

Menderes Masifinde Yeni Kuyularda Isı Akısı Hesabı: İncirliova, Aydın

H. Evrim TÜTÜNSATAR^{1*}, Gökhan ÜNAL², M. Nuri DOLMAZ³

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gönen Meslek Yüksekokulu, Kültürel Miras ve Turizm Programı, 32090, Isparta

^{2,3} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

¹ <https://orcid.org/0000-0002-0712-3164>

² <https://orcid.org/0000-0003-4060-918X>

³ <https://orcid.org/0000-0002-9185-9835>

*Sorumlu yazar: evrimtutunsatar@isparta.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 08.02.2022

Kabul tarihi: 02.08.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

Anahtar Kelimeler:

Jeotermal gradyan

Kuyu ölçümleri

Isı iletkenliği

Isı akısı

Aydın

Bu çalışma kapsamında Ege Bölgesi, Aydın ili sınırları içerisinde yer alan İncirliova bölgesinde yeni açılan iki kuyuda (Efeler 1 ve Efeler 2), kuyu içi termal bilgilerine dayanılarak kabuğun üst derinlikleri için ısı akısı hesabı yapılmıştır. Söz konusu bu kuyulara ait elde edilen $53,9 \pm 0,08$ °C/km ve $40 \pm 0,12$ °C/km jeotermal gradyan ile kuyu litolojisi incelenerek ve efektif yöntem kullanılarak hesaplanan ısıl iletkenlik değerleri ve ısı akısı değerleri ilk defa bu çalışma ile ortaya konmuştur. Efeler 1 kuyusunda elde edilen jeotermal gradyan değerleri 50 – 76°C arasında değişmektedir. Efeler 1 kuyusu düşey litolojik bilgisine dayanılarak sırasıyla 50,82 °C/km, 52,72 °C/km, 63,04 °C/km ve 75,94 °C/km değerlerine sahip olan dört ayrı tabaka olarak sınıflandırılmıştır. 2,75 W/m°C ısı iletkenliği ve $53,9 \pm 0,08$ °C/km ortalama jeotermal gradyan kullanılarak Efeler 1 kuyusu için efektif yöntem ile ısı akısı 148,23 mW/m² olarak hesaplanmıştır. Efeler 2 kuyusu için 2,75 W/m°C ısı iletkenliği ve $40 \pm 0,12$ °C/km ortalama jeotermal gradyan kullanılarak ısı akısı 110,0 mW/m² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar bölgede yapılan diğer çalışmalarla uyumludur ve çalışma alanı olan Aydın bölgesinin yüksek ısı akısı bölgesi olarak nitelendirilmesini desteklemektedir. Ayrıca, Curie Nokta Derinliğinden elde edilen 49,57 °C/km jeotermal gradyan ile kuyu litolojisine dayanılarak efektif yöntemle hesaplanan 2,75 W/m °C değerine sahip ısıl iletkenlik değeri kullanılmıştır ve bölge için ısı akısı 136,3 mW/m² olarak hesaplanmıştır. Curie Nokta Derinliği ile hesaplanan ısı akısı yeni açılan kuyulardan hesaplanan ısı akısı değerleri ile karşılaştırıldığında; Curie Nokta Derinliği ile elde edilen ısı akısının kuyu (Efeler 1) ısı akısı değerinden biraz daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum kabuğun daha büyük bir bölümü için hesaplanan jeotermal gradyandan kaynaklanmaktadır.

The Calculation of Heat Flow in New Boreholes in Menderes Massif: İncirliova, Aydın

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 08.02.2022

Accepted: 02.08.2022

Published online: 10.03.2023

Keywords:

Geothermal gradient

Boreholes measurements

Heat conductivity

Heat flow

Aydın

Heat flow calculations were made for the upper depths of the crust based on the thermal information of the boreholes in two newly opened boreholes in the İncirliova region within the borders of Aydın province in the Aegean Region. The thermal conductivity values and heat flow values were calculated by using the effective method as well as based on the borehole lithology with a geothermal gradient of 53.9 ± 0.08 °C/km and 40 ± 0.12 °C/km. Geothermal gradient values obtained in Efeler 1 borehole vary from 50 to 76°C. The values of 50.82 °C/km, 52.72 °C/km, 63.04 °C/km and 75.94 °C/km were obtained for four separate layers classified for Efeler 1 borehole,

respectively. The heat flow for Efeler 1 borehole was calculated as 148.23 mW/m² with an effective method by using a thermal conductivity of 2.75 W/m°C and an average geothermal gradient of 53.9±0,08 °C/km. Likewise, the heat flow for Efeler 2 borehole was calculated as 110.0 mW/m² by using 2.75 W/m°C thermal conductivity and 40±0.12 °C/km average geothermal gradient. These results, which are characterized as high heat flow region, are consistent with the other studies in the region. The heat flow value with 136.3 mW/m² was calculated for the region by using geothermal gradient (49.57 °C/km) obtained from the Curie Point Depth and the thermal conductivity (2.75 W/m °C) calculated by the effective method based on the borehole lithology. The heat flow calculated from the Curie Point Depth was compared with the heat flow values calculated from the drilled boreholes. It was seen that the heat flow obtained by the Curie Point Depth was low. The reason of this low heat flow is the geothermal gradient calculated for a larger portion of the crust.

To Cite: Tütünsatar HE., Ünal G., Dolmaz MN. Menderes Masifinde Yeni Kuyularda Isı Akısı Hesabı: İncirliova, Aydın. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 517-537.

1.Giriş

Artan insan nüfusu ve buna bağlı olarak artan enerji gereksinimini karşılayabilmek, dünya çapında sürdürülebilirliği önem arz eden konulardan biridir. Ekonomik büyüme ve enerji tüketim ilişkisini inceleyen Yanıktepe ve ark. (2021), enerji tüketiminin iktisadi büyümede son derece etkili bir parametre olduğunu ve enerji tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek yönlü bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir. Son zamanlardaki yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim sürdürülebilirliği sağlama açısından destekleyici çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan Jeotermal, yeraltının çeşitli derinliklerinde saklı bulunan sıcak su ve buharının sondaj vb. yöntemler ile yüzeye çıkarılması ve üretimde bu ısıdan yararlanma işlemidir. Jeotermal kaynaklar, ısınma, elektrik, seracılık vb. enerji gereksinimlerini karşılamaya yönelik alanlarda kullanımı gün geçtikçe artan enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Jeotermal kaynakların ortaya çıkarılması için öncelikli olarak yeraltı ısısının bilinmesi, litolojisinin tanınması ve sıcaklık alanının incelenmesi gerekmektedir. Yer içi ısısını ve derinlikle değişimlerini bilmek, bölgesel birim yüzeydeki ısı aktarım hızını (ısı akısını) ölçmek ve buna bağlı olarak ısı akısı haritaları oluşturmak jeotermal kaynakların ortaya çıkarılması için gerekli bir yöntemdir.

Yer içi ısı levha hareketleri, deprem, volkanizma, jeotermal, manto konveksiyon akımı, radyoaktif elementlerin yarılanma ömürleri, gravitasyon enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi ve basınç ile sıcaklığın derinlikle artmasından kaynaklanmaktadır. Yer kabuğunun jeotermal gradyan (sıcaklık gradyan) olarak ifade edilen derinlikle sıcaklık değişimlerini tespit etmek dünyanın iç sıcaklığının anlaşılmasında önemli bir yere sahiptir. Jeotermal gradyan sahadaki kuyularda doğrudan ölçülebildiği gibi, Curie Nokta Derinliği hesapları ile de dolaylı olarak tespit edilebilmektedir. Yer kabuğunun jeotermal gradyanını hesaplamak sondaj ile ölçülemeyen derinliklerin sıcaklıklarını tahmin edilmesine de imkân sağlamaktadır. Yericinin derinlere doğru sıcaklığının arttığı ve mantodan yayılan ısının yer kabuğunu ısıtan başlıca kaynak olduğu bilinmektedir. Yer içi ısı iletimini etkileyen bir diğer unsur kayaçların da kendilerine ait ısı iletim özelliklerinin olmasıdır. Kayaçların ısı iletkenlikleri içerdiği mineral bileşimleri, sıcaklık, basınç, gözeneklilik ve suya doygunluklarına bağlı olarak değişim

göstermektedir. Sedimanter, magmatik ve metamorfik kayaçların her biri özelliklerine göre farklı ısı iletkenliğe sahiptir. Kayaçların ısı iletkenliği petrol ve gaz arama, termoelastik stres analizi ve yerbilimi çalışmalarında önem arz etmektedir. Isı akısı jeotermal gradyan ve ısı iletkenlik çarpılarak hesaplandığından, ısı akısı belirlemelerinde ısı iletkenlik bilgisi önemlidir (Jaeger, 1965). Ayrıca, kayaç ısı iletkenlik değerlerinin bilinmesi ısı akısı ve termal modelleme çalışmaları için de önem arz etmektedir (Balkan ve ark., 2017).

