hale getirilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ısı iletim katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 4.3’de verilmiştir. Belirleme katsayısı en yüksek olan numuneler K2E bölgesine en az olanlar ise 1590 bölgesine ait olan numunelerdir. Sonuç olarak bütün numunelerde, sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayıları %5 ile %10 arasında değişen bir oranda artmaktadır.



Şekil 4.3 Suya doymun numunelerde sıcaklık-ısı iletim katsayısı değişimi.

Şekillerden de görüleceği üzere; nemli numunelerin ısı iletim katsayıları kuru numunelere göre daha yüksektir. Suya doymun numunelerin ise ortam koşullarında bekletilen numunelere göre ısı iletim katsayıları daha yüksek çıkmıştır. Bu yükselmenin nedeni, açık gözenekleri hava (0,024 W/mK) ile dolu olan kayaçların gözeneklerinin havadan daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olan su (0,58 W/mK) ile dolmasıdır.

4.2 Mineralojik ve Kimyasal Özelliklerin Isı İletim Katsayısına Etkileri

Köken olarak ortak kayaçlarda bile, yapıda bulunan farklı mineraller ölçümler sonucunda farklı ısı iletim katsayısı değerleri verirler. Kayaçtaki minerallerin nokta sayma yöntemi ile sayımının geometrik ortalaması ile bulunabilen hakim mineraller kayaç için bir ısıl iletkenlik tahmini sağlayabilir.

Yerinden alınan K2B, K2E, 1590 ve 1560 numunelerinde çok da farklı olmayan mineral kompozisyonuna ve kimyasal içeriğe rastlanmıştır. Mineral bileşimi açısından; K2B lokasyonu kalsit, dolomit ve eser miktarda amfibol grubu minerallerden, K2E, 1590 ve 1560 lokasyonları ise epidot, kalsit, feldispat, piroksen, kuvars, titanit, silimanit ve opak minerallerinden oluşmaktadır. Kimyasal analiz sonuçlarına ve yerinde ve laboratuvarında elde edilen ısı iletim katsayılarına ilişkin olarak verilen özet çizelgeden de (Çizelge 4.1) görülebileceği gibi lokasyonlarda kimyasal içerik açısından ağırlıklı olarak CaO ve SiO₂ yer almaktadır.

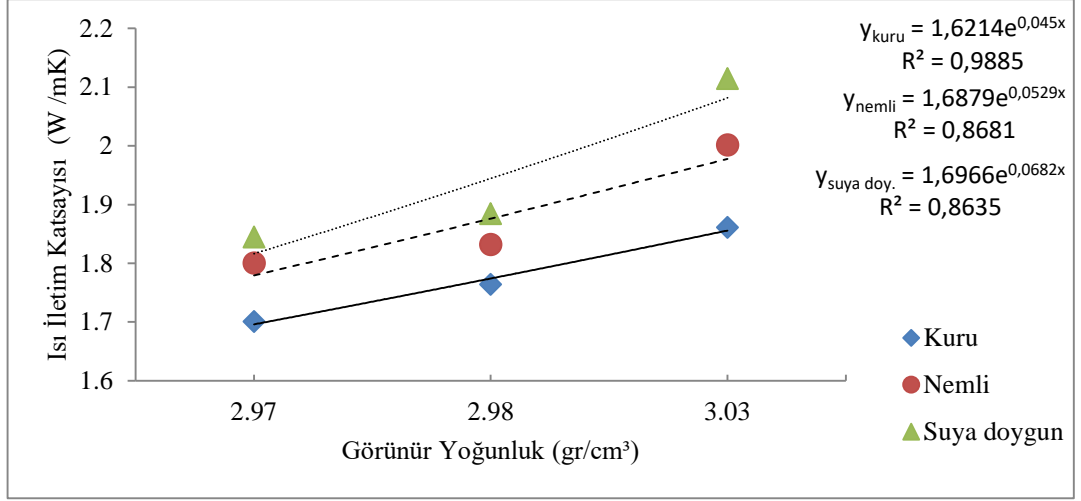
Çizelge 4.1 Mineralojik ve kimyasal analiz-ısı iletim katsayısı özeti.

	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
Isı iletim katsayısı (Ortalama/Yerinde 40°C)	3,148 (3,260)	3,319 (3,297)	3,564 (3,309)	3,509 (3,818)
Isı iletim katsayısı (Ortalama/Laboratuvar 38°C)	1,947 (1,882)	2,098 (2,018)	1,855 (1,803)	1,880 (1,838)

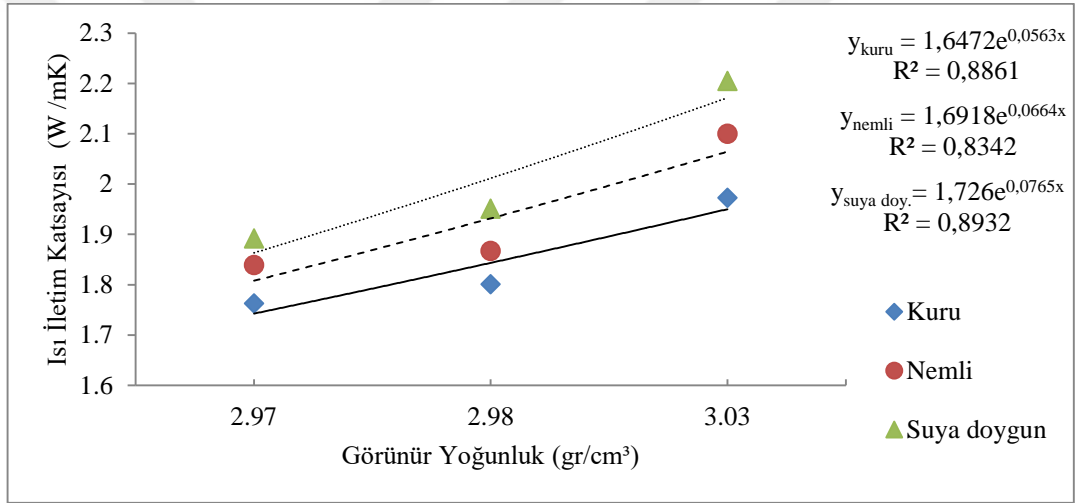
Bu çalışma kapsamında; çalışma bölgesindeki kayaçları temsil eden kalsilikatik gnays ve mermerlerin kimyasal ve mineralojik analizlerinden elde edilen verilerin söz konusu kayaçların ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

4.3 Yoğunluk ve Gözenekliliğe Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi

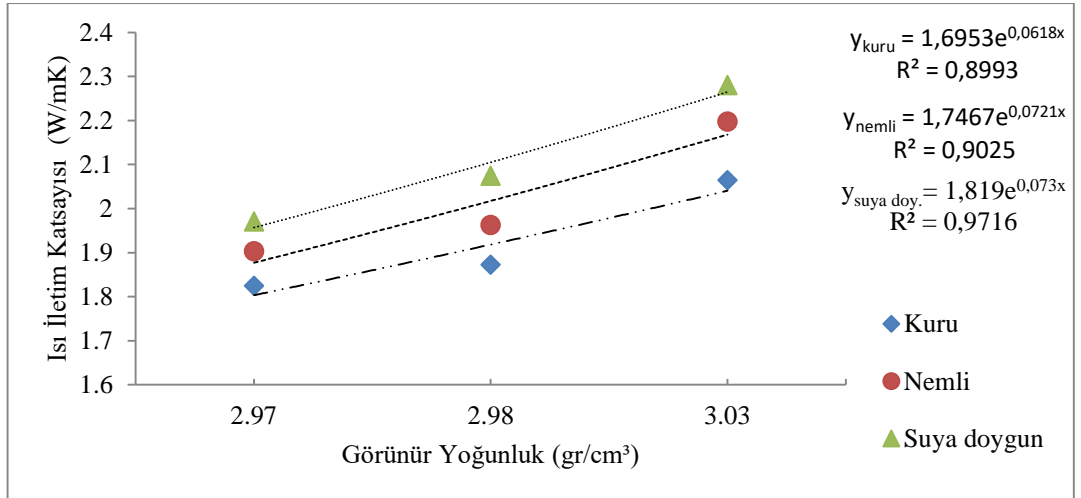
Yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi aracılığıyla elde edilen görünür yoğunluk, gerçek yoğunluk ve açık gözeneklilik değerleri laboratuvarında kuru, nemli ve suya doygun numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı sıcaklık değerlerinde (30°C, 60°C ve 90°C) gerçekleştirilen bu karşılaştırma sonucunda elde edilen sonuçlar grafikler halinde aşağıda verilmiştir (Şekil 4.4-4.12).



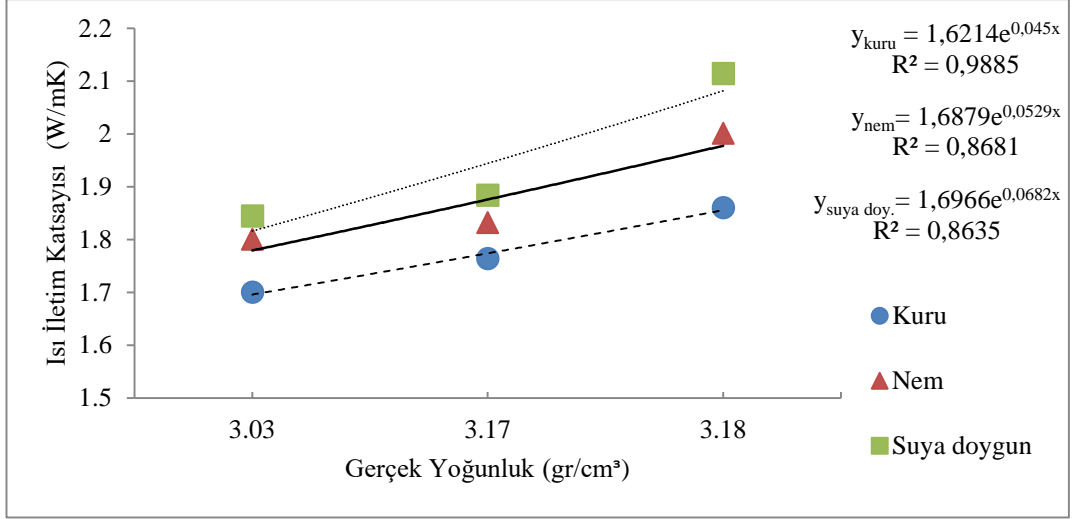
Şekil 4.4 Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C’de).



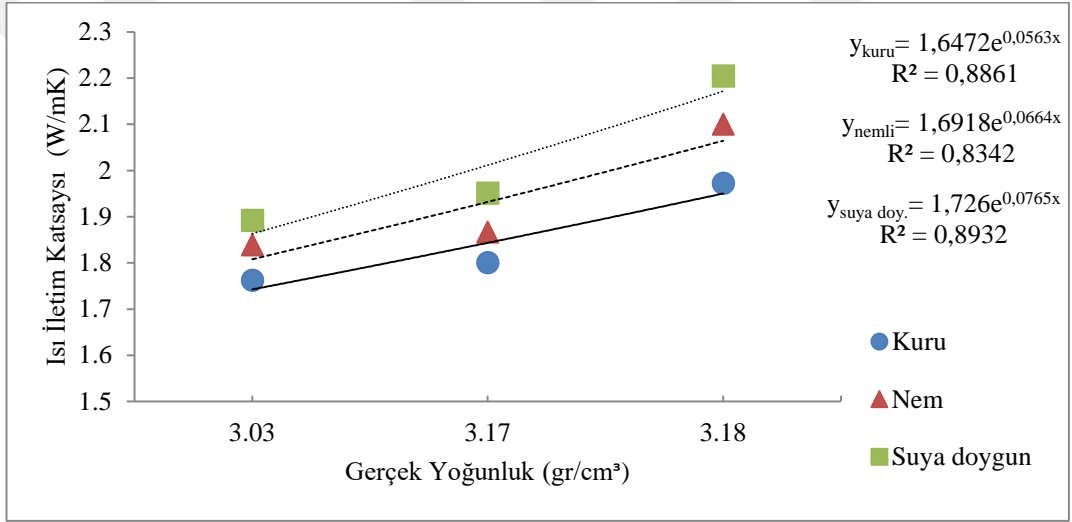
Şekil 4.5 Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C’de).



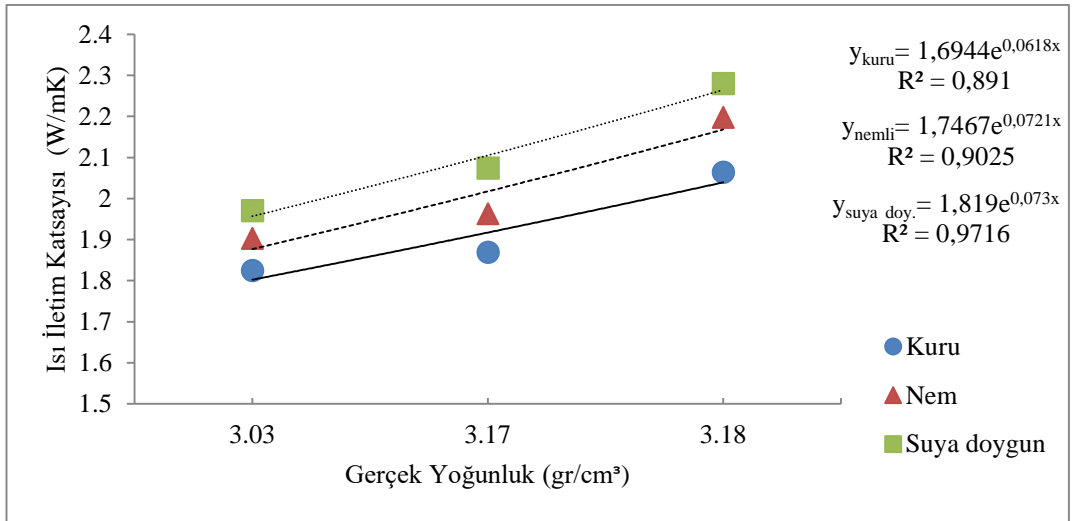
Şekil 4.6 Görünür yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C’de).