Bu çalışmada Batı Anadolu'da Ege Bölgesi'nde Aydın ili sınırları içerisinde İncirliova bölgesinde son zamanlarda yeni açılan iki kuyuya (Efeler-1 ve Efeler-2 kuyusu) ait kuyu içi termal bilgilerine dayanılarak, ilk defa bu lokasyonda kabuğun üst derinlikleri için ısı akısı hesabı yapılarak yorumlanmıştır. Ayrıca aynı alana ait Curie Nokta Derinliklerinden elde edilen jeotermal gradyan kullanılarak da ısı akısı hesabı yapılmış ve karşılaştırılmıştır.

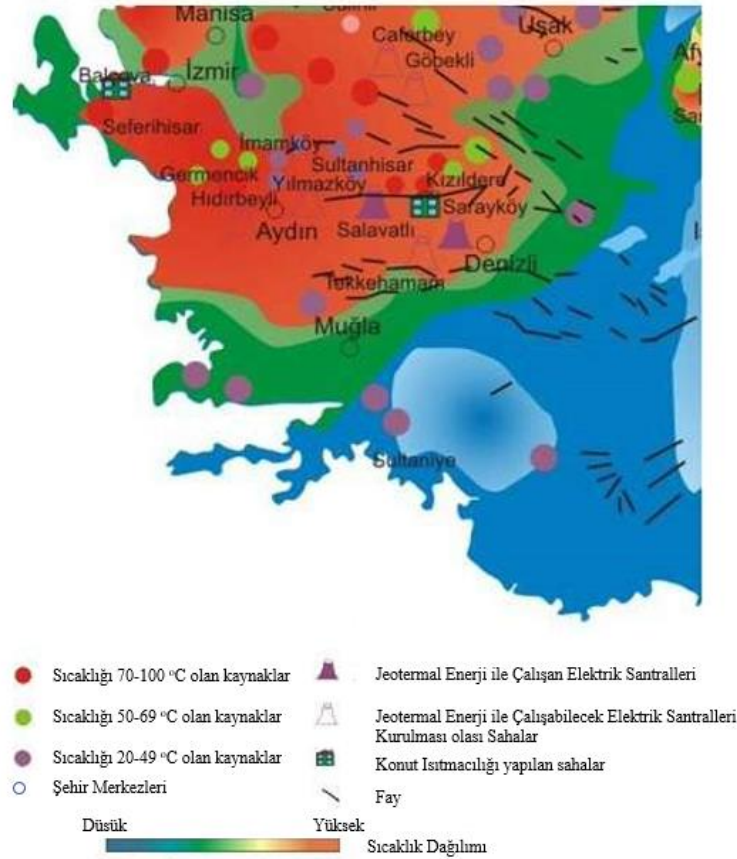
Bölgesel Tektonik, Jeoloji ve Isı Akısı

Çalışma alanının yer aldığı Batı Anadolu Bölgesi yoğun levha tektoniği hareketleri ile dikkat çekmektedir. Buna rağmen aktif tektonik yapıya sahip Batı Anadolu'daki ısı akısı çalışmaları yeterli düzeyde bulunmamaktadır. Yer kabuğunun yüzeye yakın kesimlerindeki iletken ısı akısının ortaya konması ile levha tektonik aktivitesinin yakın tarihini-ilişkisini anlamak (Erkan ve Blackwell, 2008, 2009), kabuktaki kırılğan-sünek (brittle-ductile) yapı değişimlerinin geçiş derinliğini belirlemek (Bonner ve ark., 2003) ve bir bölgenin jeotermal enerji potansiyelini tahmin etmek (Tester ve ark., 2006; Serpen ve ark., 2009) açısından önem arz etmektedir (Erkan, 2015). Batı Anadolu Bölgesi yüksek entalpili jeotermal sistemleri içerdiğinden jeotermal enerji gelişiminde dikkat çekmektedir (Serpen ve ark., 2009). Türkiye'de en yüksek sıcaklıktaki (120-240 °C) jeotermal sistemler Menderes Masifi'nin derin grabenlerinin kenarları boyunca oluşmuştur ve derin faylar boyunca yüzey sularının sirkülasyonu ve Menderes horst-graben sisteminin tabanından gelen yüksek ısı akısı ile ilişkilidir (Erkan, 2015). Blackwell (1978) kıtasal bölgelerde 105 mW/m²'yi aşan ısı akısı değerlerinin üst kabukta kısmi ergime ve bununla ilgili silisli magmatik/volkanik aktivite anlamına geldiğini öne sürmüştür.

Genel olarak Türkiye ve çalışma alanını içine alan Batı Anadolu bölgesinde gerçekleştirilen ısı akısı hesaplama çalışmaları yetersiz sayıda kuyu ve termal iletkenlik bilgisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (İlkışık, 1989, 1991, 1992, 1995, 2008; Tezcan ve Turgay 1991; Hisarlı, 1995; Pfister ve ark., 1998; Yemen, 1999; Dolmaz ve ark., 2005a; Bilim, 2007; Akın ve ark., 2014; Erkan, 2015; Bilim ve ark., 2016; Erbek ve Dolmaz, 2019; Balkan ve ark., 2017; Balkan-Pazvantoğlu ve ark., 2021; Sayın ve Gürer, 2021). İlkışık (1992; 1995), kaplıcalar üzerinde silika jeotermometresi kullanarak Batı Anadolu'da bölgesel ısı akısı çalışmaları yapmıştır. 187 kaynaktan silika ısı akısı değerleri hesaplayarak ortalama ısı akısını 107±45 mW/m² olarak tahmin etmiş ve dünya ortalamasından %50-60 daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Menderes Masifi ve dolayısıyla grabenlerin yüksek ısı akısı bölgesi olduğunu ve silika ısı akısının Gediz-Eynal-Simav civarında en yüksek değere (247 mW/m²)

sahip olduğunu (İlkışık, 1992) ve Aydın ve çevresinde ise 45 mW/m^2 ile 170 mW/m^2 arasında olduğunu belirtmiştir (İlkışık, 1995). Ege Denizi'nde gerçekleştirilen ısı akısı ölçümlerinde tektonik zonlar boyunca üç yüksek ısı akısı zonu tespit edilmiş olup en yüksek ısı akısı Ege volkanik yayının içinde ve arkasındaki bölgelere karşılık gelmektedir (Fytikas, 1980; İlkışık, 1995). 100 mW/m^2 'ye varan yüksek silika ısı akısı alanları ile Tersiyer ve daha genç volkanizma alanları arasında yakın bir ilişki vardır. Eosende çarpışma bölgesi ile yakından bağlantılı olan ve sismik olarak aktif bir bölge olan orta Batı Anadolu bölgesinde ise yaklaşık 150 mW/m^2 'ye sahip ısı akısı tespit edilmiştir. Isı akısı ve sismisite arasındaki ilişki incelendiğinde ise sismik aktivitenin yoğun olduğu alanların yüksek ısı akısı alanlarına denk geldiği gözlenmiştir (Dolmaz ve ark., 2005b). Menderes Masifi'nde yaklaşık 100 mW/m^2 civarlarında olan ısı akısı söz konusudur, buna karşılık nispeten daha az deprem olduğu kayıtlara geçmiştir. Masifin kuzeyinde ise 200 mW/m^2 'den daha yüksek ısı akısı, İzmir-Ankara çarpışma zonu çevresinde yoğun merkez dağılım alanı ile çakışmaktadır (İlkışık, 1995). İlkışık (2008) Ege Bölgesi'nde silika ısı akısı değerini Aydın-Ömerbeyli'de açılan derin kuyu (2000 m) için 284 mW/m^2 olarak tespit etmiştir. Oldukça yüksek olan bu ısı akısı değerinin bir ölçüm hatası mı olduğu yoksa hazne kayaya ulaşımın mı söz konusu olduğunun bilinmediği belirtilmiştir. Yemen (1999)'in çalışmasında Ege Bölgesi'ndeki sondaj kuyuları kullanılarak jeotermal gradyan yöntemi ile yapılan ısı akısı çalışmaları neticesinde Ege Bölgesi'nin genel olarak yüksek ısı akısı anomalilerine sahip olduğu görülmektedir. Tezcan ve Turgay (1991) tarafından ortaya konan Türkiye ısı akısı haritasının bir parçası olarak yer alan Batı Anadolu'da detaylı ısı akısı çalışması Erkan (2015) tarafından, iletken ısı akısının belirlenmesi için ~ 100 m derinliğe sahip 113 sondaj kuyusundan yüksek çözünürlüklü denge sıcaklıklarının analiz edilmesidir. Veri işlem ile 55 noktada gradyan ve ısı akısı hesabı yapılarak ortalama $55\text{-}70 \text{ mW/m}^2$ ve yüksek $85\text{-}95 \text{ mW/m}^2$ arasında değişen ısı akıları tespit edilmiş ve Batı Anadolu bölgesi için ısı akısı haritası oluşturulmuştur. Elde edilen ısı akısının en yüksek değerleri ($> 100 \text{ mW/m}^2$) Kula volkanik merkezine yakındır. Dolmaz ve ark. (2005a) da aynı bölgede Curie Nokta Derinliklerine dayanan çalışmasında benzer sonuçları elde etmiştir. Orta seviyede ısı akısı değerleri Hellenik yitim zonunun yay arkası bölümünü oluştururken, Menderes Masifi'nin orta kesiminde yüksek ısı akısı değerleri görülmektedir. Tezcan ve Turgay (1991)'in derin kuyulardan (~ 1000 m) alınan kuyu dibi sıcaklık verileri ve sabit bir ısıl iletkenlik ile oluşturulan Batı Anadolu bölgesi ısı akısı haritası genel olarak Erkan (2015)'dan daha yüksek ısı akısı değerlerine sahiptir. Akın ve ark. (2014) Türkiye geneli ısı akısı ölçümleri ile Türkiye'nin jeotermal potansiyelini değerlendirmiştir ve yeni jeotermal alanlar keşfetmişlerdir. Manyetik verilerin Curie Nokta Derinliği ve güç spektrumlarından Türkiye'nin ortalama ısı akısının 74 mW/m^2 olarak hesaplandığı çalışmada $125,7 \text{ mW/m}^2$ 'den yüksek alanlar jeotermal potansiyeli olan alanlar olarak değerlendirilmiştir. Türkiye jeotermal alanlarının %79'u Batı Anadolu bölgesi sınırları içerisinde bulunduğu ve Türkiye'nin en önemli jeotermal potansiyeli olan bölgenin 200 mW/m^2 'yi aşan ısı akısı değerleri ile Aydın ve çevresine karşılık geldiği tespit edilmiştir. Balkan ve ark. (2017) Batı ve Orta Anadolu bölgelerindeki toplam 240 kaya örneğinin (136 kaya örneği Batı Anadolu bölgesine aittir) ısıl iletkenliğini