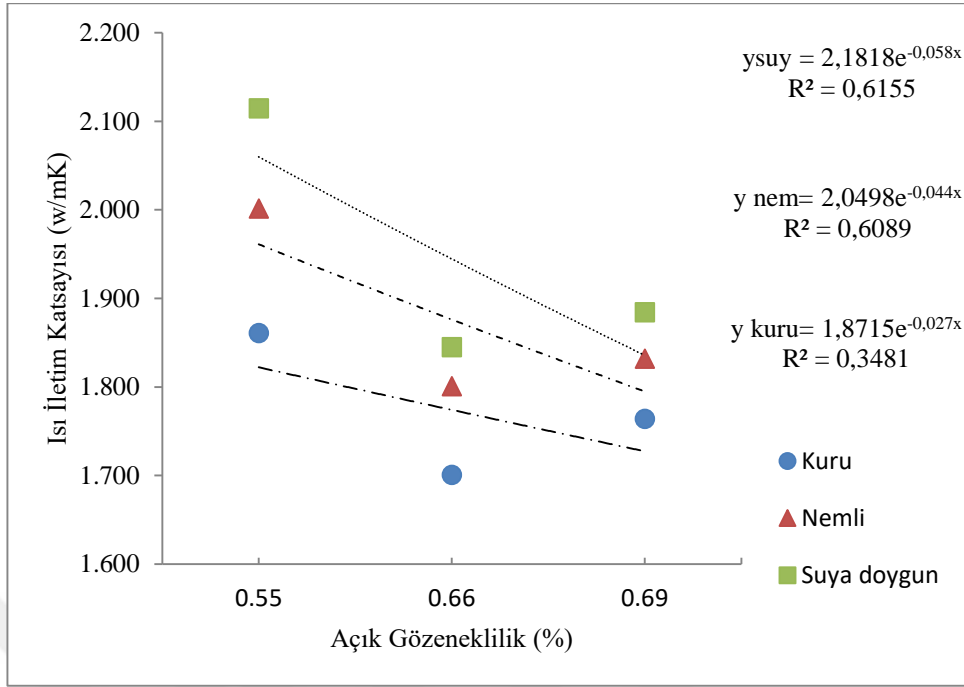
Şekil 4.7 Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de).



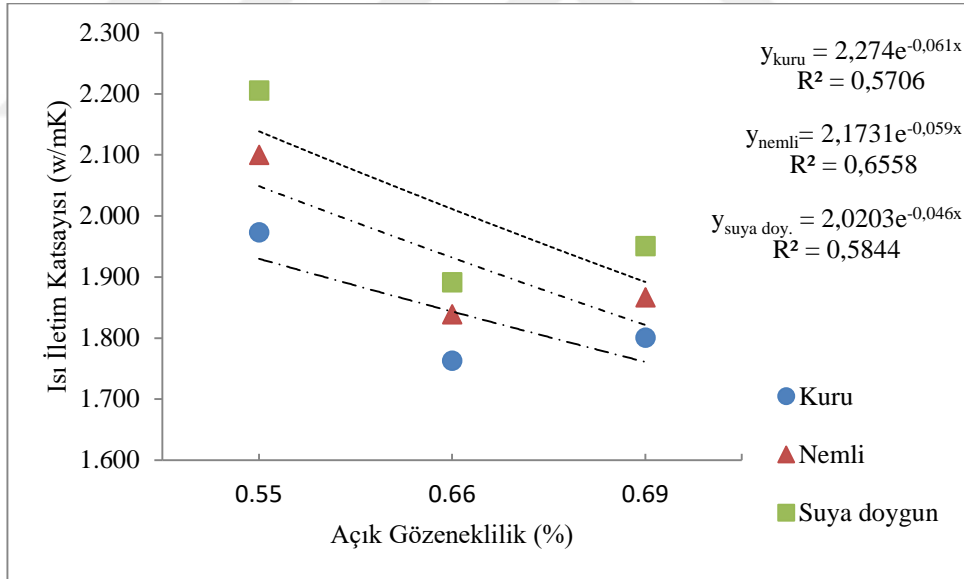
Şekil 4.8 Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de).



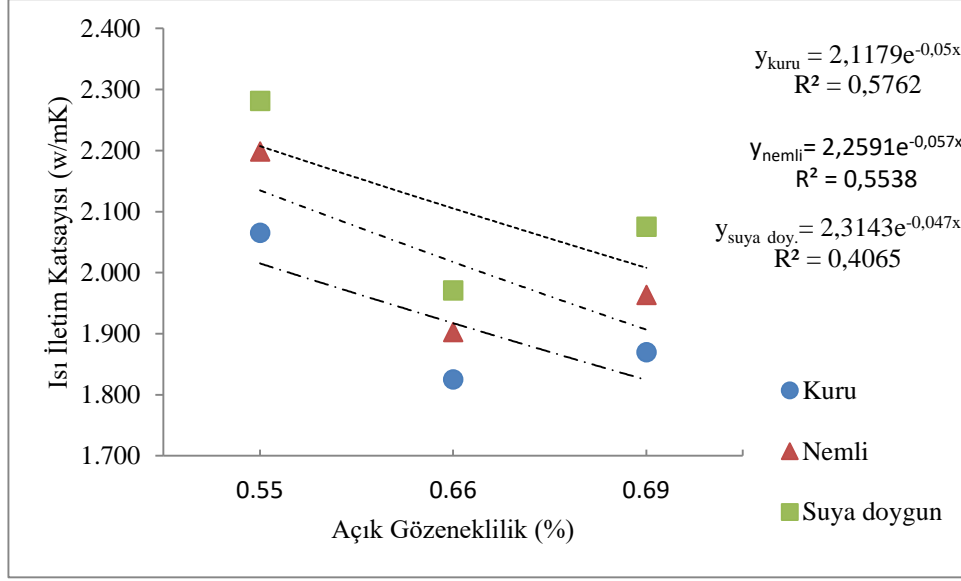
Şekil 4.9 Gerçek yoğunluk-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de).



Şekil 4.10 Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C’de).



Şekil 4.11 Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C’de).

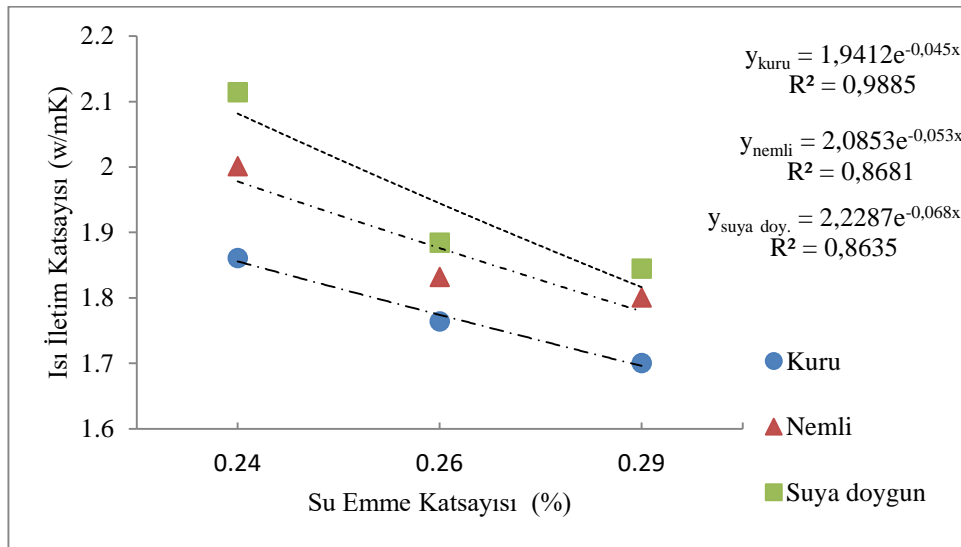


Şekil 4.12 Açık gözeneklilik-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de).

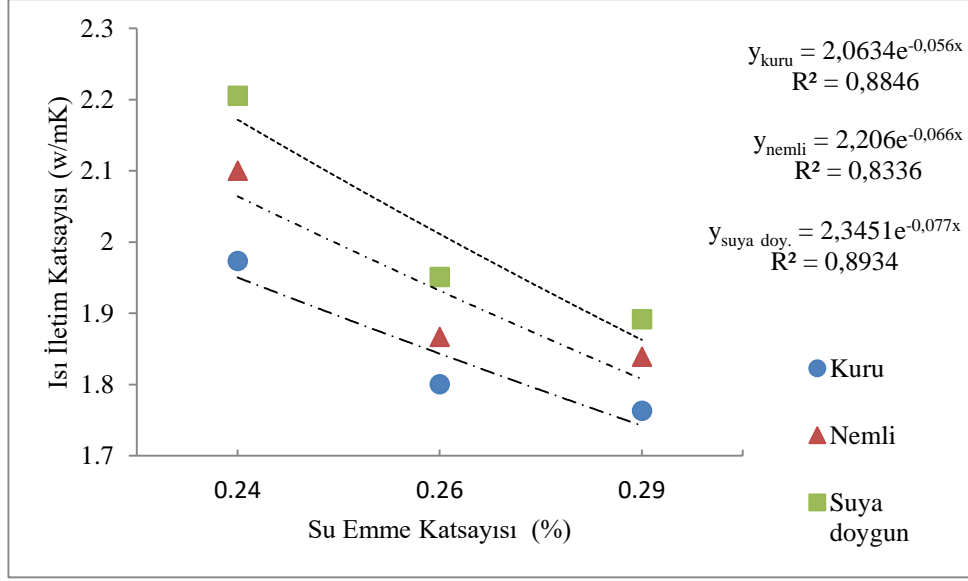
Grafiklerden de görüleceği üzere; görünür yoğunluk ve gerçek yoğunluk değerleri arttıkça ısı iletim katsayısı artmakta açık gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.

4.4 Su Emme ve Isı İletim Katsayıları Arasındaki İlişkiler

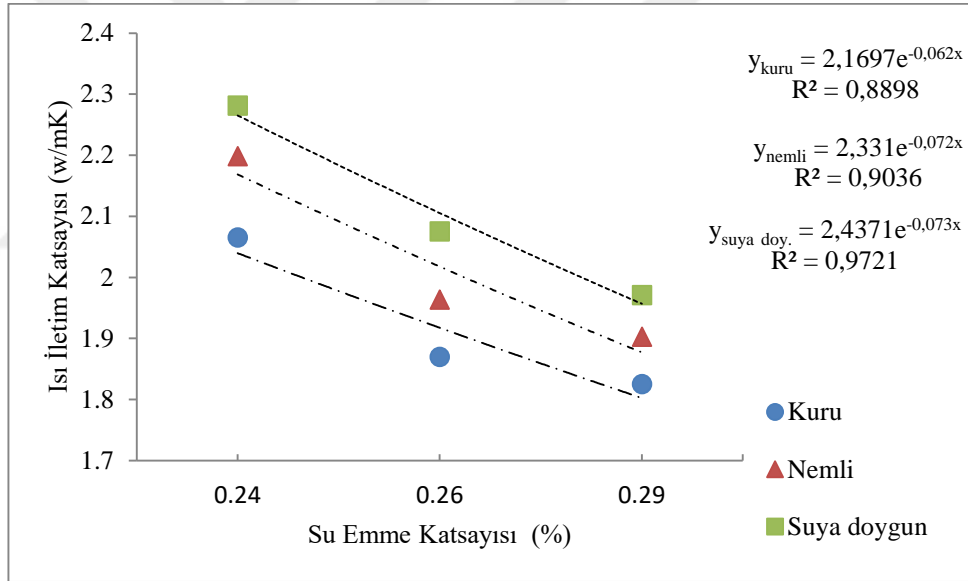
K2E, 1590 ve 1560 bölgelerinden alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen su emme katsayısı belirleme deneyinden elde edilen veriler 30°C, 60°C ve 90°C'deki ısı iletim katsayısı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'de verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere su emme katsayısı arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.



Şekil 4.13 Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C'de).



Şekil 4.14 Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C'de).

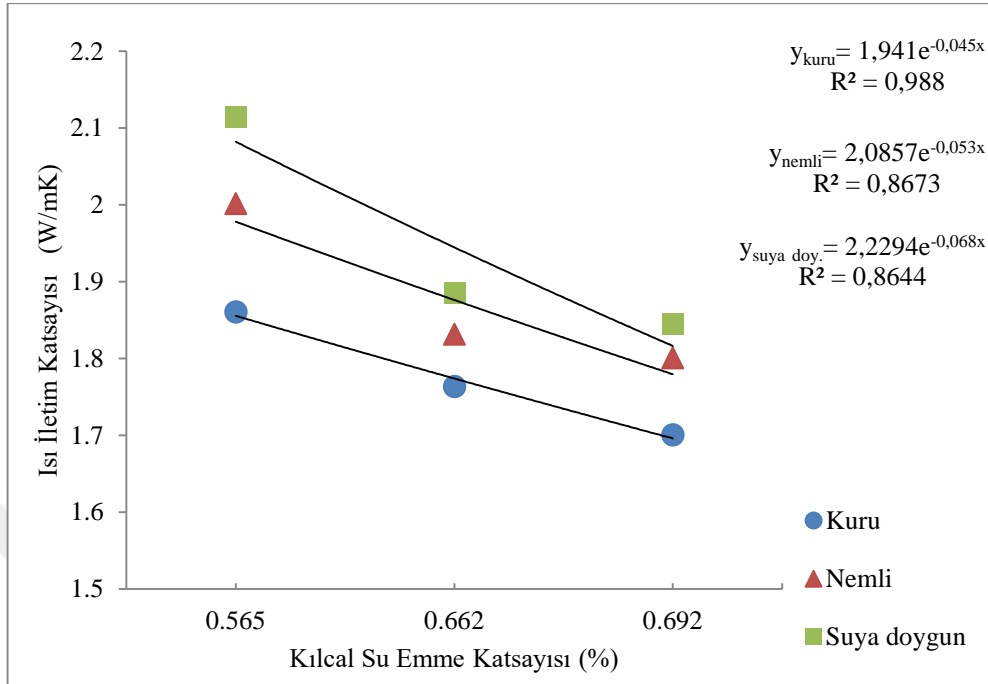


Şekil 4.15 Su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C'de).

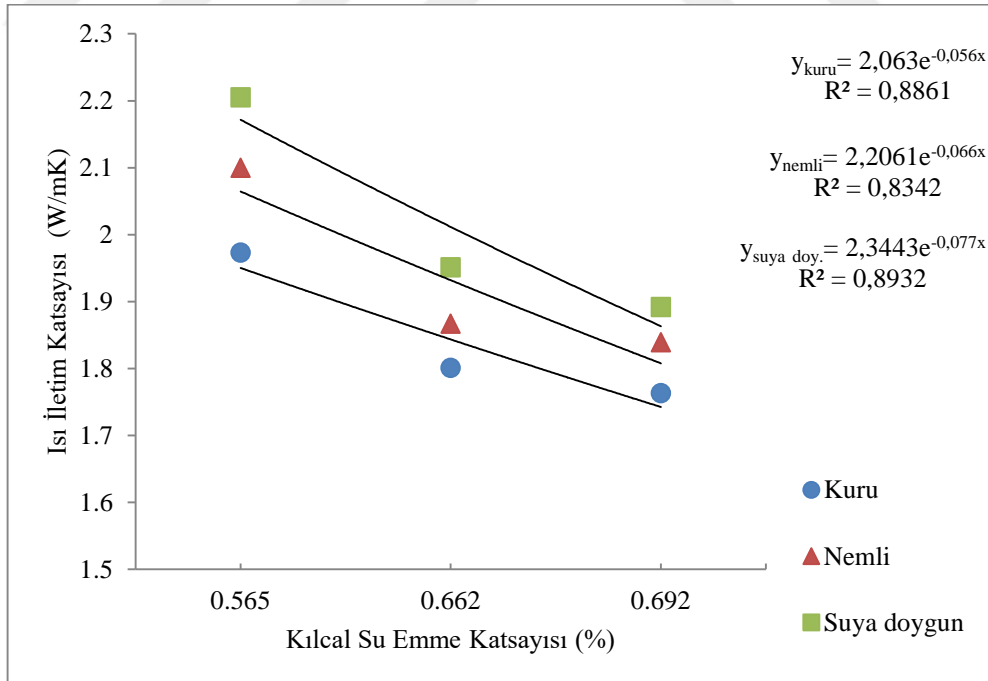
4.5 Kılcal Su Emme ve Isı İletim Katsayıları Arasındaki İlişkiler

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 lokasyonlarından alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kılcal su emme katsayıları ile laboratuvar ortamında 30°C, 60°C ve 90°C sıcaklıklarda elde edilen ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiler Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de verilmiştir.

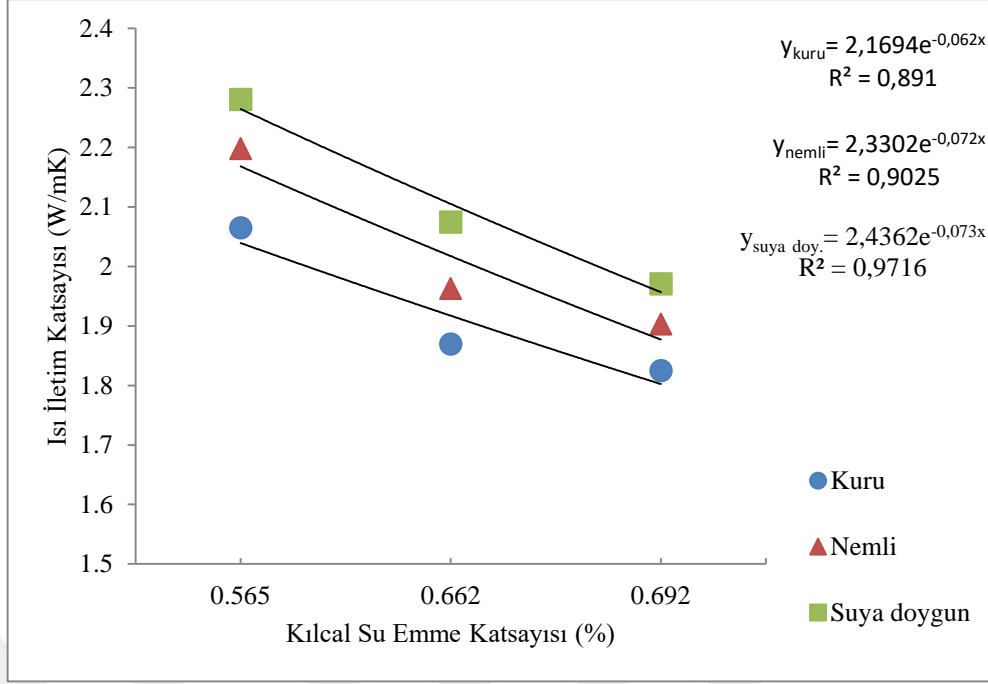
Grafiklerden de görüleceği üzere kılcal su emme katsayısı arttıkça ısı iletim katsayısı azalmaktadır.



Şekil 4.16 Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C).



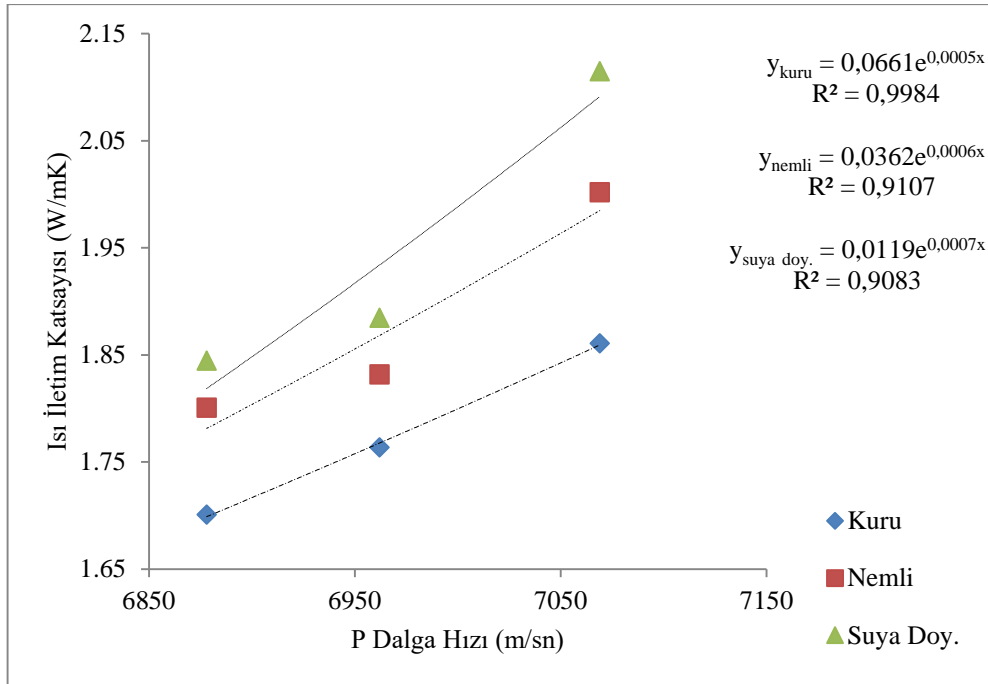
Şekil 4.17 Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C).



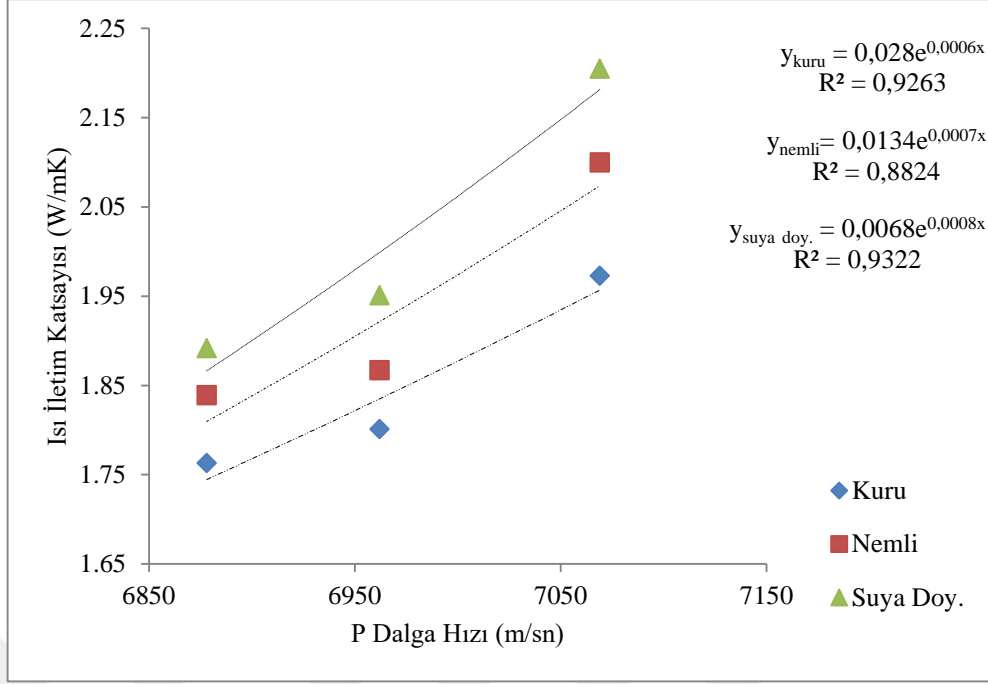
Şekil 4.18 Kılcal su emme katsayısı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C).

4.6 P Dalga Hızına Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Değişimi

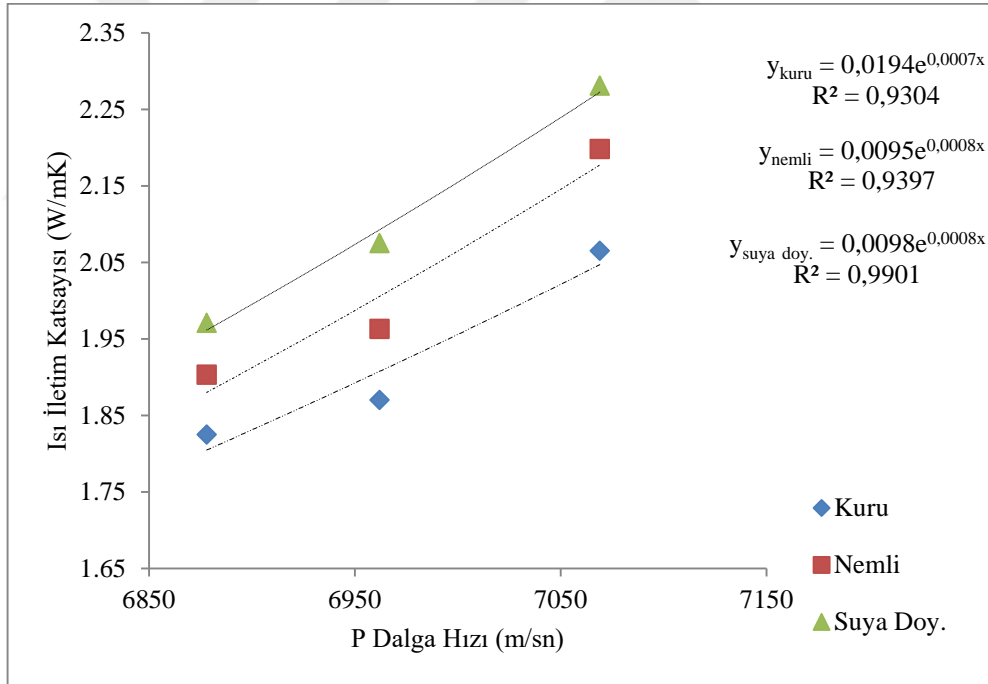
Ultrasonik hız deneyleri sonucu elde edilen P-dalga hızları ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiler Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilmiş olup P-dalga hızı arttıkça ısı iletim katsayısı da artmaktadır.



Şekil 4.19 P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (30°C).



Şekil 4.20 P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (60°C).



Şekil 4.21 P dalga hızı-ısı iletim katsayısı değişimi (90°C).