inceleyerek bu bölgelerdeki ısı akısı ve jeotermal modelleme çalışmalarına katkı sağlayabilecek ve önemli farklar yaratabilecek farklı kaya türleri arasındaki termal iletkenlik değerlerindeki farklılıklarını ortaya koymuşlardır. Buna göre, Batı Anadolu bölgesinde incelenen kaya örnekleri neticesinde kuru ortamların termal iletkenliği 0,7 W/mK ile 3,09 W/mK arasında değişmektedir. Balkan-Pazvantoğlu ve ark. (2021) tarafından Batı Anadolu bölgesi için 21 adet jeotermal gradyan ve 19 adet ısı akısı hesabı yapılmış ve bunlara ek olarak Erkan (2015) tarafından termal iletkenliğin olmaması sebebi ile eksik bırakılan 12 jeotermal gradyan hesabı bu çalışma ile yapılarak ve Pfister ve ark. (1998) verileri de eklenerek toplam 33 yeni ısı akısı verisi ile ısı akısı haritası genişletilmiştir. Ortaya konulan yeni ısı akısı çalışmasında genel olarak yoğun tektonik aktivite nedeniyle Menderes Masifi'nin grabenleri çevresinde yüksek değerler gözlenmektedir. Maksimum ısı değeri Büyük Menderes ve Gediz grabenlerinin kesiştiği noktada görülmektedir. Sayın ve Gürer (2021) tarafından yapılan yeni bir ısı akısı hesaplama yöntemi ile ısı akısı haritası Dolmaz ve ark. (2005a)'nın Curie nokta derinlikleri kullanılarak elde edilmiştir. Kuyulardaki doğrudan jeotermal gradyanları ile dolaylı Curie sıcaklık gradyanları arasında bir korelasyon kuran yeni bir ampirik hesaplama yöntemi önerilen çalışmada Batı Anadolu'da jeotermal gradyan doğru ölçülemeyen kuyular için jeotermal gradyan değerleri tahmin edilerek Batı Anadolu'nun daha eksiksiz bir jeotermal gradyan haritası ve dolayısıyla daha eksiksiz bir ısı akısı haritası elde edilmiştir.



Şekil 1. Ege bölgesi jeotermal kaynakları haritası (URL-1)

Aydın bölgesi Büyük Menderes Havzası üzerine kurulmuştur ve 8007 km²'nin %21 alanını ova, %63,4'ünü dağlar ve %15,6'sını da platolar kaplamaktadır. Egeran ve Yener (1944) ilk defa Menderes Masifi ismini kullanarak bölgeyi haritalamıştır. Nebert ve Ronner (1956), Menderes Masifini ve çevresini albitizasyon olayları çerçevesinde incelemişlerdir. Schuiling (1958; 1962), çekirdeği oluşturan gnaysların kökenini, zirkonları incelemiş ve masifin yapısı, yaşı ve petrolojisi üzerine çalışmalar yapmıştır. Bölgenin jeolojisi, petrografi ve metamorfizma üzerine pek çok araştırmalar yapılmıştır (Wippen, 1964; Graeiansks, 1965; Akartuna, 1965; Ketin, 1966; Brinkmann, 1966; 1971; Scotford, 1969; Başarır 1970; İzdar, 1971; Ayan, 1973; Dora, 1975). Batı Anadolu'da genel olarak Aydın ilinde, geniş bir yayılım gösteren Menderes Masifi ve çevresindeki kaya birimleri yüzleşmektedir (Şenol, 2013). Aydın bölgesinin genel jeolojik yapısı Paleozoik, Mesozoik, Tersiyer ve Kuvaterner benzeri formasyonlar oluşturmaktadır (Koday ve Akbaş, 2018). Çalışma yapılan arazide özellikle üçüncü döneme ait büyük aflörmanlara (sıcaklık ile birbirine kaynamış büyük parçalı volkanik tüf) rastlanmıştır. Bu yörede yapılan çalışmalar sonucunda, neojen arazilerin büyük bir alan kapladığına dair veriler elde edilmiştir (Akartuna, 1965). Aydın bölgesinde Menderes Masifi geniş bir yayılım göstermektedir, bölgenin oluşumu Alpin ve Hersinyen hareketleri sonucunda meydana gelmiştir. Bölgenin oluşumunu sağlayan en eski zaman olan paleozoik denizinde çöken formasyondan kaynaklı en alt katmanı gnays kayalar bulunmaktadır. Formasyonun üst kısımlarda ise; mikaşist, kil, killi şist, kuvarsit ve mermer görülmektedir. Özellikle gnays ve mikaşistler çok fazla görülmektedir ve bu ortam Hersinyen veya daha eski hareketlerin sonucu olarak yorumlanmaktadır (Şenol, 2013).

Kabukta üretilen ısı akısının bir bölümü aktif tektonik hareketlerden kaynaklanır, diğer kısmı ise radyojenik ısı akısıdır. Ölçülen ısı akısı değerleri jeolojik yaşa göre de değişebilir. Prekambriyen kalkanlar gibi yaşlı formasyonlarda düşük iken, Senozoyik gibi genç kıvrımlarda yüksek ısı akısı değerleri ölçülmüştür. Genç havza oluşan bölgeler ısı akısı açısından çok önemlidir. Dalma – batma zonları, levha çarpışmaları ve graben yapılarında ısı akı değerleri yüksektir. Rift oluşumlarında, genç kıvrımlarda, okyanus ortası sırtlarında ve fay zonlarında ısı akı değerleri yüksektir.

Ege Bölgesi jeolojik ve tektonik açıdan önemli ve araştırılması gereken bir bölgedir. Bölge deprem açısından birinci derece deprem kuşağında yer almaktadır. Ege Bölgesi tektonik olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapılan çalışmalar sonucunda tek bir fay hattından söz etmek mümkün değildir. Birbirinden bağımsız ve odak çözümleri farklı birçok önemli fay hattı bulunmaktadır. Bulunan bu fay hatlarının dışında belirlenemeyen birçok fayın ise, depremler sayesinde varlığı anlaşılmaktadır. Aydın ilinin yer aldığı Ege Bölgesi günümüze kadar birçok depreme maruz kalmıştır ve içinde bulunduğu tektonik olayların sonucunda bölgede birçok jeotermal sahası ortaya çıkmıştır. Şekil 2 ile çalışma alanı, çalışma kapsamında ısı akısı hesaplanan kuyular ve MTA Yerbilimleri Harita Görüntüleyici ile oluşturulan Büyük Menderes Masifinde Aydın ve çevresinde tespit edilen faylar gösterilmektedir (koordinat sistemi WGS 84). Fayların yoğun olarak gözlemlendiği çalışma alanında yüksek jeotermal potansiyel söz konusudur. Ege Bölgesi'nin aktif tektonik hareketleri iki jeolojik olay doğrultusunda

şekillenmektedir. Bu iki jeolojik olayların ilki Arabistan levhasının sıkıştırması, diğer olay ise Ege dalma-batma zonunun hareketleri sonucudur. Ege Bölgesi tektonizma hareketlerine bakıldığında günümüzde aktif bir bölgedir. Batı Anadolu levhasında Kuzey – Güney gerilmesi sonucunda her yıl 3-6 cm gerilme meydana gelmektedir, bu hareketlerin sonucunda Doğu – Batı yönünde grabenler oluşmuştur (Dündar, 2010). Fay doğrultuları üzerinde devamlı sismik hareketler tespit edilmektedir. Yer bilimciler Ege Bölgesi'ndeki deprem hareketliliğinin levha ve kıtaların deformasyonları sonucunda olduğunu belirtmişlerdir. Fay düzlemleri mostra verdikleri kısımlarda genellikle düz olarak görülmekte, nadiren ovaya doğru hafif konkavlık göstermektedirler. Bölgede ayrıca metamorfik ve sedimentler arasında bulunan faylardan sıcak sular çıkmaktadır (Arpat ve Bingöl, 1969).