4.7 Kayaçların Yerinde ve Laboratuvarda Ölçülen Isı İletim Katsayıları Arasındaki Farklılıklar

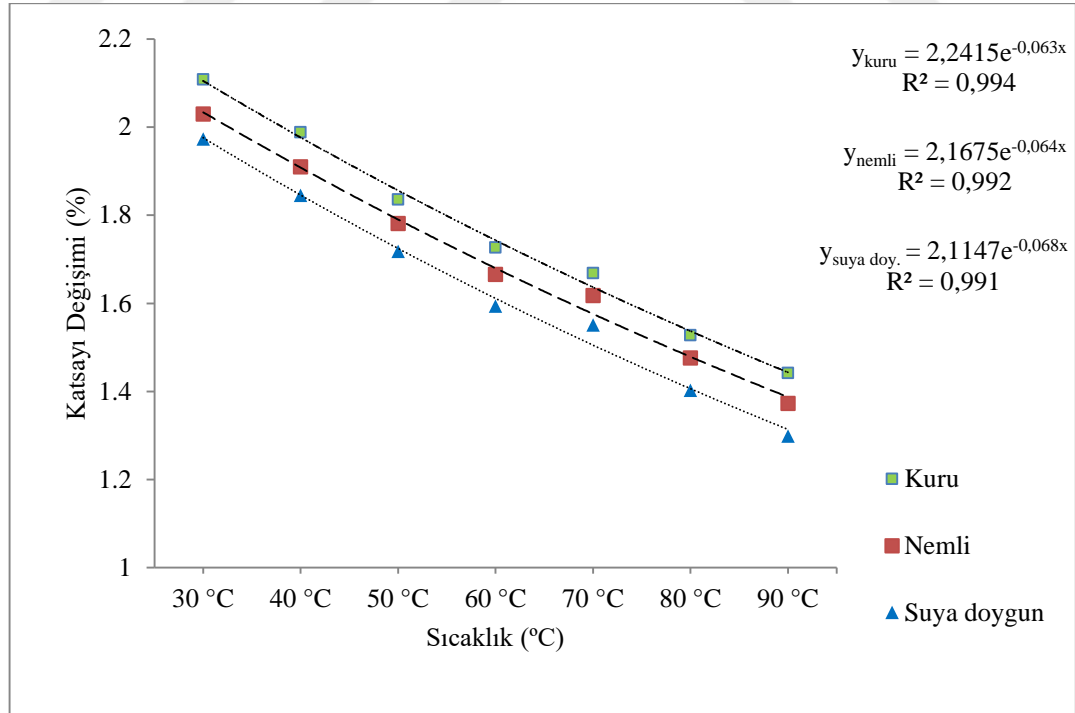
Kayaçların yerinde ölçülen ısı iletim katsayısının laboratuvarda ölçülen değerlere göre nasıl değiştiğinin belirlenmesi için öncelikli olarak yerinde ölçülen değerlerin laboratuvarda ölçülen değerlere oranları belirlenmiş ve “YLO” simgesi ile gösterilen

bu oransal değişimler bölgeler bazında Çizelge 4.2’de, oransal değişime yönelik grafikler ise kuru, nemli ve suya doygun koşullarda olmak üzere bölgeler bazında Şekil 4.22-4.25 arasında verilmiştir.

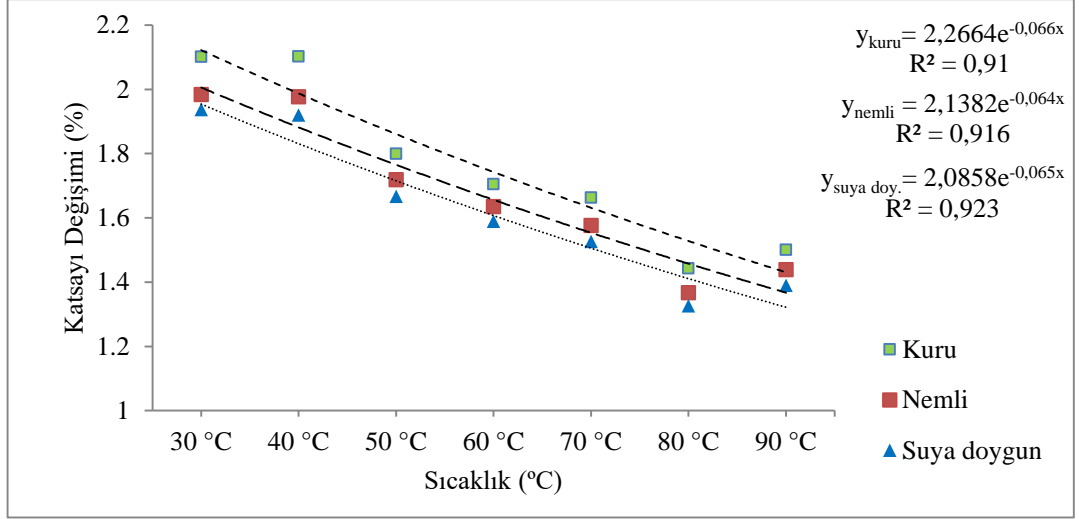
$$YLO = \frac{\text{Yerinde ölçülen ısı iletim katsayısı}}{\text{Laboratuvarında ölçülen ısı iletim katsayısı}} \quad [4.1]$$

Çizelge 4.2 Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar (YLO).

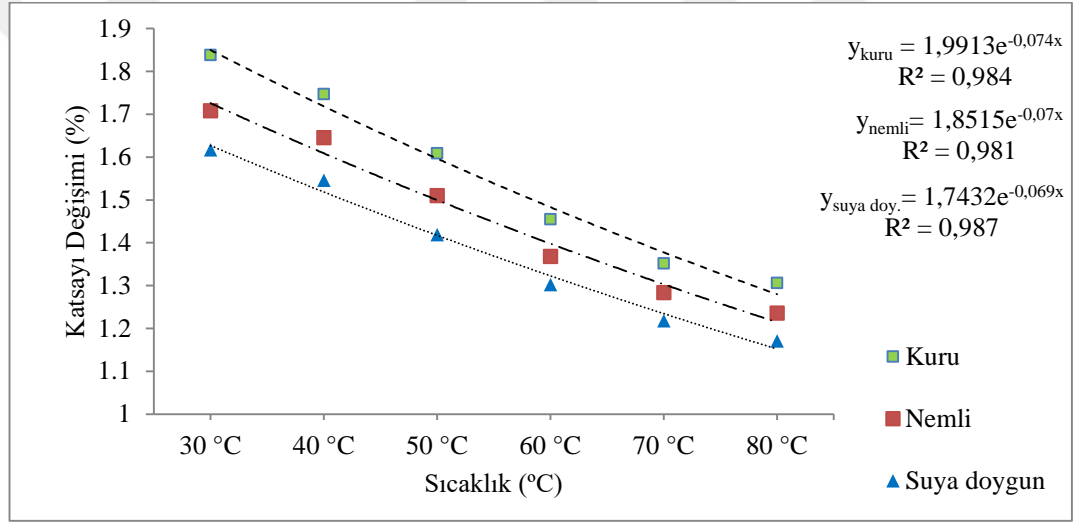
		30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
K2B	Suya doygun	1,711	1,608	1,249	1,268	–	–	–
	Nemli	1,751	1,673	1,293	1,302	–	–	–
	Kuru	1,870	1,777	1,381	1,385	–	–	–
K2E	Suya doygun	1,617	1,546	1,419	1,302	1,218	1,171	–
	Nemli	1,708	1,645	1,510	1,368	1,284	1,236	–
	Kuru	1,838	1,747	1,609	1,455	1,352	1,306	–
1590	Suya doygun	1,937	1,920	1,667	1,589	1,526	1,326	1,390
	Nemli	1,984	1,977	1,719	1,635	1,576	1,367	1,439
	Kuru	2,101	2,102	1,799	1,705	1,663	1,443	1,501
1560	Suya doygun	1,973	1,845	1,718	1,594	1,551	1,403	1,299
	Nemli	2,030	1,910	1,781	1,666	1,618	1,476	1,373
	Kuru	2,108	1,988	1,836	1,727	1,669	1,528	1,442



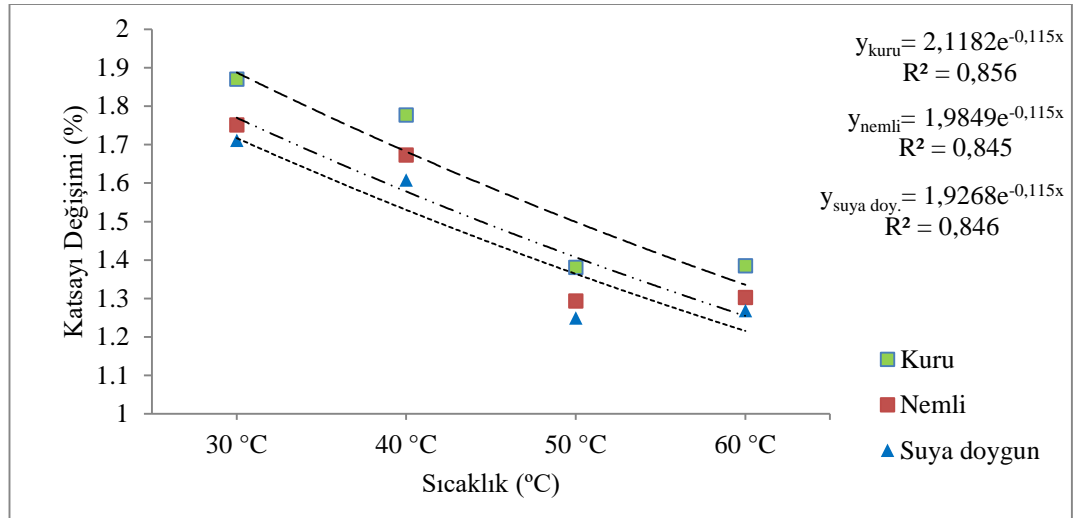
Şekil 4.22 Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (1560).



Şekil 4.23 Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (1590).



Şekil 4.24 Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (K2E).



Şekil 4.25 Yerinde ve laboratuvar ölçümleri arasındaki oransal değişim (K2B).

Grafiklerden de görüleceği üzere; oransal değişimin en yüksek olduğu numuneler kuru halde olan numuneler olup suya doymun numunelerde en düşük değerdedir ve sıcaklık artışına bağlı olarak yerinde ölçümlerin laboratuvar ölçümlerine oranı sayısal olarak azalmaktadır. Diğer bir ifadeyle yerinde ısı iletim katsayısı ile laboratuvar da ölçülen ısı iletim katsayısı arasındaki fark azalmaktadır. Ancak aradaki farkın tamamen ortadan kalkması ve yerinde ölçümlerle laboratuvar ölçümlerinin dengelenmesi hususu ortam koşulları nedeniyle mümkün olmayacak eğri bir süre sonra yataya yakın bir seyir izleyecektir.

Numunelerin kuru, nemli ve suya doymun olma durumlarına göre; yerinde ölçümlerden elde edilen ısı iletim katsayıları laboratuvar ölçümleri sonucu bulunan değerlerden 1,546-2,102 kat daha fazladır. En küçük fark laboratuvar da suya doymun numune üzerinde oluşurken en büyük fark kuru numune üzerinde oluşmuştur.

4.8 Kayaçların Yerinde ve Laboratuvar da Ölçülen Isı İletim Katsayıları Arasındaki Farklılıkların Nedenleri Üzerine Bir Analiz

Kayaçların yerinde ölçülen ısı iletim katsayısı ile laboratuvar da ölçülen ısı iletim katsayısı arasında, literatürde ve bu tez kapsamında yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesinden de görüleceği üzere farklılıkların olabileceği hususu açıktır. Bu farklılığı en belirgin şekilde vurgulayan araştırmacılar; Hiramatsu vd. (1980), Innaurato ve Occella (1989) ve Mousset-Jones ve McPherson (1986)'dır. Hiramatsu vd. (1980) çevre kayaçlardan ocak havasına yayılan ısı miktarının teorik olarak hesaplanan ısı miktarından yaklaşık dört kat, Innaurato ve Occella (1989) yerinde ısı iletim katsayısı değerlerinin laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerden genelde daha yüksek ve Mousset-Jones ve McPherson (1986) ise yerinde ölçülen ısı özelliklerine ait değerlerin laboratuvar da belirlenen değerlerden gözle görülür şekilde farklı ve hatta yaklaşık olarak iki katı kadar olabileceğini vurgulamışlardır.

Kayaçların ısı iletim katsayısını etkileyen ve söz konusu farkın oluşumuna katkıda bulunan oldukça fazla sayıda değişken söz konusudur. Bu değişkenler; farklı araştırmacılar tarafından değişik şekillerde ifade edilmiştir.

Robertson ve Peck (1974), 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. Messmer (1965) ve Desai vd.'ne (1974) göre, gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısı değeri azalmaktadır. Kuriyagawa vd. (1983), sıcaklıkla ısı iletkenliğinin değişiminin kayaç tipine bağlı olduğunu ve buna bağlı olarak kayaçları; ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak artan, değişmeyen azalan kayaçlar olmak üzere 3 grup olarak sınıflandırmışlardır. Brigaud ve Vasseur (1989) sedimanter kayaçların ısı iletkenlikleri üzerinde mineraloji, porozite ve akış kontrolünün etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. Ashworth'a (1992) göre, nem ısı iletim katsayısını yaklaşık olarak iki kat arttırmaktadır. Kukkonen ve Lindberg (1998); ısı iletim katsayısının kuvars içeriğindeki artışla birlikte arttığını, özgül ısı kapasitesi ve yoğunluk artışı ile birlikte azaldığını ifade etmişlerdir. Durutürk (1999, 2002); 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. Demirci vd. (2004); kayaçların ısı iletim katsayısının, gerek tek eksenli gerekse üç eksenli gerilmenin etkisine bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir. Görgülü vd. (2004) ve Görgülü (2004); 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. Giraud vd.'ne (2007) göre; anizotropi, gözeneklilik ve mikro çatlak yapısı ısı iletim katsayısı üzerinde etkili olan parametrelerdir. Görgülü vd. (2008); kayaçların ısı iletim katsayısının eksenel gerilmelere ve nem içeriğine bağlı olarak arttığını belirlemişlerdir. Sundberg vd. (2009); ısı iletim katsayısının kayacın mineral bileşimi ve dokusal koşullarına bağlı olarak değiştiğini, su içeriği ve gözenekliliğin de önemli olduğunu vurgulamışlardır. Abdulagatova vd. (2009); 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 iletkenliklerini belirleyen faktörler olduğunu ifade etmişlerdir. Abdulagatova vd.'ne (2009) göre, kumtaşının ısı iletim katsayısı basınca bağlı olarak artmakta ve sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Cho vd. (2009) gözenekliliğin ve su içeriğinin ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerine yönelik olarak suya doygun numunelerin, kayaç gözeneklerinde bulunan hava ve suyun ısı iletkenlikleri arasında

var olan önemli farklılığın yansımalarının bir sonucu olarak kuru numunelerden daha büyük ısı iletkenlik değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Zhao vd.'ne (2009) 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'ın üzerindeki değerlerde ise ısı iletim katsayısı kısmen sabit kalmaktadır. Abdulagatova vd. (2010); düşük basınç değerlerinde (0,1-100 MPa) yağa doymuş kumtaşının ısı iletim katsayısında keskin bir artış, yüksek basınçlarda ($P > 100$ MPa) ise zayıf bir doğrusal bağımlılık gözlemlenmiştir. Basınç etkisi 100 MPa basınç değerinden sonra ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Yağa doymuş kumtaşının ısı iletkenliği, sıcaklıkla birlikte kuru kumtaşı için olan orandan yaklaşık olarak %20 daha az bir oranda azalmaktadır. Osako vd. (2010), serpantinin ısı kapasitesinin basınçtan bağımsız ancak sıcaklığa bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Kukkonen ve Lindberg (1998, 2011); 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 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. Kwon vd.'ne (2011, 2013) göre, kuru numunelerin ısı iletim katsayısı derinliğe bağlı olarak artmaktadır. Kim vd. (2012); ısı iletim katsayısının elastisite modülü ve P-dalga hızı arttıkça arttığını belirlemişlerdir. Merriman vd. (2013), ısı iletim katsayısının litolojiye bağımlılığının zayıf olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Barry-Macaulay vd. (2013); zemin ve kayaların 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. Eppelbaum vd. (2014); ısı iletim katsayısının materyalin kimyasal bileşimine, fiziksel yapısına, su içeriğine ve sıcaklığına göre değişim gösterdiğini ifade etmişlerdir. Nagaraju ve Roy (2015); etkili gözeneklilikleri %1'den büyük olan kayaların kuru duruma kıyasla suya doymuş koşullarda genellikle daha yüksek ısı iletkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir. Pasquale vd. (2015); kayaların ısı iletim katsayısının yoğunluk artışı ile siyalitik kayalar için azaldığını, ultrabazik kayalar için arttığını ve gözeneklilik artışına bağlı olarak azaldığını ifade etmişlerdir.

Sonuç olarak; yukarıda vurgulanan araştırmacılar tarafından, ısı iletim katsayısına etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirilen parametreleri aşağıda verildiği şekilde özetlemek mümkündür.

i. Tipi	xvi. Kimyasal bileşimi
ii. Mineral bileşimi	xvii. Yoğunluk
iii. Mineral dağılımı	xviii. Birim ağırlık
iv. Kuvars içeriği	xix. Gözeneklilik
v. Matris yapısı	xx. Su içeriği
vi. Dokusal koşulları	xxi. Nem içeriği
vii. Tabakalaşma	xxii. Doyma derecesi
viii. Mikro atlak yapısı	xxiii. Özgül ısı kapasitesi
ix. Tane boyutu ve şekli	xxiv. Sıcaklık
x. Kohezyon	xxv. Anizotropi
xi. Sertlik	xxvi. P-dalga hızı
xii. Derinlik ve basınç	xxvii. Elastisite modülü
xiii. Ortam sıcaklığı ve nem oranı	xxviii. Tek eksenli gerilme
xiv. Dolaylı ekme dayanımı	xxix. Üç eksenli gerilme
xv. Nokta yükü dayanımı	xxx. Darbe dayanımı

Yerinde ölçümlerden elde edilen değerlerin laboratuvar değerlerinden 1,546-2,102 kat daha fazla olması durumunu ve en küçük farkın laboratuvarda suya doygun numune üzerinde en büyük farkın ise kuru numune üzerinde oluşmasını, sadece numunenin nem içeriğindeki artışa bağlı olarak gerçekleşen ısı iletim katsayısı artışı ile açıklamak mümkün değildir. Değişim oranlarında en büyük değerlerin 1560 kotundan alınan numunelerden elde edilmesi ve 1560 kotunun ölçüm bölgeleri içerisinde en derin bölge olması hususu da göz önüne alındığında derinlik nedeniyle oluşabilecek “basınç faktörü”nn etkisi açıkça görülmektedir.

Ayrıca; değerlerden de görüleceği üzere; değişim katsayısının en yüksek elde edildiği bölge en derinde olan 1560 kotundaki çalışma bölgesi en düşük elde edildiği bölge ise en üstte yer alan K2E bölgesidir. Bu durum, basınç ile ısı iletim katsayısı arasında doğrudan bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır. K2B ile K2E aynı derinlikte olan çalışma bölgeleridir ve laboratuvar ölçümlerinde bulunan ısı iletim katsayıları farklı olmasına rağmen, basına bağlı olarak katsayı değişimleri yaklaşık değerlerdedir.

Basınç faktörünün etkisini değerlendirebilmek için yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği derinliklere bağlı olarak düşey gerilmelerin hesaplanması gerekmektedir. Yeraltında BHT lmleri; maden ocağının mostrasından itibaren

sırasıyla (K2B) 157 metre, (K2E) 157 metre, (1590) 185 metre ve (1560) 215 metre derinliklerde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm alanlarında kayaç üzerindeki düşey gerilmeler aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{\rho * h * g}{10^6} \text{ MPa} \quad [4.2]$$

- σ : Düşey gerilme (MPa)
 ρ : Yoğunluk (kg/m³)
 h : Derinlik (m)
 g : Yerçekimi ivmesi (m/sn²)

$$\sigma_{K2B} = \frac{2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 157 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{sn}^2}}{10^6} = 4,312 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{K2E} = \frac{3030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 157 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{sn}^2}}{10^6} = 4,667 \text{ MPa}$$

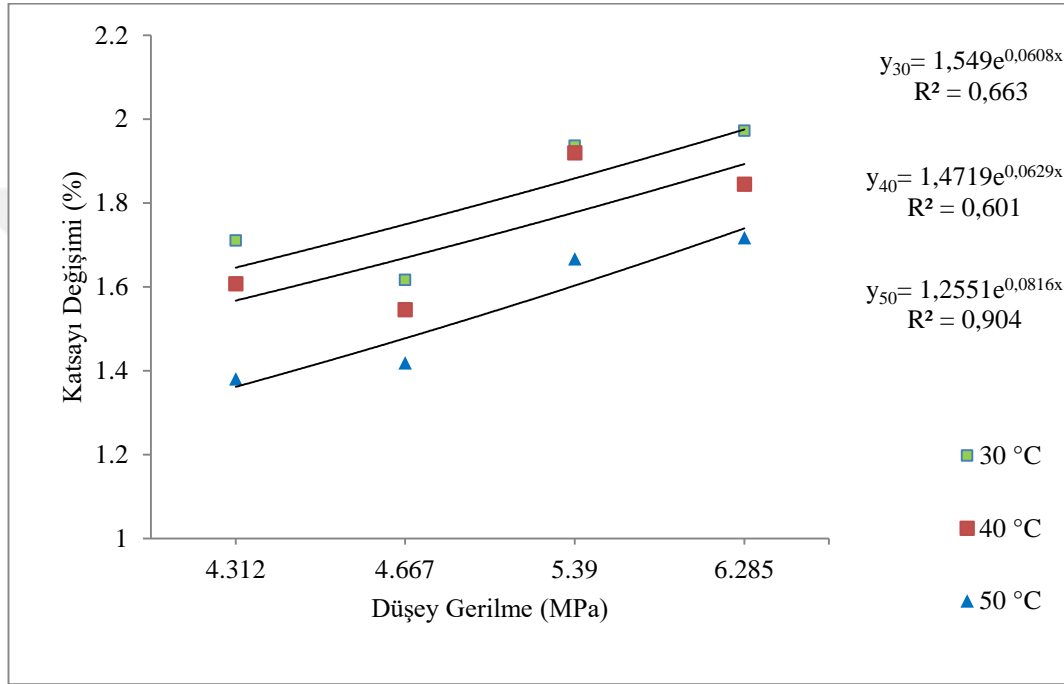
$$\sigma_{1590} = \frac{2970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 185 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{sn}^2}}{10^6} = 5,390 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1560} = \frac{2980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 215 \text{ m} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{sn}^2}}{10^6} = 6,285 \text{ MPa}$$

Basınç faktörünün ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için yerinde ölçümler ile laboratuvar ölçümlerinin karşılaştırılması suya doymun, nemli ve kuru numuneler üzerinde yapılmıştır. Düşey gerilmelere bağlı olarak suya doymun, nemli ve kuru koşullarda numunelerin yerinde hesaplanan ısı iletim katsayılarının laboratuvarda ölçülen ısı iletim katsayılarına oranlarının değişimini incelemek üzere Çizelge 4.2’de toplu halde verilen değerler bölgeler bazına indirgenmiş ve yukarıda hesaplanan gerilme yükleri ilave edilerek Çizelge 4.3-4.5 arasında verilmiştir. Her bir durum için ayrı ayrı çizilen düşey gerilmelere bağlı olarak oransal katsayıların değişimini gösteren grafikler de her bir koşula ilişkin çizelgelerden sonra olmak üzere Şekil 4.26-4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile düşey gerilme ilişkisi (suya doymun).

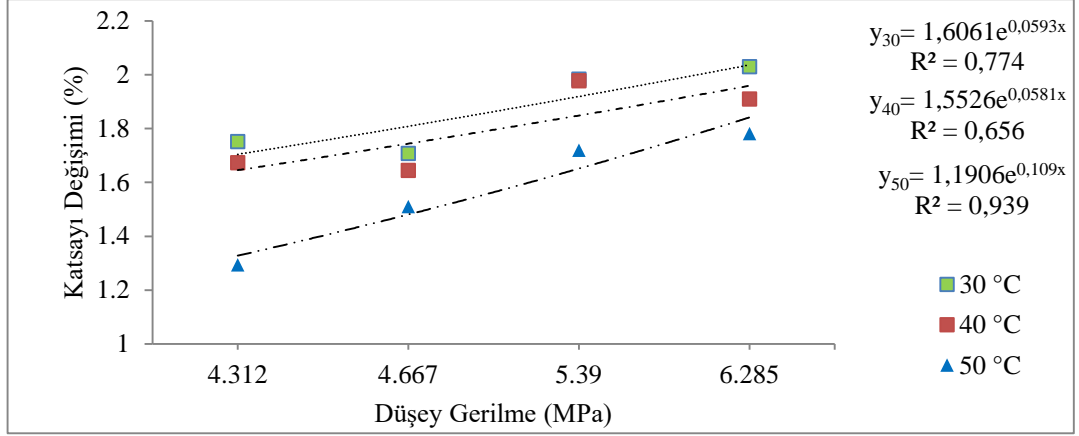
Numune	Sıcaklık			Düşey Gerilme (MPa)
	30 °C	40 °C	50 °C	
K2B	1,711	1,608	1,249	4,312
K2E	1,617	1,546	1,419	4,667
1590	1,937	1,920	1,667	5,390
1560	1,973	1,845	1,718	6,285



Şekil 4.26 Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (suya doymun).

Çizelge 4.4 Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile düşey gerilme ilişkisi (nemli).

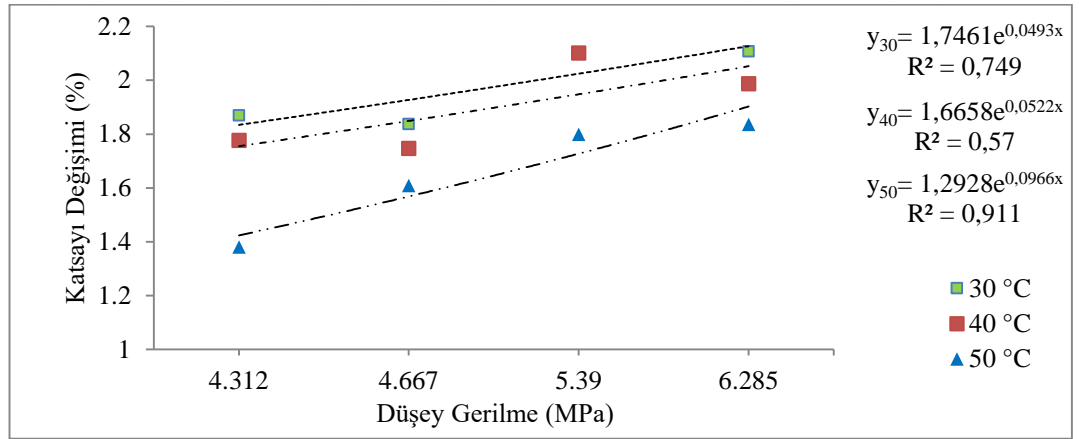
Numune	Sıcaklık			Düşey Gerilme (MPa)
	30 °C	40 °C	50 °C	
K2B	1,751	1,673	1,293	4,312
K2E	1,708	1,645	1,510	4,667
1590	1,984	1,977	1,719	5,390
1560	2,030	1,910	1,781	6,285



Şekil 4.27 Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (nemli).

Çizelge 4.5 Yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki oranlar ile gerilme yükü ilişkisi (kuru).

Numune	Sıcaklık			Düşey Gerilme (MPa)
	30 °C	40 °C	50 °C	
K2B	1,870	1,777	1,381	4,312
K2E	1,838	1,747	1,609	4,667
1590	2,101	2,102	1,799	2,101
1560	2,108	1,988	1,836	2,108



Şekil 4.28 Düşey gerilmeye bağlı olarak oransal katsayıların değişimi (kuru).