Şekil 2. a) Çalışma bölgesi haritası, b) Aydın ve çevresinde tespit edilen faylar (Emre ve ark., 2013'ten değiştirilmiştir), c) Kuyular; Kuyu 1; E1, Efeler kuyu 1'i ve Kuyu 2: E2, Efeler kuyu 2'i temsil etmektedir.

Ege bölgesindeki faylarla ilgili sismik aktivite, hem tarihsel (Nazilli depremi: 19 Aralık 1645; Menderes depremi: 20 Eylül 1899; Güzelhisar/Aydın depremi: 22 Şubat 1653), hem de aletsel deprem gözlemleriyle tespit edilmiştir (Ambraseys ve Finkel, 1987, 1995; Altunel, 1999; Ocakoğlu ve ark., 2013; Kaya, 2015). Çalışma alanına ait fay ve deprem haritası incelendiğinde bölgenin yoğun sismik aktiviteye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Büyük Menderes grabenindeki depremlerin odak derinlikleri 5 ile 13 km derinliklerde dağılmış ve 5 ile 6 km derinliklerde yoğunlaşmıştır (Kaya, 2015). Aydın ve çevresi Ege Graben Sistemi içerisinde yer almaktadır ve genellikle D-B doğrultulu normal faylarla sınırlanan çok sayıda bloktan oluşmaktadır (Demirtaş ve Yılmaz, 1996; Yürekli ve Karaca,

2020). Büyük Menderes grabeninde Miyosen'den itibaren K-G ve D-B doğrultulu iki fay grubu gelişmiştir (Utku ve Sözbilir, 2003).

2. Materyal ve Metod

Isı akısı hesaplamalarında farklı yöntemler ve uygulamalar mevcuttur; Silika jeotermometresi ile ısı akısı hesaplama, Bullard yöntemi ile ısı akısı hesaplama, Jeotermal gradyanı ile ısı akısı hesaplama, Curie Nokta Derinliği ile ısı akısı hesaplama ve modelleme yöntemi ile ısı akısı hesaplama yöntemleri sayılabilir.

Jeotermal Gradyan ile Isı Akısı Hesaplama

Jeotermal gradyan; ısının iletimi esnasında sıcaklığın derinlikle değişimine denir. Jeofizik yöntemlerle ısı akısı hesaplaması yaparken sadece düşey yöndeki sıcaklık değişimleri dikkate alınır. Birbirine paralel yüzeyler içinde ısı akısı; ısı iletkenlik katsayısı ve jeotermal gradyanının çarpımına eşittir. Jeotermal gradyanı hesaplayabilmemiz için en az iki farklı derinlik sıcaklık ve derinliklerini bilmemiz gerekir. Ara derinlikteki kayaç ısı iletimi, ısı iletim katsayısını (λ) verir ve laboratuvarlarda ölçüm yapılır.

$$dT/dz = (T_2 - T_1)/(z_2 - z_1) \quad (1)$$

(Bullard, 1954; 1965). Burada,

dT/dz = Düşey doğrultudaki sıcaklık değişimi

T = Sıcaklık

z = Derinlik

bağıntısı jeotermal gradyanı hesaplamasında kullanılır.

$$q = \lambda \times (dT/dz) \quad (2)$$

(Gooch, 2011). q = Isı akısı

λ = Isı iletkenlik katsayısı

dT/dz = Düşey doğrultudaki sıcaklık değişimi

bağıntısı ile hesaplanır.

Curie Nokta Derinliği ile Isı Akısı Hesaplama

Curie sıcaklığı, ferromanyetik özellikteki bir maddenin kalıcı mıknatıslığını bırakıp paramanyetik hale geldiği sıcaklık noktasıdır. Yerkabuğu içerisinde kayaçların mıknatıslanma özelliklerini kaybettikleri bu seviyeye Curie Nokta Derinliği denir. Bu yöntemle ısı akısı hesaplamak için öncelikle manyetik

veriler ile Curie Nokta Derinlikleri tespit edilmelidir. Elde edilen Curie Nokta Derinlik verilerine en küçük karelerle ayırma yöntemi uygulanarak ısı akısı hesaplanır. Diğer aşamada Curie sıcaklığını 580°C kabul ederek Curie Nokta Derinliğinden jeotermal gradyan hesaplanmaktadır. Elde edilen jeotermal gradyan değerinden bağıntı (2) yardımı ile ısı akısı hesaplanmaktadır.

Curie Nokta Derinliklerinden elde edilen ısı akısı değerleri sediman vb. etkenlerden bağımsızdır. Kuyu verilerinden elde edilen ısı akısı değerleri ise sediman yapısı, yaşı ve çökelim kalınlığına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu da yöntemin avantajlı yönüdür.

Kuyularda Sıcaklık ve Diğer Ölçümler

Kuyuların sıcaklık ve parametreleri ihtiyaç olan bilgilere göre değişik tipte cihazlar kullanarak elde edilir. Jeotermal arama çalışmalarında kaynakları verimli ve ekonomik kullanmak için gereken bilgiler kuyu testleri ile elde edilmektedir. Kuyu testlerinde basınç ve sıcaklık ölçüm testleri en önemli aşamadır ve bu testler sondaj aşamasında başlayıp üretime kadar devam eder. Bu testler kuyu dinamik ve statik haldeyken yapılabilir. Bu testler Sıcaklık Logu, Gamma Ray Logu, SP Logu, Özdirenç Logu olmak üzere 4 yöntem kullanılarak yapılabilir.

Bu çalışmada Aydın'ın İncirliova bölgesinde yeni açılan iki adet kuyu ölçümleri kullanılmıştır. Efeler-1 kuyusu 3840 metrede tamamlanarak liner ile teçhiz edildikten sonra belirlenen program çerçevesinde suya tahvil edildikten sonra test çalışmalarına başlanmıştır. Kuyu öncelikle kompresör ile üretime alınarak temizlik akışı yapılmıştır. Akışkanın berraklaşması üzerine Water Loss, Enjeksiyon ve birkaç gün sonrasında Statik sıcaklık-basınç ve Coiled Tubbing ile nitrojen kullanılarak sıcaklık - basınç (PT) Build Up ve üretim değerleri rezervuar özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Statik Sıcaklık ve Basınç Ölçümleri

Sinker bar ile kuyu içi kontrolü yapılmış ve ardından Statik PT alınmıştır. İnilebilen maksimum derinlik olan 3840 m'de maksimum sıcaklık 247,07°C, statik basınç ise 5160,55 psi ölçülmüştür.

Dinamik Sıcaklık ve Basınç Ölçümleri

Efeler-1 kuyusu asit ve nitrojen sonrasında yaklaşık 14 saat akışta kalmış ve sonrasında kendiliğinden kesilmiştir. Yatay üretim vanası kapatılarak birkaç gün basınç birikimi için bırakılmış ve sonrasında 46 psi WHP basıncına ulaşınca vana açılmış ve üretim sağlanması üzerine ölçülere başlanmıştır. Üretim sürekli olarak 144-110 t/s debide devam etmiş ve ölçüler de ortalama Q:124 t/s üretim debisinde alınmıştır. Basınlardan p.i: 0,52 (t/s) bar olarak hesaplanmıştır. Üretim debisinin düşük olmasından dolayı kuyu dibinden itibaren kaynama oluşmakta ve bu da basıncın düşmesine neden olmaktadır. 3500 m'de statik-dinamik basınç farkı 235,37 bar olarak ölçülmüştür. Bu değer oldukça yüksektir. Bu metreden aşağıya iniş sağlanamamıştır. Bir köprü veya dolgu oluştuğu düşünülmektedir.

Basınç Yükselim (Pressure Build Up) Ölçüleri

Kuyu maksimum üretimde ortalama 124 t/s debide akışta tutulmuş, PT 3100 m'ye set edilmiş, WHP 32 psi iken Q: 124 t/s debide bir süre daha akış devam etmiş ve yatay vana 78 sn'de kapatılarak 237 dk build up için beklenmiş ve PT çekilerek test tamamlanmıştır. Build up ölçülerinden p.i: 0,66 (t/s) bar olarak hesaplanmıştır.

Su Kaybı (Water Loss) Testi

Efeler-1 kuyusunda WHP 860 psi basınçta ve ortalama 10 lt/sn debide su basılarak test yapılmıştır. 3500'de WHP basıncının yüksek olmasından dolayı TOOL'u riske etmemek için pompa kapatılmış ve tabana kadar ölçü bu şekilde alınmıştır. 3838'de 2 saat bekleme yapılmış, 3838-2000 m arasındaki sıcaklıklar ölçülmüş ve tam çıkış yapılarak test tamamlanmıştır. Test süresince 220 m³ temiz su kullanılmıştır.