Sonuç olarak; arazideki düşey gerilmelere (σ) bağlı olarak, kayaların ısı iletim katsayısı önemli ölçekte ve belirgin bir değişim göstermektedir. Derinliğe bağlı olarak basınç artmakta, basınç artışına bağlı olarak da ısı iletim katsayıları arasındaki fark yükselmektedir. Bu sonuçlara göre en düşük katsayılar suya doymun numuneler üzerinde görülmüştür. Grafiklerde en yüksek güven aralığı 50°C sıcaklık değerlerinde elde edilmiştir.

Düşey gerilmelere bağlı olarak ısı iletim katsayısının değişimi aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$k=k_0 * \lambda * \sigma^n \quad [4.3]$$

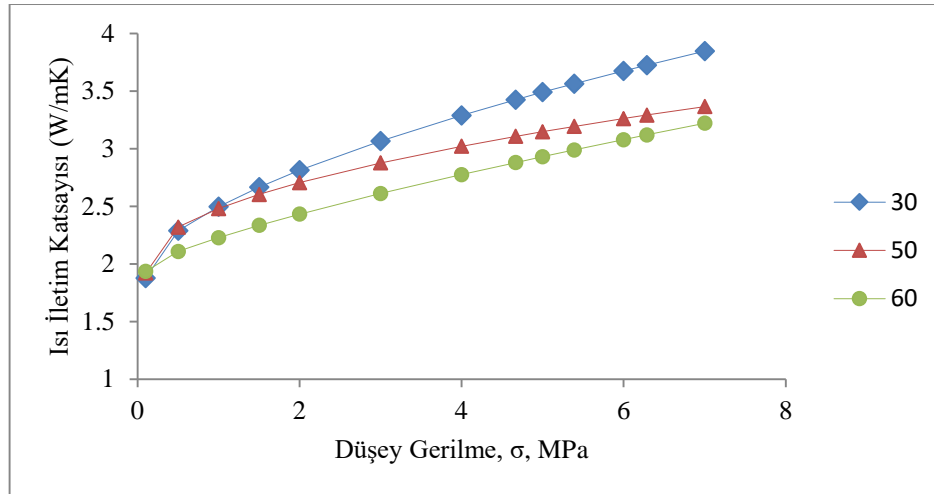
- k : Düşey gerilme altında kayacın ısı iletim katsayısı (W/m²K)
 k_0 : Normal koşullarda kayacın ısı iletim katsayısı (W/m²C)
 λ, n : Düşey gerilme koşullarında kayaca özgü sabitler
 σ : Düşey gerilme (MPa)

Isı iletim katsayısı değerinin gerilmeye bağlı olarak değişimi farklı sıcaklıklarda (30°C–50°C–60°C) aşağıdaki verilen formüller aracılığı ile ifade edilebilir. Formüllerde; 1560, 1590 ve K2E kotunda hesaplanan gerilmeler yerine konulduğunda, LHS yöntemi ile elde edilen ısı iletim katsayısı değerlerine çok yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 4.29).

$$k_{30}=1,878 * 0,687 * \sigma^{0,5948} \quad [4.4]$$

$$k_{50}=1,921 * 0,5594 * \sigma^{0,4876} \quad [4.5]$$

$$k_{60}=1,935 * 0,2936 * \sigma^{0,7587} \quad [4.6]$$



Şekil 4.29 Düşey gerilmeye bağlı olarak ısı iletim katsayısı kestirimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm üretim faaliyetlerinde olduğu gibi madencilik faaliyetlerinde de özellikle son yıllarda yaygın ve yoğun olarak öne sürülen en önemli koşul, emniyetli ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır. Ayrıca dünyada enerji talebinin önümüzdeki 20 yıllık süreçte %35 artacağı göz önüne alındığında diğer enerji kaynaklarının yanı sıra özellikle de gelişmekte olan ülkeler açısından kendi doğal kaynaklarının kullanımının önemi daha da artmaktadır. Enerjideki dışa bağımlılıkların ve cari açığındaki enerji payının azaltılabilmesi ancak ve ancak öz kaynakların verimli ve etkin kullanımının güvenilir koşullarda sağlanması ile mümkündür. Bu husus, ülkelerin kalkınmasındaki iki temel unsurdan biri olan madencilik sektörünü ön plana çıkarmakta ve sektör aracılığıyla ülke öz kaynaklarının güvenilir işletmecilik anlayışıyla değerlendirilmesini bir zorunluluk haline getirmektedir. Buna ek olarak; enerji politikası sadece üretim açısından değerlendirilmemeli, etkin bir enerji depolama politikası ile birlikte düşünülmelidir. Benzer şekilde depolama politikası da yine dar açıdan değil geniş bir perspektiften bakılmak suretiyle tehlikeli atık maddelerin güvenilir depolanabilirliği ile birlikte değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak; enerji gereksiniminin getirdiği arama çalışmaları ile desteklenecek yaygınlaştırılmış bir üretim politikasının çevresel faktörler göz ardı edilmeksizin sürdürülebilirliği ve iş sağlığı ve güvenliği kavramının ortaya çıkardığı güvenilir ve sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması hususlarının birlikte değerlendirilmesi, hem mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanımını hem diğer enerji alternatiflerinin ülke ekonomisine kazandırılmasını hem de bu iki husus gerçekleştirilirken ortaya çıkması muhtemel olan çevresel risklerin ortadan kaldırılmasını sağlayacaktır.

Ülkemizin enerji politikası da yukarıda vurgulanan hususlar kapsamında değerlendirilmelidir. Şöyle ki; 2019 yılına kadar yerli kömür kaynaklı elektrik üretimimizin yıllık 60 milyar kilowatsaate (kWh) çıkarılması hedefi doğrultusunda yüksek kalorili kömür arama faaliyetlerine yönelik olarak 2017 yılı içinde 1 milyon metreye yakın ve ilerleyen yıllarda daha da fazla olması muhtemel sondaj planlamaları ve en az 5 bin megawattlık (MW) yerli kömüre dayalı termik santrallerin

kurulması, kömürün gazlaştırılarak belli ürünlere dönüştürülmesini ve ithal edilen bazı petrokimyasalların yerli kaynaklarla üretilmesini sağlayacak kömür gazlaştırma projeleri, 2023 yılına kadar Mersin Akkuyu, Sinop İnceburun ve henüz yeri belli olmayan 3 nükleer santralin yapımının planlanması vb. hedeflerin gerçekleştirilebilmesinde öne çıkan hususlardan ikisi madencilik faaliyetleri ve nükleer enerjiyi kullanan ülkelerdeki araştırmalar ışığında yüksek seviyeli radyoaktif atıkların uygun jeolojik formasyonlarda güvenilir bir şekilde depolanabileceği alanların belirlenmesidir.

Ülke yeraltı zenginliklerinin ekonomiye kazandırılması hedefinin madencilik sektörüne yüklediği sorumluluk, şu ana kadar açık işletme veya sığ yeraltı işletmeciliği şeklinde yapılan üretim faaliyetlerinin daha derinlerde gerçekleştirilmesi zorunluluğunu da beraberinde getirecektir. Derin yeraltı maden işletmeciliğinde ise ısı, madencilik faaliyetlerinin iş sağlığı ve güvenliğinin gerektirdiği koşullara uygun gerçekleştirilmesini etkileyen ana problemlerden birini oluşturmaktadır. Aynı şekilde gelecekte nükleer santrallerin devreye girmesiyle yüksek seviyeli radyoaktif atıkların depolanması sorunu ile karşı karşıya kalınacaktır. Isı enerjisinin ve nükleer atıkların depolanması ve derinlerde yürütülecek madencilik faaliyetleri kapsamında yürütülecek çalışmalara yön verecek en önemli parametrelerden biri, gerek sızdırmazlık gerekse ısı transferi açısından kaya ortamları ile ilişkili olduğundan dolayı, kayaçların ısı iletim katsayısı olup bu katsayının belirlenmesi gerekmektedir.

Kayaçların ısı iletim katsayısının yerinde ve laboratuvar ortamında belirlenmesi ve ısıl iletkenliği etkileyen parametrelerin ortaya konulabilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

- i. Çalışma bölgesindeki 4 farklı lokasyondaki kayaç örneklerinden alınan ince kesitler üzerinde mineralojik analizler yapılmıştır. K2B lokasyonu Kalsit, Dolomit ve Amfibol grubu minerallerden oluşan granoblastik dokuya sahip Mermer olarak tanımlanmıştır. K2E, 1590 ve 1560 lokasyonları ise; ağırlıkça %15-60 aralığında Epidot ve geri kalan kısımda da değişen oranlarda Kalsit, Feldispat, Piroksen, Kuvars, Titanit, Silimanit ve opak minerallerinden oluşan granoblastik dokuya sahip Kalksilikatik Gnays olarak tanımlanmıştır.

- ii. Dört farklı lokasyondan alınan örnekler toz haline getirilerek kimyasal analize tabi tutulmuşlardır. K2B lokasyonu büyükten küçüğe doğru sırasıyla CaO, SiO₂ ve MgO; K2E, 1590 ve 1560 lokasyonlarına ait örnekler ise sırasıyla SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve MgO ağırlıklı olup eser miktarda K₂O, TiO₂, MnO, Na₂O ve P₂O₅ bileşikleri içermektedir.
- iii. Bu çalışma kapsamında; kayaçların mineralojik bileşiminin ve mineral dağılımının, kimyasal içeriğinin ve dokusal koşullarının ısı iletim katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ancak literatürde; Brigaud ve Vasseur (1989), Kukkonen ve Lindberg (1995), Giraud vd. (2007), Abdulagatova vd. (2009), Kwon vd. (2011), Barry-Macaulay vd. (2013) ve Eppelbaum vd. (2014) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalarda; kayaçların mineralojik bileşiminin, mineral dağılımının ve dokusunun ısı iletim katsayısı üzerinde etkili olduğu ve ısı iletim katsayısı yüksek olan kuvars, olivin gibi mineraller içeren kayaçların ısı iletim katsayılarının da yüksek olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca, kayacın mineralojik bileşim verilerinden yararlanarak ısı iletim katsayısının belirlenebileceğini ve hesaplanan bu değerlerin ölçülen değerlerle uyum içerisinde oldukları ifade edilmiştir.
- iv. Yerinde sıcaklık, nem ve ısı iletim katsayısı ölçümleri Yozgat İli Akdağmadeni İlçesi'nin kuzeydoğusunda ilçe merkezine 13 km uzaklıkta bulunan Rasih ve İhsan yeraltı kurşun-çinko (Pb-Zn) işletmesinde gerçekleştirilmiştir.
- v. Yeraltı işletmesinde ocak havasının sıcaklık ve nem ölçümleri; Nisan ayı içerisinde, el tipi sıcaklık-nemölçer cihazı ile gerçekleştirilmiş ve çalışma bölgelerindeki sıcaklık ve nem değerleri deneyler süresince kaydedilmiştir. Ocak içi hava sıcaklığı 8-12°C, nem değerleri ise %84-90 aralığında değişmektedir. Ocak içi hava sıcaklığının ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisi açısından bir değerlendirme yapabilmek için aynı ölçümlerin farklı aylarda yapılması gerekmektedir. Ancak ölçüm bölgelerinde sıcaklık değerlerinin çok fazla değişim göstermemesi nedeniyle bir etkilenimin olmadığı söylenebilir. Ayrıca ölçümler yüzeyden itibaren derinlerde gerçekleştirildiğinden mevsimsel sıcaklık değişimlerinin ölçümleri etkilemeyeceği söylenebilir. Ancak nem değerleri yüksek oranda olduğu için ölçümler üzerinde etkilidir.

- vi. Yerinde ısı iletkenlik ölçümleri yüzeyden itibaren 157 m derinlikte (1615 kotu) K2 panosu içerisinde iki, 185 m derinlikte (1590 kotu) bir ve 215 m derinlikte (1560 kotu) bir lokasyonda olmak üzere 4 farklı lokasyonda, “Kuyu Isıtıcı Deneyi (Borehole Heater Test/BHT)” yöntemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler; “Hat Isı Kaynağı (Line Heat Source/LHS)”, grafiksel analiz ve doğrusal iki nokta arası hesaplama yöntemleri olmak üzere üç farklı şekilde değerlendirilmiştir. Grafiksel analiz sonuçlarına göre ortalama ısı iletim katsayısı değerleri; K2B, K2E, 1590 ve 1560 lokasyonları için zikredildikleri sıra ile 3,260 W/mK, 3,297 W/mK, 3,309 W/mK ve 3,818 W/mK’dir. Hat ısı kaynağı yöntemine göre ısı iletim katsayısı değerleri 40°C sıcaklık için K2B, K2E, 1590 ve 1560 lokasyonlarında sıra ile 3,148 W/mK, 3,319 W/mK, 3,564 W/mK ve 3,509 W/mK’dir. Doğrusal hat boyunca iki nokta arasında yapılan değerlendirmeye göre ortalama ısı iletim katsayısı değerleri ise; 40°C sıcaklık için aynı lokasyon sıralamasında olmak üzere, 3,108 W/mK, 2,961 W/mK, 3,527 W/mK ve 3,670 W/mK’dir.
- vii. Laboratuvarında ısı iletim katsayısı ölçümleri; her bir lokasyon için 5 olmak üzere 1 cm kalınlığında ve 2 inç çapında hazırlanan 20 adet silindirik numune üzerinde kuru, nemli ortam (%30-50) ve suya doygun koşullarda Unitherm 2022 model muhafazalı ısı akışölçer cihazı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Isı iletim katsayısı değerleri; 38°C sıcaklık için kuru-nemli-suya doygun sıralaması şeklinde K2B için 1,772-1,882-1,958 W/mK; K2E için 1,900-2,018-2,147 W/mK; 1590 için 1,696-1,803-1,856 W/mK ve 1560 için 1,760-1,838-1,902 W/mK’dir.
- viii. Kuru, nemli (%30-50) ve suya doygun 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. Belirleme katsayısının en yüksek (0,993, K2E) ve en düşük (0,853, K2B) değerleri nemli numunelerde elde edilmiştir. Literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar kayaçların sıcaklık değişimine tepkilerinin farklı olduğunu yönündedir. Kayaçların sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayılarının değişimi; şeffaflık, mineral bileşimi, mineral tane boyutları ve şekilleri, minerallerin dağılımı ve çatlak yapısına

bağlıdır (Buntebarth, 1991; Clauser ve Hunges, 1995). Bu faktörlere bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki azalma normalden daha düşük olabileceği gibi sabit kalabilir veya artabilir (Somerton, 1992). 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 (Lee ve Deming, 1998). Aynı şekilde Kuriyagawa vd., (1983) 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. Sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığı kayaçlara örnek olarak feldspat (Birch and Clark, 1940), kumtaşı (Abdulagatova vd, 2009) ve lifli yalıtım malzemeleri (Zhao vd., 2009); azaldığı kayaçlara örnek olarak serpantin (Osako vd., 2010), diyorit, olivin ve tonalit-trondjemit-granodiyorit (Merriman vd., 2013), anortozit (Birch and Clark, 1940), obsidyen ve şeyl (Cermak ve Rybach, 1982), kumtaşı (Sugawara and Yoshizawa, 1961-1962; Anand vd., 1973) verilebilir. Dolayısıyla çalışma bölgesini temsil eden Kalksilikatik Gnayslar ve Kalsit, Dolomit ve Amfibol grubu minerallerden oluşan granoblastik dokuya sahip Mermer de sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayısının arttığı kayaçlar grubunda değerlendirilebilir.

- ix. Numunelerin görünür yoğunlukları TS EN 1936 standardına göre yapılan deneyler aracılığıyla belirlenmiştir. Lokasyonları temsil eden numunelerin görünür yoğunluk değerleri K2B 2,80 gr/cm³, K2E 3,03 gr/cm³, 1590 2,97 gr/cm³ ve 1560 2,98 gr/cm³'tür. Gerçek yoğunluk belirleme deneyleri ise ASTM 5550-06 standardına göre yapılmış olup lokasyon bölgelerine ait değerler; K2B 2,83 gr/cm³, K2E 3,18 gr/cm³, 1590 3,03 gr/cm³ ve 1560 3,17 gr/cm³'tür. Ölçüm bölgelerindeki numunelerin açık ve toplam gözeneklilikleri ise zikredildikleri sıra ile K2B için %0,23-%0,84, K2E için %0,55-%4,88, 1590 için %0,66-%1,93 ve 1560 için %0,69-%5,97'dir. Görünür yoğunluk, gerçek yoğunluk ve açık gözeneklilik ile ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiler kuru, nemli ve suya doymuş numuneler için farklı sıcaklıklarda (30°C, 60°C ve 90°C) değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte görünür ve gerçek yoğunluk değerleri arttıkça ısı iletim

katsayısı değerleri de artmıştır. Açık gözenekliliğin artması ise ısı iletim katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum; kuru, nemli ve suya doygun numunelerin hepsinde bütün sıcaklık değerleri için gözlemlenmiştir.

- x. Yoğunluk ve gözeneklilik açısından literatürdeki sonuçlar farklılıklar arz etmektedir. şöyle ki; Kukkonen ve Lindberg (1998); ısı iletim katsayısının yoğunluk artışı ile birlikte azaldığını, Barry-Macaulay vd. (2013); zemin ve kayaçların ısıl iletkenliklerinin yoğunluğun artışına bağlı olarak arttığını ve Pasquale vd. (2015); kayaçların ısı iletim katsayısının yoğunluk artışı ile siyalitik kayaçlar için azaldığını, ultrabazik kayaçlar için arttığını ifade etmişlerdir. Gözeneklilik açısından ise tam bir uyum söz konusu olup araştırmacılar gözeneklilik arttıkça ısı iletim katsayısının azaldığını ifade etmişlerdir.
- xi. Kayaçlarda su emme katsayısı tayini TS EN 13755 standardına göre yapılmış olup numunelerin su emme katsayısı değerleri bölgeler bazında; K2B % 0,07, K2E %0,24, 1590 %0,29 ve 1560 %0,26'dır. Su emme katsayısındaki artışa bağlı olarak kayaçların ısı iletim katsayısı azalmaktadır.
- xii. Kayaçlarda kılcal su emme katsayısının belirlenmesi deneyi TS EN 1925 standardına göre yapılmış olup numunelerin kılcal su emme katsayıları bölgeler bazında; K2B %0,23, K2E %0,56, 1590 %0,69 ve 1560 %0,66'dır. Kılcal su emme katsayısındaki artışa bağlı olarak kayaçların ısı iletim katsayısı azalmaktadır.
- xiii. Numunelerin P ve S dalga ultrasonik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen P ve S dalga hızları zikredildikleri sıra ile lokasyonlar bazında; K2B için 6720-6493 m/sn, K2E için 7069-6846 m/sn, 1590 için 6878-6341 ve 1560 için 6962-6764 m/sn'dir. P-dalga hızı arttıkça kayaçların ısı iletim katsayısı artmaktadır.
- xiv. Görünür ve gerçek yoğunluk, açık gözeneklilik, su emme, kılcal su emme ve P-dalga hızı için belirleme katsayılarının en yüksek değerleri 30°C'de kuru numunelerde en düşük değerleri ise 60°C'de nemli numunelerde elde edilmiştir.
- xv. Araştırmacılar tarafından da sıkça vurgulandığı gibi; suya doygun numuneler, kayaç gözeneklerinde bulunan hava ve suyun ısıl 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 alır ve bu durum numunelerin ısı iletim katsayısının artmasına yol açar.

- xvi. Kayaçların yerinde ölçülen ısı iletim katsayısının laboratuvarda ölçülen değerlere göre nasıl değiştiğinin belirlenmesi için öncelikli olarak yerinde ölçülen değerlerin laboratuvarda ölçülen değerlere oranları belirlenmiştir. Numunelerin kuru, nemli ve suya doymuş olma durumlarına göre; yerinde ölçümlerden elde edilen ısı iletim katsayıları laboratuvar ölçümleri sonucu bulunan değerlerden 1,546-2,102 kat daha fazladır. En küçük fark laboratuvarda suya doymuş numune üzerinde oluşurken en büyük fark kuru numune üzerinde oluşmuştur.
- xvii. 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.
- xviii. Değişim oranlarında en büyük değerlerin 1560 kotundan alınan numunelerden elde edilmesi ve 1560 kotunun ölçüm bölgeleri içerisinde en derin bölge olması hususu da göz önüne alındığında derinlik nedeniyle oluşabilecek "basınç faktörü"nü etkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca; değişim katsayısının en yüksek elde edildiği bölgenin yüzeyden itibaren 215 m derinliğindeki 1560 lokasyonunun en düşük elde edildiği bölgenin ise 157 m derinlikteki K2E lokasyonunun olması, basınç ile ısı iletim katsayısı arasında doğrudan bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır.
- xix. Basınç faktörünün etkisini değerlendirebilmek için yerinde ölçümlerin gerçekleştirildiği derinliklere bağlı olarak düşey gerilmelerin hesaplanmış

ve düşey gerilmeler ile oransal katsayıların değişimi incelenmiştir. Suya doymun, nemli ve kuru koşullar için ayrı ayrı yapılan değerlendirmeler sonucunda; düşey gerilmelerdeki (σ) artışa bağlı olarak kayaçların yerinde ve laboratuvar ısı iletim katsayıları arasındaki fark yükselmektedir. Bu sonuçlara göre en düşük katsayılar suya doymun numuneler üzerinde görülmüştür. Farklı sıcaklık değerleri için (30°C – 50°C – 60°C), ısı iletim katsayısı ile düşey gerilme arasında aşağıdaki verilen ilişkiler ortaya konmuştur.

$$k_{30}=1,878 * 0,687 * \sigma^{0,5948}$$

$$k_{50}=1,921 * 0,5594 * \sigma^{0,4876}$$

$$k_{60}=1,935 * 0,2936 * \sigma^{0,7587}$$

- xx. Isı iletim katsayısının yerinde ölçümünü içeren mevcut çalışma ülkemizde bu konuda yapılan ilk çalışma olup kayaçların yapısal özelliklerine yönelik ayrıntılı çalışmalarla desteklenmesi, basıncın ısı iletim katsayısını etkileyen önemli parametrelerden biri olması nedeniyle yerinde gerilme ölçümleri ile belirlenmesi ve çalışma sahalarının artırılması aracılığıyla ortaya konan ilişkilerin geliştirilmesi, güvenli gelecek planlaması açısından büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- 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.
- 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.
- Akinyemi, O.D., Sauer T.J., and Onifade Y. S.** (2011). Revisiting the block method for evaluating thermal conductivities of clay and granite. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v.38, pp. 1014-1018.
- Aliev, SA., Mekhtiev, SF.** (1970). Geothermics of depression zones of Azerbaijan. Report for 1964–1970. AzTGF, Baku (in Russian).
- Aliev, SA., Rustamov, RI., Mirzababayev, II., Alieva, ZA.** (1977). Geothermal cross-section of forerunner of superdeep Saatly borehole. *Izv AN Azerb SSR, Ser: Earth Sci* 6:115–117 (in Russian).
- Anand, J., W. H. Somerton, and E. Gomma.** (1973). Predicting thermal conductivities of formations from other known properties *Soc. Pet. Eng. J.*, 13, 267-273.
- Ashworth E. & Ashworth S.D.** (1979). A Simple apparatus for thermal conductivity measurements rocks and similar poor conducting materials. *20th. US Rock Mechanics Symposium*, Proceedings, Texas, pp. 27-33.
- 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.
- ASTM C 1113-13.** (2013). Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique).
- ASTM C1045-07.** (2013) Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions
- ASTM C177-13.** (2013) Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus
- ASTM D 2845–05.** (2005). Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.
- ASTM D 5334-14.** (2014). Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure.
- ASTM D5550-14.** (2014) Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer
- ASTM E 1225-13.** (2013). Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique.
- ASTM E 1530-11.** (2011). Standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique.
- 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).
- Banerjee, G., Sengupta, K., & Das, R.** (1992). Measurement of thermal conductivity of refractory bricks by the nonsteady state hot-wire method using

- differential platinum resistance thermometry. *Journal of testing and evaluation*, 20(6), 454-459.
- Barla C., Innaurato N. & Pantaleoni G. (1983).** Heat transfer in the rock mass around mine openings. *5th International Congress on Rock Mechanics*, Melbourne, Australia, pp.E141-E146.
- 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.
- Bernasconi, A., Slator, J., Posselt, D. and Ott, H.R. (1990).** Dynamic technique for measurements of the thermal conductivity and specific heat: *Application to Silica Aerogels. Rev. Of Science in Instruments*, Vol. 61 (9), pp.2420-2426.
- 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.
- Birch, F., Schairer, JF., Spicer, HC (eds). (1942).** Handbook of physical constants. *Geological Society of America. Special papers*, No. 36.
- Blackford, M. G., Harries, J. R. (1985).** Heat source probe for measuring thermal conductivity in waste rock dumps. *Australian Nuclear Science and Technology Organisation*.
- Brigaud, F., Vasseur, G. (1989).** Mineralogy, porosity and fluid control of thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal*, Vol. 98, pp.525-542.
- Buntebarth, G. (1991).** Thermal properties of KTB-Oberpfalz V B core samples at elevated temperature and pressure, ci. Drill., 2, 73-80s.
- Cannat, M., Karson, JA., Miller, DJ et al. (1995)** Proceedings of the ocean drilling program, initial reports, vol 153.
- Carslaw, J.-C., Jaeger, H.-S., (1959).** Conduction of heat in solids. *Oxford University Press*, England.
- 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.
- Cezairliyan, A. (1981).** Specific heat of solids. In: Touloukian, Y.S., Ho, C.Y. (Eds), *Cindas Data Series on Material Properties. Hemisphere Publishing Corporation*, 1±2, pp. 5.
- Cho, J.W., Kim, H., Jeon, S., Min, K.B. (2012).** Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *International Journal of Rock*
- Cho, W. J., Kwon, S., & Choi, J. W. (2009).** The thermal conductivity for granite with various water contents. *Engineering Geology*, 107(3), 167-171.
- Choi, W., & Ooka, R. (2015).** Interpretation of disturbed data in thermal response tests using the infinite line source model and numerical parameter estimation method. *Applied Energy*, 148, 476-488.
- Clark, SP Jr (Ed.). (1966).** Handbook of physical constants (revised edition). *Geological Society of America. Memoir 97*, Washington, DC.
- 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.
- Clauser, C., Huenges, E. (1995).** Rock physics and phase relations a handbook of physical constants. *Copyright by American Geophysical Union, AGU Reference Shelf 3*, pp.105-126.