Tek Debili Enjeksiyon (Tde) Testi

Basma sırasında WHP basınçlarının 900 psi seviyelerine çıkmasının görülmesi üzerine enjeksiyon testinde bu basınçları geçirmemek için tek debide enjeksiyon yapılması planlanmıştır. PT tool 2750 m'ye set edilmiş ve tek debide (Q = 10,5 lt/sn) 82 dk temiz su basılmış ve 75 dk fall off için beklendikten sonra test tamamlanmıştır. Test süresince ortalama 50 m³ temiz su kuyuya basılmıştır.

CT Kullanarak Nitrojen ile Temizlik Üretimi

CT Efeler-1 kuyu başına set edildikten sonra inişe başlamış ve yaklaşık 1800 m'den itibaren nitrojen basılarak kuyu tabanına kadar üretim haline iniş yapılmıştır. Kuyu tabanında da bir süre nitrojen basıldıktan sonra yine nitrojen basılarak çıkışa geçilmiştir. Çalışma sırasında üretimde bir kesilme olmayıp sıcaklık 130°C – 138°C arasında yatay hat üzerinde ölçülmüştür. Nitrojen kesildikten yaklaşık 20 dk sonra kuyudaki geliş de kesilmiştir. CT ile temizlik akışında toplam 16 ton nitrojen kullanılmıştır. Kuyu içinden çok miktarda kırıntı gelmiş, savak içerisi tamamen dolmuştur. Özellikle kuvars ağırlıklı kırıntılar bariz şekilde görülmüştür.

CT ile Asit Enjeksiyonu ve Nitrojen ile Temizlik Üretimi

Yapılan PT ölçümleri ve Water Loss testlerinde birden çok seviyenin varlığı nedeniyle uygulama kolaylığı açısından CT ile asitleme tercih edilmiştir. Bu kapsamda bir asit ve nitrojen programı oluşturularak çalışmalara başlanmıştır

Kuyuya uzun süre 3-8 bbl arasında su basılarak soğutulmuş ve hazırlanan %18 HCl karışımı program çerçevesinde ve 2 kademede kuyuya su ile ötelenmiştir. Asit sonrası ölme zamanı beklendikten sonra tekrar nitrojen ile kuyu tabanına kadar inilerek temizlik akışı yapılmış ve CT çekilerek çalışma tamamlanmıştır. Asit operasyonu sonrasında kuyuda kendiliğinden artezyen üretim gözlenmiş ve yaklaşık 14 saat kadar sürmüştür.

Savak-Silencer Üretim Testi

Kuyu bitirme testlerinde, üretim hesaplamaları savak-silencer yöntemine göre aşağıdaki tabloda yapılmıştır. Kuyu tam açıldığında WHP: 38 psi ve savak maksimum 13 cm, 189 t/s ölçülmüş ve yaklaşık 9,5 saat sonra debi 8 cm: 93 t/s değerine kadar düşmüştür. 9,5 saatlik zaman süresinde ortalama üretim yaklaşık 125 t/s olarak ifade edilebilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kuyu Test Önerileri

Kuyuda inilebilen maksimum derinlik 3840 m ve maksimum statik sıcaklık 247,08°C, statik basınç 355,85 bar olarak ölçülmüştür. Dinamik ölçüler WHP 30 psi iken Q= 124 t/s debide alınmıştır. Bu debide vana seviyesinde 120,5°C sıcaklık ve 32 psi basınç ölçülmüştür. 3505 m'de maksimum dinamik sıcaklık 228,42°C ve dinamik basınç 92,87 bar ölçülmüştür. Bu seviyede statik basınç 328 bar ölçülmüştür. Basınçlardan p.i: 0,52 (t/s)/bar olarak hesaplanmıştır. Bu değer üretim kuyusu için oldukça düşüktür. Bu değer 4-10 arasına artırılabilmesi durumunda doğal olarak debide de 200-300 t/s değerlerine ulaşılabilir. Bunun için kuyuda yeni geliştirme çalışmalarının planlanarak uygulanması gerekmektedir.

Flashing point noktası (kabuklaşma başlangıcı) 2000 m olarak görülmektedir. Debinin artırılabilmesi durumunda bu seviye 700-800 m'lere kadar yükselebilir. Build up ölçülerinden p.i: 0,66 (t/s)/bar olarak hesaplanmıştır. Ortalama produktivite indeksi 0,59 (t/s)/bar olarak hesaplanmıştır. Ana rezervuar zonu yaklaşık 200-230°C sıcaklık ve 2400-3500 m arası verilebilir. Üretimin büyük kısmı bu aralıklarda yapılmaktadır. 3800 civarında da az bir geliş olabilir. TDE testlerinden kuyunun i,i 0,75 (t/s)/bar olarak hesaplanmıştır. Bu değer re-enjeksiyon açısından düşüktür. Yüksek WHP basıncında re-enjeksiyon enerji kayıpları olmuştur.

Kuyu asit sonrasında üretime alındığında yaklaşık 14 saat üretimde kalmış ve kendiliğinden kesilmiştir. Birkaç gün sonra kuyubaşında WHP 45 psi olması üzerine tekrar açılmış ve 22 saat üretim yaptıktan sonra kesilmiştir. Gitgide kuyuda gelişme gözlenmiştir. Kuyu içi pompası kullanılarak üretim yaptırılması mevcut durumda önerilmemektedir. Kuyunun produktivite indeksi çok düşük olduğundan yeterli beslenmeyi sağlayamayabilir. Ancak kuyu içine 300-350 m'e tubing inilerek en az 5 günlük bir üretim yaptırılarak üretimin sürekliliğin gözlenmesi sonraki aşamaların planlanmasında yararlı olacaktır.

Kuyulara Ait Isı Akısı Hesapları

Çalışma kapsamında açılan iki kuyu için elde edilen 53,9±0,08 °C/km ve 40±0,12 °C/km jeotermal gradyan ile kuyu litolojisine dayanılarak efektif yöntem ile hesaplanan ısı iletkenlik değerleri kullanılarak bu kuyular için ısı akısı değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4 ve 5). Efeler 1 kuyusunda elde edilen çalışma alanının jeotermal gradyan değerleri 50 – 76°C arasında değişmektedir. Volkanik olmayan bölgelerde jeotermal gradyanı ortalama olarak kilometre başına yaklaşık 30°C'lik bir artışa

sahiptir (Ketin, 1982). Efeler 1 kuyusunda ölçtüğümüz jeotermal gradyan değerleri kıtaların ortalama değerinden yüksektir.

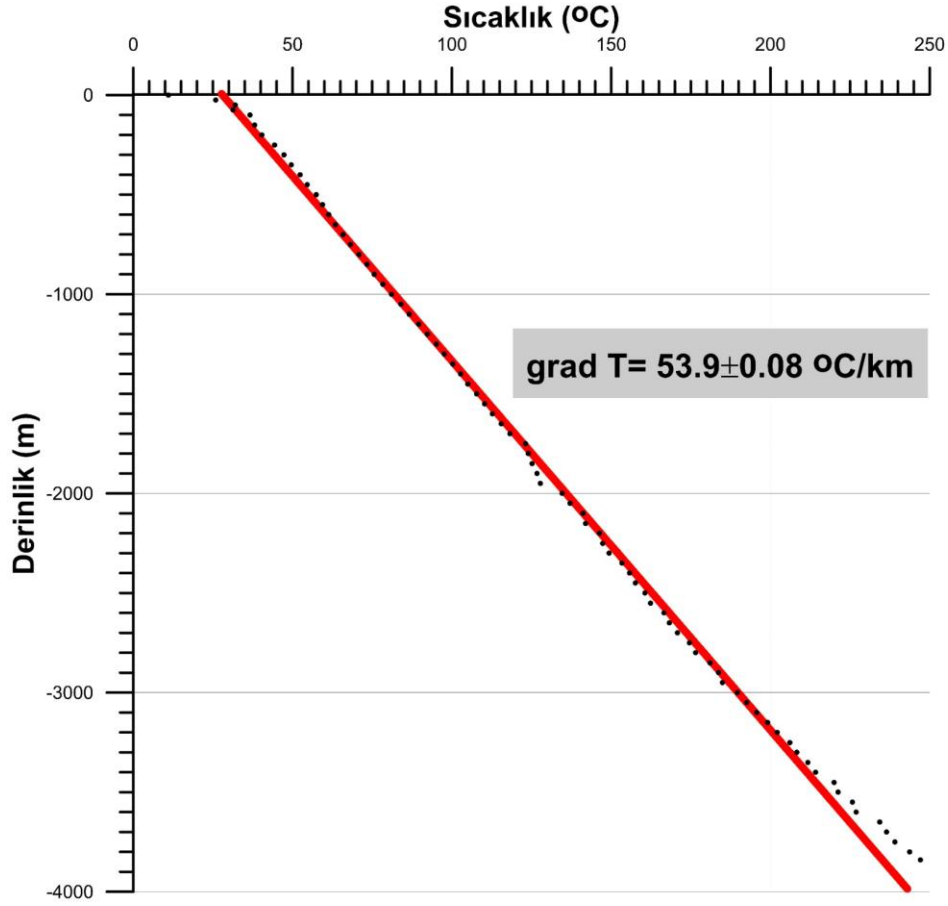
Efeler 1 kuyusu için efektif ısı akısı değeri hesabı, öncelikle bu kuyuya ait ortalama jeotermal gradyan $53,9 \pm 0,08$ °C/km sıcaklık değerlerinin derinliğin fonksiyonu olarak çizilerek bu noktalara En Küçük Kareler (EKK) tekniği ile geçirilen doğrunun eğiminden (dT/dZ) hesaplanarak gerçekleştirildi (Şekil 4). Ayrıca bu kuyu için sınıflandırılan dört ayrı tabaka için jeotermal gradyan değerleri sırasıyla $50,82$ °C/km, $52,72$ °C/km, $63,04$ °C/km ve $75,94$ °C/km olarak elde edildi. Bu kuyuda derinlere indikçe jeotermal gradyan yükseldiğini söyleyebiliriz (Ünal, 2022).

Efeler 1 kuyusu tabakalara ait elde edilen jeotermal gradyan ve 3840 m derinliğine kadar tespit edilen bu dört tabakaya ait ısıl iletkenlik katsayıları $3,228$, $1,921$, $3,745$, $4,284$ W/m°C (Yemen, 1999; Dolmaz, 2004) kullanılarak efektif ısıl iletkenlik değeri $2,75$ W/m°C olarak hesaplanmıştır.

$$\lambda_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{\lambda_i}} = \frac{1435+1265+800+340}{\frac{1435}{3,228} + \frac{1265}{1,921} + \frac{800}{3,745} + \frac{340}{4,284}} = \frac{3840}{444.55+658.51+213.62+79.36} = \frac{3840}{1396,04} = 2.75 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Buna göre elde edilen $2,75$ W/m°C ısı iletkenliği ve $53,9 \pm 0,08$ °C/km ortalama jeotermal gradyan kullanılarak Efeler 1 kuyusu için efektif yöntem ile ısı akısı hesabı aşağıdaki gibi yapılarak $148,23$ mW/m² gibi yüksek bir ısı akısı değerine ulaşılmıştır.

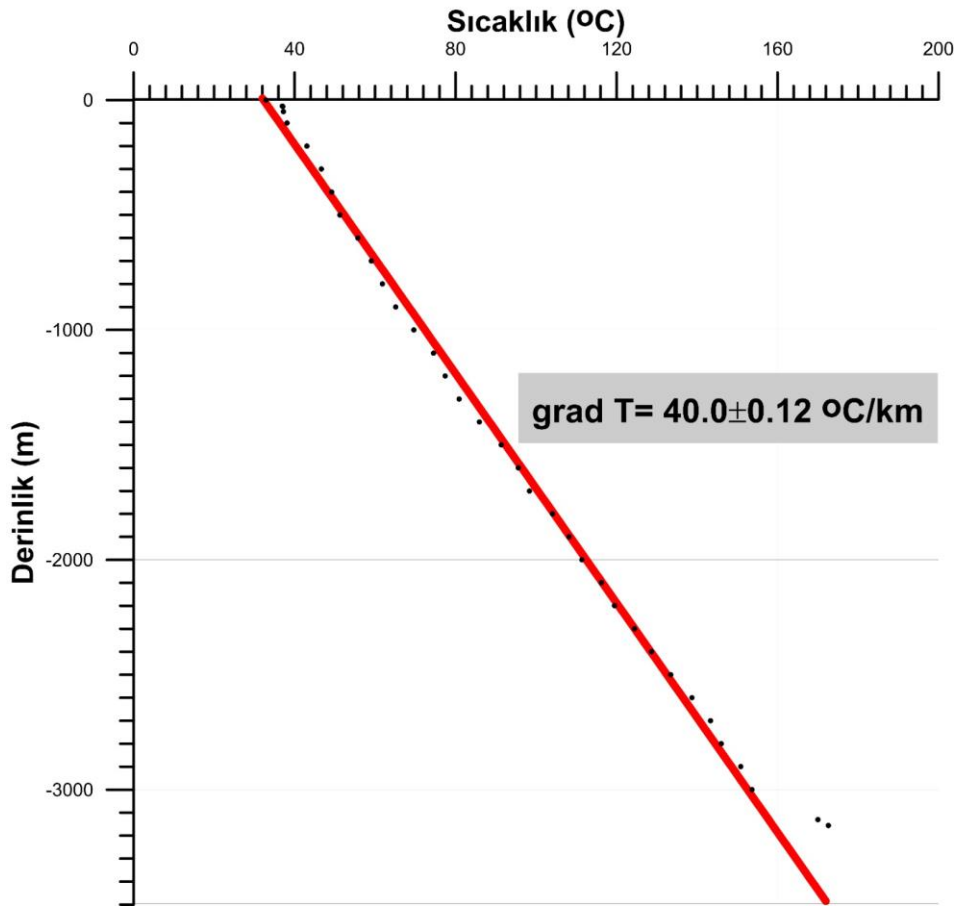
$$q = \lambda_{ef} \times grad T = 2.75 \times 54 = 2.75 \times 53.9 = 148,23 \text{ mW/m}^2$$



Şekil 4. Efeler 1 kuyusu jeotermal gradyan hesabı için derinlik - sıcaklık grafiği

Aynı bölgede daha sonraki zamanda açılan bir diğer kuyu olan Efeler 2 projesinden elde edilen değerleri kullanarak yine aynı yöntem ile ısı akısı hesaplaması yapılmıştır. Efeler 2 kuyusu için ısı akısı hesabı yapabilmek için, (dT/dZ) ortalama jeotermal gradyan EKK ile geçirilen doğrunun eğiminden $40\pm 0,12$ °C/km olarak hesaplanmıştır (Şekil 5). Buna göre elde edilen $2,75$ W/m°C ısı iletkenliği ve $40\pm 0,12$ °C/km ortalama jeotermal gradyan kullanılarak Efeler 2 kuyusu için ısı akısı hesabı bağıntı (2)'e göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır ve $110,0$ mW/m² ısı akısı değerine ulaşılmıştır.

$$q = \lambda \times \text{grad } T = 2,75 \times 40 = 110,0 \text{ mW/m}^2$$



Şekil 5. Efeler 2 kuyusu jeotermal gradyan hesabı için derinlik - sıcaklık grafiği

Elde ettiğimiz bu değer, bölgede yaptığımız diğer çalışmadan (Efeler 1) elde edilen ısı akısı ve ayrıca bölgede yapılan diğer çalışmalarla da yakın sonuçlar vermektedir ve yüksek ısı akısı olarak nitelendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında çalışma alanımızda bulunan her iki kuyu için efektif yöntem ile hesaplanan ısı akısı değerlerine ek olarak; Dolmaz ve ark. (2005a)'nın çalışmasında yer alan ve bu kuyuların da içerisinde bulunduğu 36 blok numaralı alan için Curie Nokta Derinliğinden elde edilen 49,57 °C/km jeotermal gradyan ile kuyu litolojisine dayanılarak efektif yöntemle hesaplanan ısıl iletkenlik değeri (2,75 W/m °C) kullanılarak 136,3 mW/m² ısı akısı değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$q = \lambda \times \text{grad } T = 2.75 \times 49.57 = 136,3 \text{ mW/m}^2$$

4. Sonuç

Batı Anadolu'da Ege Bölgesi'nde Aydın ili sınırları içerisinde İncirlioiva bölgesinde son zamanlarda yeni açılan kuyularda (Efeler-1 ve Efeler-2) kuyu içi termal bilgilerine dayanılarak ilk defa bu lokasyona ait kabuğun üst derinlikleri için ısı akısı hesabı yapılmıştır. Efeler 1 kuyusunda sondaj çalışmaları sırasında alınan numune ve daha öncesinde yapılan jeofizik çalışmalardan elde edilen

sonuçlarla tespit edilen tabakalar bölgenin formasyonu ile aynı özellikleri taşımaktadır (Tablo 1). Efeler 1 kuyusunun bulunduğu yerin istifini aslında üç ana bölüme ayırabiliriz. Tablo 2 ile Efeler 1 kuyusu istif özellikleri verilmiştir.

Bu çalışmada kuyular için (Efeler 1 ve Efeler 2) elde edilen ısı akısı değerlerinin (sırasıyla 148,23 mW/m² ve 110,0 mW/m²) Batı Anadolu'daki önceki çalışmalarda elde edilen ölçülerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tablo 1. Efeler-1 kuyusuna ait tabakalar ve kuyu içerik bilgileri

Tabaka sayısı	Derinlik (m)	Tabaka adı	İçerik
1	0-1435	(sedimanter istif)	Kumtaşı-konglomera-kiltaşı
2	1435-2700	(metamorfik)	Kuvars-mika şist
3a	2700-3500	(metamorfik)	Mermer içerikli şist
3b	3500-3700	(metamorfik)	Siyah şist

Efeler 1 kuyusunda elde edilen jeotermal gradyan 50 – 76°C aralığında tespit edilmiştir. Aynı bölgede yapılan bir diğer kuyu projesi olan Efeler 2 kuyusunda ise; kıtaların jeotermal gradyan değeri olan 30 - 50°C limitleri dâhilinde 40°C olarak bulunmuştur. Efeler 1 kuyu dibinde 3840 m'de 247,08°C sıcaklık tespit edilmiş iken, Efeler 2 kuyu dibinde 3156 m derinlikte ise 172,64°C sıcaklık tespit edilmiştir. Aynı derinlik olarak bakıldığında ise Efeler 1 kuyusunda sıcaklık ~199°C olduğu görülmektedir. Bu durum Efeler 1 kuyusundaki gradyanın daha yüksek olduğu ile açıklanabilir.