- Çolakoğlu, A., Genç, Y.** (2001). Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yatağının makro-mikro dokusal özellikleri ve kökensel yorumu, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44,1.
- Dakhnov, VN., Dyakonov, DI.** (1952). Thermal investigation of boreholes. Gostoptekhizdat, Leningrad (in Russian).
- Daw, J., Rempe, J., Condie, K., Knudson, D., Wilkins, S. C., Fox, B., & Ban, H.** (2010). Hot wire needle probe for in-pile thermal conductivity detection. *In Proc. 7th Int. Topical Meeting Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies* (pp. 7-11).
- 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.
- 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.
- Dikici, M.** (1993). Katıhal fiziğine giriş, Samsun.
- Dmitriev, AP., Kuzyaev, LS., Protasov, YuI., Yamschikov, VS.** (1969). Physical properties of rocks at high temperatures. Nedra, Moscow (in Russian).
- Durutürk, 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*, 1999; p. 188.
- Durutürk, Y.S., Demirci, A., Keçeciler, A.** (2002). Variation of thermal conductivity of rocks with pressure. *CIM Bulletin*, Vol. 95, pp. 67-71.
- Eppelbaum, L., Kutasov, I., & Pilchin, A.** (2014). Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. *In Applied Geothermics* (pp. 99-149). Springer Berlin Heidelberg.
- Galson, D. A., Wilson, N. P., Schärli, U., & Rybach, L.** (1987). A comparison of the divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity. *Geothermics*, 16(3), 215-226.
- Gillis, K., Mével, C., Allan, J et al.** (1993). Proceedings of ODP, initial reports, 147: College Station, TX (Ocean Drilling Program). Leg 147.
- 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.
- Gornov, P. Y.** (2015). Relationship of the thermal conductivity of rocks in the Komsomol'sk ore district (Khabarovsk Territory) with minerageny and metasomatism. *Russian Geology and Geophysics*, 56(3), 493-499.
- 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.
- Görgülü, K., Durutürk, Y. S., & Demirci, A.** (2004) Kayaçların ısı iletkenliklerini etkileyen faktörler. *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Sivas.
- 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.

- Gündüz, L., Şapçı, N., Karıcı, M.** (2013). Mermerlerin ısısal performansı ve binalarda enerji verimliliğine etkilerinin İncelenmesi; *Madencilik*, Cilt 52, Sayı 4, Sayfa 27-36.
- Güyagüler, T., Önder, Ü.Y.** (1995). Karadon kömür ocağında jeotermal gradyant eğrisinin ve kayaçların ısısal geçirgenliğinin ölçülmesi ile ısı yayılımının belirlenmesi. *Nihai Rapor, ODTÜ, Maden Müh. Böl.*, Ankara, 28 s.
- Habibi, A., Kramer, R. B., & Gillies, A. D. S.** (2015). Investigating the effects of heat changes in an underground mine. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1164-1171.
- Hartman, H.L.** (1997). Mine Ventilation and Air Conditioning. 3rd ed., *J. Wiley and Sons*, New York, 730 p.
- Henry, K., & Coumou, K. G.** (1991). New direct measurement techniques for thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of advanced materials. *Thermochimica acta*, 192, 129-134.
- Higashi, A.** (1952). Thermal Conductivity of Frozen Soil. *Journal of the Faculty of Science*, Hokkaido University. Ser. 2, Physics, 4(2), 95-106.
- Hiramatsu, Y., Sugisaka, M., Amona, K., Mizuta, Y.** (1980) "Cooling Development Workings in Very Hot Ground", *2nd International Mine Ventilation Congress*, AIME, Proceedings, New York, pp. 549 - 555.
- Hooper, F. C., & Lepper, F. R.** (1950). Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. National Emergency Training Center.
- Horai, K. I.** (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1278-1308.
- Innaurato, N., & Ocella, E.** (1989, January). Laboratory and in situ rock thermal property measurements in hot mine. *In ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.
- Jeffrey, J. A.** (1979). Determination of in-situ thermal properties of Stripa granite from temperature measurements in the full-scale heater experiments: Method and Preliminary Results. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Jockwer, N., Wiczorek, K., & Fernández, A. M.** (2007). Measurements of gas generation, water content and change in the water distribution in a heater experiment in the underground laboratory Mont Terri. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 32(1), 530-537.
- Kakaç, S.** (1987). Isı Transferine Giriş: I Isı İletimi, *ODTÜ Mühendislik Fakültesi*, Ankara, s.1 Kaynaklar.
- Kelemen PB, Kikawa E, Miller DJ et al.** (2004) Proceedings of the ocean drilling program, initial reports, vol 209.
- Kersten, M. S.** (1949). Thermal properties of soils.
- 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.
- Kukkonen, I., Suppala, I., Korpisalo, A.** (2011). Measurements of rock thermal properties in Olkiluoto with the TER076 device: Drillholes OL-KR30 OL-KR31 and ONK-PVA4. Posiva Oy.
- Kukkonen, I., & Lindberg, A.** (1995). Thermal conductivity of rocks at the TVO investigation sites Olkiluoto, Romuvaara and Kivetty (No. YJT--95-08). Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies.
- 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.

- 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.
- Kutas, RI., Gordienko, VV.** (1971). Heat flow of the Ukraine. Naukova Dumka, Kiev (in Russian).
- 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.
- Kwon, S., Cho, W. J., & Han, P. S.** (2006). Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 203-217.
- Kwon, S., Lee, C. S., Cho, S. J., Jeon, S. W., & Cho, W. J.** (2009). An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 24(1), 1-13.
- 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.
- Kwon, S., & Cho, W. J.** (2008). The influence of an excavation damaged zone on the thermal-mechanical and hydro-mechanical behaviors of an underground excavation. *Engineering Geology*, 101(3), 110-123.
- 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.
- Lhendup, T., Aye, L., & Fuller, R. J.** (2014). In-situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 287-295.
- Liu, G., Li, B., Ren, T., & Horton, R.** (2007). Analytical solution of the heat pulse method in a parallelepiped sample space. *Soil Science Society of America Journal*, 71(5), 1607-1619.
- Liu, J., Tien, N.** (2016). Estimation of the thermal conductivity of granite using a combination of experiments and numerical simulation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 81(1), 39-46.
- Lubimova, E.A.** (1968a). Thermal history of the Earth. In: *The Earth's crust and upper mantle. American Geophysical Union, geophysical monograph series*, vol 13, pp 63–77.
- Lubimova, E.A.** (1968a). Thermics of the Earth and Moon. Nauka, Moscow (in Russian).
- Lubimova, EA., Lusova, LN., Firsov, FV.** (1964). Basics of heat flow from Earths depths determination and results of measurements. In: *Geothermal researches*. Nauka, Moscow, pp 5–103 (in Russian).
- Lubimova, EA., Smirnova, EV.** (1974). Heat physical properties of rocks at high temperatures. In: *Physical properties of rocks under high pressure and temperature. Trans. of IV All-Union Congress*, Tbilisi, pp 171–172 (in Russian).
- Magnitsky, VA.** (1965) Internal structure and physics of the Earth. *Nedra*, Moscow (in Russian).
- Mekhtiev, S.F., Mirzajanzadeh, AKh., Aliyev, SA.** (1971). Geothermal investigation of oil and gas fields. *Nedra*, Moscow (in Russian).

- Mekhtiev, SF., Geodekyan, AA., Tsaturyants, AB., Ter-Karapetyants, ZN., Bayramov, EM., Shabanov, CF.** (1973) Geothermics of oil and gas fields of Azerbaijan and Turkmenistan. Nauka, Moscow (in Russian).
- Mekhtiev, SF., Kashkay, MA., Aliev, SA.** (1972). Investigation of relationships of heat flow with construction and evolution tectonic structure and geophysical fields in different tectonic structures of USSR. (Pre-Kura oil and gas province, Apsheron oil and gas province). *Scientific report for 1971–1972*. Baku, Azerbaijan Geol. Fund.
- 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.
- 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).
- Mohsenin, N. N.** (1980). Thermal properties of foods and agricultural materials. New York. USA.
- Mousset-Jones, P., McPherson, M.J.** (1986). The Determination of in-situ rock thermal properties and the simulation of climate in an underground mine. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, Vol. 4, pp. 197-216.
- Nagaraju, P., & Roy, S.** (2014). Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements. *Tectonophysics*, 626, 137-143.
- 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.
- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., & Abbott, G. L.** (1961). Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of applied physics*, 32(9), 1679-1684.
- Pasquale, V., Verdoya, M., & Chiozzi, P.** (2015). Measurements of rock thermal conductivity with a Transient Divided Bar. *Geothermics*, 53, 183-189.
- Penner, E.** (1963). Anisotropic thermal conduction in clay sediments.
- Perrillat, J. P., Daniel, I., Koga, K. T., Reynard, B., Cardon, H., & Crichton, W. A.** (2005). Kinetics of antigorite dehydration: a real-time X-ray diffraction study. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(3), 899-913.
- Poyraz, B.** (2006). The investigation of thermal conductivity of rocks (MSc thesis), *Cumhuriyet University, Sivas*, p. 57.
- Robertson, E. C., & Peck, D. L.** (1974). Thermal conductivity of vesicular basalt from Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 79(32), 4875-4888.
- Sanver, M.** (1983). Yerkürenin ısı evrimi ve günümüzde yerinin sıcaklığı. İstanbul Teknik Üniversitesi, *Maden Fakültesi*, 798 s.
- Schärli, U., Rybach, L.** (2001). Determination of specific heat capacity on rock fragments. *Geothermics*, 30(1), 93-110.
- Sharma, P.V.** (2002). Environmental and engineering geophysics. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Shen, X. J., Yang, S. Z., & Zhang, W. R.** (1991). Portable insitu wall-rock thermal conductivity meter for mine pits. *Review of scientific instruments*, 62(6), 1581-1586.
- Somerton, W. H.** (1992). Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluids systems 2, 57 pp., *Elsevier*, New York.

- Starikova, GN., Lubimova, E.A.** (1973) Heat properties of rocks from Kola peninsula. In: Heat flows from Earth crust and upper mantle. Nauka, Moscow, pp 112–124 , Russia.
- Stkei, G.** (1986). Mechanics of Agricultural Materials. *Elsevier*, ISBN 0-444-99523-4, Amsterdam. 486s.
- Sugawara, A., & Yoshizawa, Y.** (1962). An experimental investigation on the thermal conductivity of consolidated porous materials. *Journal of Applied Physics*, 33(10), 3135-3138.
- 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.
- Ugur, I.,& Demirdag, S.** (2006). Investigation of the relation between the specific heat capacity and material properties of some natural building and facing stones. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(5), 831-835.
- Url-1**<<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5615>>, alındığı tarih 22.11.2016
- Url-2**<<http://ngdir.ir/geolab/GeoLabExp.asp?PID=2957&PEXPCode=7660&>>, alındığı tarih: 22.11.2016.
- Url-3**<<http://nptel.ac.in/courses/105103025/module5/lec39/2.html/>>, alındığı tarih: 24.09.2015.
- Url-4**<<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5613/>>, alındığı tarih: 24.09.2015.
- Url-5**<<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5613/>>, alındığı tarih: 24.09.2015.
- Verma, L. S., Shrotriya, A. K., Singh, R., & Chaudhary, D. R.** (1991). Prediction and measurement of effective thermal conductivity of three-phase systems. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 24(9), 1515.
- Vosteen, H. D., Schellschmidt, R.** (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9), 499-509.
- Walsh, J. B., & Decker, E. R.** (1966). Effect of pressure and saturating fluid on the thermal conductivity of compact rock. *Journal of Geophysical Research*, 71(12), 3053-3061.
- Wechsler, A. E.** (1992). The probe method for measurement of thermal conductivity. In *Compendium of thermophysical property measurement methods (pp. 161-185)*. Springer US.
- 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-T paths: J. Metamorphic Geol.*, v.19, pp. 411-432.
- 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(1), 94-103.
- Yunus, A. Çengel., Robert, H. Turner.** (2001). *Fundamentals of thermal- fluid sciences*, Newyork.
- Yüncü,H., Kakaç, S.** (1999). Temel ısı transferi, *Bilim Yayıncılık*, Ankara, s.1-15
- Zhao, X., Lee, Y. Y., & Liew, K. M.** (2009). Mechanical and thermal buckling analysis of functionally graded plates. *Composite Structures*, 90(2), 161-171.

Zinger, AS., Kotrovsky, VV. (1979). Hydro-geothermal conditions of water systems of western part of Pre-Caspian depression. Saratov University, Russia





ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Gökhan EROL
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 23.06.1980
Medeni Hali	Evlü
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	MTA Genel Müdürlüğü, MAT Dairesi – E.H.S.M.A. Birimi, ANKARA
E-posta Adresi	gokhan7erol@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Lisesi, 1998
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2005
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2008

İş Tecrübesi

Protek İnş. A.Ş	Maden Mühendisi, 2005
Tureks Mermer A.Ş	Maden Yük. Mühendisi, 2006
Dicle Üniversitesi	Öğretim Görevlisi, 2009
MTA Genel Müd.	Maden Yük. Mühendisi, 2012

Kongreler ve Bildiriler

Ulusal

Görgülü, K., Erol, G., Uysal, Ö. (2011).Boztepe Taş Ocağı Malzemesinin Beton Agregası Olarak Kullanabilirliğinin Değerlendirilmesi. 6. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 06-07 Ekim, Sivas. s.93-98.

Bayram, O., Erol, G. (2015). Bazı Doğal Taşların Isıl İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi. 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 6-10 Nisan, Ankara. Poster Sunumu.

Bayram, O., Erol, G., Gögce, Ö. (2015).İhracat Açısından Doğal Taş Testlerinin Önemi ve Akredite Bir Laboratuvar Örneği. 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 6-10 Nisan, Ankara. Poster Sunumu.

Bayram, O., Erol, G., Gögce, Ö. (2015).İhracat Açısından Doğal Taş Testlerinin Önemi ve Akredite Bir Laboratuvar Örneği. 68. MTA 80. Yıl Sempozyumu Genişletilmiş Bildiri Özetleri Kitabı, 01-03 Aralık, Ankara. s.167-170.

Erol, G., Bayram, O. (2015).Bazı Doğal Taşların Isıl İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi. MTA 80. Yıl Sempozyumu Genişletilmiş Bildiri Özetleri Kitabı, 01-03 Aralık, Ankara. s.159-162.

Ödüller, Teşvikler ve Üvelikler

Maden Mühendisleri Odası 2005