Dolmaz ve ark. (2005a) tarafından Batı ve Güneybatı Anadolu için havadan manyetik veriler kullanarak bölgenin Curie Nokta Derinliklerinin tahmini yapılmış ve haritası oluşturulmuştur. Bu çalışmada Efeler 1 ve Efeler 2 kuyularının konumları Dolmaz ve ark. (2005a)'daki 36 blok numaralı alan içerisinde yer almaktadır. 90 x 90 km alt blok alanlara sahip havadan manyetik verilerden tahmin elde edilen Curie Nokta Derinlikleri ve buna bağlı olarak ısı akısı hesaplamalarında jeotermal gradyan (Curie sıcaklığı 580 °C/Curie Nokta Derinliği) hesaplaması yapılmıştır. Dolmaz ve ark. (2005a) ısı akısı hesabı için arazide mostra veren yüzey örneklerinden alınan ölçümlerin ortalaması 2,127 W/m°C ısıl iletkenlik değeri kullanılmıştır. Bu blok için 11,7 km gibi sığ Curie Nokta Derinliği tahmini yapılırken, buna karşılık gelen ısı akısı 105,44 mW/m² olarak bulunmuştur.

Curie Nokta Derinliği tahmini ile hesaplanan ısı akısı açılan kuyulardan hesaplanan ısı akısı değerlerine göre bir miktar düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun nedeni Dolmaz ve ark. (2005a)'da arazi örneklerinden ölçülen numunelerin ısıl iletkenliği ortalamasının düşük çıkmasıdır. Hâlbuki açılan Efeler 1 kuyusu litolojisine göre efektif olarak 2,75 W/m °C ısıl iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Jeotermal suların, rezervuar kayaktan yüzeye çıkarken temas ettiği kayaların özellikleri, soğuk yeraltı

suları ile karışması, rezervuar kayacın atmosferle ilişkisini kesen geçirimsiz kayaçların çok ince olması gibi nedenlerden dolayı sıcaklıkları düşmektedir. Jeotermal çalışmaların ve derin sondajların maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple jeotermal çalışma yapılacak sahalarda gerekli ön çalışmalarda, jeofizik yöntemler ve rezervuar - derinlik hesaplanması önemlidir. Çalışma kapsamında 3840 m derinliğe sahip Efeler 1 kuyusu ve 3156 m derinliğe sahip Efeler 2 kuyuları ile ısı akısı hesaplanabildiği gibi, onlardan daha derin ve 11700 m (11,7 km)'lik bir üst kabuk için dolaylı yoldan hesaplanan jeotermal gradyan dayanılarak yerkabuğunun daha geniş bir skalası için 136,3 mW/m² olan bir ısı akısı hesaplanmış olması literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

İlkışık (1995) Menderes Masifi'nde ısı akısı değerinin yaklaşık 100 mW/m² civarlarında olduğunu ve Erkan (2015) Menderes Masifi'nin derin grabenlerinin kenarları boyunca 120-240 °C'lerinde jeotermal sıcaklığın hakim olduğunu belirtmiştir. Sayın ve Gürer (2021)'e göre ise batı Anadolu bölgesi için jeotermal gradyan ve ısı akısı değerleri incelendiğinde yüksek jeotermal gradyan ve ısı akısı alanları D-B ve KD-GB doğrultulu graben sistemleri ile örtüşmektedir. Buna bağlı olarak, jeotermal gradyan ve ısı akısının yüksek olduğu alanlar, kabuğun ince olduğu graben bölgesine karşılık geldiği ve güneybatı Anadolu için düşük ısı akısı ve düşük gradyan elde edildiği belirtilmiştir. Efeler 1 ve Efeler 2 jeotermal gradyan ve ısı akısı hesapları bu çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir.

Aydın Bölgesi'ndeki yaklaşık 1600-2000 m aralığında olan verimli kuyular, özellikle Germencik ve Buharkent bölgelerinde büyük santrallerde bulunmaktadır. Çalışma alanı olan Efeler 1 ve Efeler 2 kuyularında tespit edilen üretim derinliği 2400-3500 m aralığında olması ciddi bir fark yaratmaktadır. Derinliğin bu kadar fazla olması hem maliyet hem de yeraltındaki sıcak suyun yukarı çıkması sırasında sıcaklığın düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2. Efeler 1 kuyusu istif özellikleri

Derinlik aralığı (m)	Litoloji açıklaması
138-140	Kumtaşı: saydam, yarısaydam, beyaz, gri, yeşilimsi, köşeli-yarı köşeli, sert, iyi boylanmalı, gevşek kuvars ve metamorfik litik taneler
806-809	Konglomera: Yeşilimsi, gri, yumuşak opak ile yarısaydam arası, çok renkli çakıl boyutuna varan kuvars feldspat taneleri, yarı yuvarlak ile yarı köşeli, zayıf boylanmalı, kısmen iri ile çok iri taneli kumtaşı, zayıf karbonat çimentolu ve genel kil matriks, zayıf poroziteli Kiltaşı: plastik, yıkanabilir, açık gri, yumuşak
1482-1485	Kiltaşı: plastik, yıkanabilir, açık gri, yumuşak Kumtaşı: Saydam-yarısaydam, beyaz, gri, yeşilimsi, sarı, sarımsı, köşeli-yarı köşeli, sert, iyi boylanmalı, gevşek kuvars ve metamorfik litik taneler

1629-3563	Kuvarşist: Beyaz, saydam, orta sert, yersel kırılğan, dağılğan, kuvars ve mika içerikli
	Mikaşist: Beyaz, gri, kahvemsi, şiztoz, muskovit, biyotit
	Kuvarşist: Beyaz, saydam, orta sert, yersel kırılğan, dağılğan
	Mikaşist: Beyaz, gri, kahvemsi, şiztoz, muskovit, biyotit.
	Kuvarşist: Beyaz, saydam, orta sert, yersel kırılğan, dağılğan
	Mikaşist: Beyaz, gri, kahvemsi, şiztoz, muskovit, biyotit.
	Mermer: Beyaz, açık gri, gri, koyu gri, benekli, camsı, sıkı, sert, bloklu, karbonat ağırlıklı
	Mikaşist: Beyaz, gri, kahvemsi, şiztoz, muskovit, biyotit
	Mermer: Beyaz, açık gri, gri, koyu gri, benekli, camsı, sıkı, sert, bloklu, karbonat ağırlıklı
	Siyah şist: Siyah ve koyu gri renkli, metalik parlaklıkta, şiztozi kloritleşme, milonit
3574	Siyah şist: Siyah ve koyu gri renkli, metalik parlaklıkta, şiztozi kloritleşme, milonit

Teşekkür

Yazarlar, Prof. Dr. Ömer Elitok'a litoloji sınıflandırılması konusunda yardımları için teşekkür etmektedirler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Akartuna M. Nazilli-Aydın hattı kuzeyindeki versanların jeolojisi hakkında. Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi 1965; 65: 1-11.
- Akın U., Ulugergerli EU., Kutlu S. The assesment of geothermal potential of Turkey by means of heat flow estimation. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 2014; 149(149): 201-210.
- Altunel E. Geological and geomorphological observations in relation to the 20 September 1899 Menderes Earthquake, Western Turkey. Journal Geology Society 1999; 156: 241-246.

- Ambraseys NN., Finkel CF. Seismicity of Turkey and neighboring regions 1899–1915. *Annual Geophysics* 1987; 5B: 701–726.
- Ambraseys NN., Finkel CF. The Seismicity of Turkey and adjacent areas: a historical review, 1500–1800. Eren Publication, Istanbul, Turkey, 1995.
- Ari-es Enerji. İzmir ili Seferihisar ilçesi RSC-1 Seferihisar jeotermal enerji santrali 1/1000 ölçekli uygulama imar planı açıklama raporu. Arı-Es Enerji, T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, İzmir 2019.
- Arpat E., Bingöl E. Ege bölgesi graben sisteminin gelişimi üzerine düşünceler. *MTA Enstitüsü Dergisi* 1969; 73: 1-9.
- Ayan M. Gördes Migmatitleri. *Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi* 1973; 81:132-155.
- Balkan E., Erkan K., Şalk M. Thermal conductivity of major rock types in western and central Anatolia regions, Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering* 2017; 14(4): 909-919.
- Balkan-Pazvantoğlu E., Erkan K., Şalk M., Akkoyunlu BO., Tayanç M. Surface heat flow in Western Anatolia (Turkey) and implications to the thermal structure of the Gediz Graben. *Turkish Journal of Earth Sciences* 2021; 30: 991-1007.
- Başarı E. Bafa Gölü doğusunda kalan Menderes Masifi güney kanadının jeolojisi ve petrografisi: *Science Rep. Science Faculty, Ege Üniversitesi* 1970; 102.
- Bilim F. Investigations into the tectonic of Kutahya-Denizli region, lineaments and thermal structure western Anatolia, from using aeromagnetic, gravity and seismological data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 2007; 165(3-4): 135-146.
- Bilim F., Akay T., Aydemir A., Kosaroglu S. Curie point depth, heat-flow and radiogenic heat production deduced from the spectral analysis of the aeromagnetic data for geothermal investigation on the Menderes Massif and the Aegean Region, western Turkey. *Geothermics* 2016; 60: 44-57.
- Blackwell DD. Heat flow and energy loss in the Western United States, *GSA Memoirs* 1978; 152: 175–208.
- Bonner J., Blackwell DD., Herrin ET. Thermal constraints on earthquake depths in California, *Bulletin of the Seismological Society of America* 2003; 93: 2333–2354.
- Brinkmann R. Geotektonische gliederung von Westanatolien: *N.İb. Geol. Palaon.* 1966; 10: 603-618.
- Brinkmann R. Das kristalline grundgebirge von Anatolien: *Geol Rundsch.* 1971; 60: 886-899.
- Bullard EC. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1954; 222: 408–429.
- Bullard EC. Historical introduction to terrestrial heat flow, in: ed. by LEE WHK, *Terrestrial Heat Flow, Geophys. Mon.* 1965; No. 8, 1–6, American Geophysics Union, Washington.
- Demirtaş R., Yılmaz R. Türkiye'nin sismotektoniği. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara 1996.

- Dolmaz MN. Batı Anadolu'nun Güney Kesiminin Curie nokta derinliklerinin saptanması ve jeodinamik olaylar ile ilişkisi. İstanbul Üniversitesi Doktora Tezi (yayımlanmamış), 2004.
- Dolmaz MN., Hisarlı ZM., Ustaömer T., Orbay N. Curie point depths based on spectrum analysis of the aeromagnetic data. West Anatolian Extensional Province, Turkey, *Pure and Applied Geophysics* 2005a; 162(3): 571-590.
- Dolmaz MN., Ustaömer T., Hisarlı Z., Orbay N. Curie Point Depth variations to infer thermal structure of the crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey. *Earth, Planets and Space* 2005b; 57(5): 373-383.
- Dora OÖ. Menderes Masifinde alkali feldispatların yapısal durumları ve bunların petrojenetik yorumlarda kullanılması. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bulteni* 1975; 18(2): 111.
- Dündar, G. Ege Bölgesi'nin sismotektoniği. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, s.71. İzmir, Türkiye, 2010.
- Egeran, N., Yener, H. Notes explicatives de la carte geologique de la Turquie, Faille "Izmir" Publish Institute. MTA, 1944.
- Emre, Ö., Duman, TY., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. Şaroğlu, F. Açıklamalı Türkiye diri fay haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye, 2013.
- Erbek, E., Dolmaz, MN. Investigation of the thermal structure and radiogenic heat production through aeromagnetic data for the southeastern Aegean Sea and western part of Turkey. *Geothermics* 2019; 81: 113-122.
- Erkan, K., Blackwell, DD. A Thermal test of the post-subduction tectonic evolution along the California transform margin. *Geophysics Research Letters* 2008; 35: L07309.
- Erkan, K., Blackwell, DD. Transient thermal regimes in the Sierra Nevada and Baja California outer arcs following the cessation of Farallon subduction. *Journal of Geophysical Research* 2009; 114: B02107.
- Erkan, K. Geothermal investigations in Western Anatolia using equilibrium temperatures from shallow boreholes. *Solid Earth* 2015; 6(1): 103-113.
- Fytikas, M., Geothermal exploitation in Greece. In: Strub, A.S. and Ungemach, P.(Eds.). 2nd Int. Sem. on the Results of E.C. Geothermal Energy Research, Strasbourg. Reidel Publication Dordrecht 1980; 213-237.
- Graefianks, PDe. Menderes Masifi (Türkiye'nin GB'sı) metamorfik kayalarındaki grenaların yapısı hakkında; *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi* 1965; 65: 11-20.
- Gooch JW. Fourier's Law of Heat Conduction. In: Gooch J.W. (eds) *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. Springer, New York, NY. 2011.
- Hisarlı, M. Determination of Curie point depths in Edremit-Susurluk region, *Jeofizik* 1995; 9(10): 111-117.
- İlkışık, OM. Kuzeybatı Anadolu'da ısı akısı dağılımı. *Jeofizik*, 1989; 3: 83-91.

- İlkışık, OM. Batı Anadolu'da ısı akısı değerlerinin dağılımı. Mühendislik Jeolojisi Bülteni 1991; 12: 35-39.
- İlkışık, OM. Silica heat flow estimates and lithospheric temperature in Anatolia. Proceedings of XI.Conference of World Hydrothermal Organization 13-18.5, 1992, 92-106, İstanbul-Pamukkale.
- İlkışık, OM. Regional heat flow in Western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs. Tectonophysics 1995; 244: 175-184.
- İlkışık, OM. Ege Bölgesi'nde yerkaşının jeotermik yapısı, Teknik Rapor, İstanbul 2008.
- İzdar, KE. Introduction to geology and metamorphism of the Menderes Massif of Western Turkey. Petroleum Exploration Society of Libya 1971; 495-500.
- Jaeger, JC. Application of the theory of heat conduction to geothermal measurements terrestrial heat flow (Geophysical Monograph Series 8) ed H.K. Lee (Washington, DC: American Geophysical Union) 1965; 24-50.
- Kaya, A. The effects of extensional structures on the heat transport mechanism: an example from the Ortakçı geothermal field (Büyük Menderes Graben, SW Turkey). Journal of African Earth Sciences 2015; 108: 74-88.
- Ketin, İ. Anadolu'nun tektonik birlikleri: Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi 1966; 66: 20-34.
- Ketin İ. Genel jeoloji yer bilimlerine giriş cilt 1. İTÜ Maden Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi İstanbul, 1982.
- Koday, Z., Akbaş, F. Aydın İlinin idari coğrafya analizi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 57: 63-91.
- Nebert, K., Ronner, F. Menderes Masifiğinde ve çevresinde alpidik albitizasyon olayları; Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi 1956; 48: 83-96.
- Ocakoğlu, F., Açıklın, S., Güneş, G., Özkes, Dirik, K., Özsayın, E. Was the 1899 Menderes Valley Earthquake a double earthquake? Historical and Paleosismological Constraints. Journal Asian Earth Science 2013; 67-68:187-198.
- Pfister, M., Ryback, L., Şimşek, Ş. Geothermal reconnaissance of the Marmara Sea Region (NW Turkey): Surface heat flow density in an area of active continental extension. Tectonophysics 1998; 291(1-4): 77-89.
- Sayın, N., Gürer A. An approach for heat flow determination in the absence of geothermal gradient measurements: west Anatolia example. Arabian Journal of Geosciences 2021; 14: 381.
- Scotford, DM. Metasomatic augen gneiss in Greenschist facies, Western Turkey. Geology Society, America Bulletin 1969; 80: 1079-1094.
- Schuiling, RD. Menderes Masifine ait bir gözlü gnays üzerinde zirkon etüdü. Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi 1958; 51: 38-41.
- Schuiling, RD. On the petrology, age and structure of the Menderes Migmatites Complex (SW Turkey). Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi 1962; 58: 71-84.

- Serpen Ü., Aksoy N., Öngür T., Korkmaz ED. Geothermal energy in Turkey. 2008 update, *Geothermics* 2009; 38: 227–237.
- Şenol M. Aydın İli 2012 yılı çevre durum raporu. Aydın Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Aydın,2013.https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Aydin_icdr2012.pdf. (Erişim tarihi:17.01.202).
- Tester JW., Anderson B., Batchelor A., Blackwell D., DiPippo R., Drake E., Garnish J., Livesay B., Moore, MJ., Nichols, K., Petty, S., Toksöz, MN., Veatch Jr., RW., Baria, R., Augustine C., Enda, M., Negraru, P., Richards, M. The Future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- Tezcan AK., Turgay MI. Heat flow and temperature distribution in Turkey, ed. by: Cermak, V., Haenal, R., and Zui, V. *Geothermal Atlas of Europe*, Herman Haack Verlag, Gotha, Germany 1991; 84–85.
- Utku M., Sözbilir, H. Aydın-Nazilli Fayının paleosismolojik ön bulguları, Türkiye Kuvaterneri Çalıştayı-IV, Bildiriler Kitapçığı, Makaleler, s. 120-128, 29-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- Ünal G. Aydın Bölgesi'nde Yeni İki Kuyu'da ısı akısı hesabı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2022.
- Wipperf J. Menderes Masifinin Alpidik dağ teşekkülü için durumu. *Maden Tetkik ve Arama Enstitü Dergisi* 1964; 62: 71-79.
- Yanıktepe B., Parlak TK., Kara O. Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2021; 4(3): 452-465.
- Yemen H. Ege Bölgesi ısı akısı dağılımı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, s.101, Isparta, Türkiye, 1999.
- Yürekli H., Karaca Ö. Liquefaction potential analysis and mapping of alluvium soil: a case study in Nazilli-Aydın (West Turkey). *Celal Bayar University Journal of Science* 2020; 16(1): 15-23.
- URL-1 <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/jeotermal-harita/images/3.jpg>. (Erişim tarihi: 27.06.2022)