



AFYON-SANDIKLI JEOTERMAL ALANINDA DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJ (DES) ARAŞTIRMASI VE KUYULARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

M.Nuri DOLMAZ¹, Bilal ŞAHİN², H. Evrim TÜTÜNSATAR^{3*}, Çağlayan BALKAYA¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye

³ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gönen Meslek Yüksekokulu, Gönen/Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sandıklı,
Jeotermal,
Modelleme,
Elektrik Özdirenç.

Öz

Afyonkarahisar ili Sandıklı ilçe sınırları içerisindeki bir alanın jeotermal potansiyelinin araştırılması amacı ile bir elektrik özdirenç çalışması gerçekleştirilmiştir. Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak düşey elektrik sondajı (DES) tekniği ile toplanan toplam 6 adet veri kümesi bir ve iki boyutlu (1B ve 2B) modellenmiştir. 1B'li modellemede sönümlü en-küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler iyileştirmesine dayanan 2B'li modellemede yaklaşık K-G doğrultulu bir profil üzerinde toplam 6 DES noktası değerlendirilmiştir. Böylece jeolojik formasyonların yanal ve düşey yöndeki uzanımları, yeraltındaki su içeriği ve düşük özdirençli zonlar belirlenerek çalışma alanının jeotermal potansiyeli ortaya konmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, alandaki 15 ohm.m'den düşük özdirenç değerleri gösteren bölgelerde sondajlar önerilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada Afyon Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyuların ve kuyulardan elde edilen sıcak akışkanın fiziksel özellikleri bölgenin jeotermal enerji potansiyelinin ortaya konması amacı ile incelenmiştir. Sandıklı havzasındaki sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde, Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerlerinin çevredeki diğer alanlara göre yüksek olması (ortalama 65 °C) jeotermal kökenli rezervuarın bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir.

VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING (VES) INVESTIGATION AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE WELLS IN AFYON-SANDIKLI GEOTHERMAL AREA

Keywords

Sandıklı,
Geothermal,
Modelling,
Resistivity.

Abstract

An electrical resistivity study was carried out to investigate the geothermal potential of an area in Sandıklı, Afyonkarahisar. A total of 6 datasets collected by vertical electrical sounding (VES) technique using Schlumberger electrode array was modelled in one and two dimensions (1D and 2D). A damped least-squares method is used in 1D modelling. In 2D modelling based on smoothness-constrained linearized least-squares optimization, 6 VES points were evaluated on a profile with approximately N-S direction. The geothermal potential of the study area was investigated by determining lateral and vertical directions of the geological formations, groundwater content and low resistivity zones. As the results obtained from the study are taken into consideration, drillings have been proposed in the regions where the resistivity values are less than 15 ohm.m. Physical properties of wells and hot fluids obtained from wells in Sandıklı, Afyon geothermal area were investigated in order to reveal the geothermal energy potential of the region. When the temperature values obtained from shallow and deep wells in Sandıklı basin are evaluated, the temperature values in the wells directed to the west of Sandıklı town center are higher than the other surrounding areas (average 65° C). This situation indicates that geothermal-originated reservoir is concentrated in this region.

* İlgili yazar / Corresponding author: evrimtutunsatar@isparta.edu.tr, +90-246-281-2300

Alıntı / Cite

Dolmaz, M.N., Şahin, B., Tütünsatar, H.E., Balkaya, Ç., (2020). Afyon-Sandıklı Jeotermal Alanında Düşey Elektrik Sondaj (DES) Araştırması ve Kuyuların Fiziksel Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 439-450.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. N. Dolmaz, 0000-0002-9185-9835
 B. Şahin, 0000-0002-3630-3041
 H. E. Tütünsatar, 0000-0002-0712-3164
 Ç. Balkaya, 0000-0002-0191-8564

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	09.01.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	29.03.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.04.2020
Yayın Tarihi / Published Date	25.06.2020

1. Giriş (Introduction)

Ülkemizin enerji ihtiyacının sürekli artması, yeni jeotermal alanların araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada araştırma alanı olarak seçtiğimiz Afyon ili Sandıklı ilçesi, çeşitli jeotermal alanlar içermektedir ve sahip olduğu jeolojik yapı gereği bir jeotermal sistemin oluşumu için uygun bir ortam sunmaktadır. İlçede bulunan termal tesisler ve jeotermal yatırımlar bunun göstergesidir.

Mevcut olan bu kaynaklar daha önce gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Afyon il sınırları içerisinde jeotermal alanların belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarla Ömer-Gecek-Kızık-Uyuz, Gazlıgöl, Heybeli-Çay-Çobanlar ve Sandıklı jeotermal alanları ortaya çıkarılmıştır. Ömer-Gecek-Kızık-Uyuz alanında sıcaklıkları 46-128 °C arasında değişen kaynaklar tespit edilmiş ve bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmaları sonucunda Ömer-Gecek sahasında 49.5-128 °C sıcaklık ve 1600 lt/sn debiye sahip akışkan görünür hale getirilmiş ve 275.25 MWt termal güce sahip jeotermal enerji elde edilmiştir. Gazlıgöl alanındaki sıcaklıkları 38-68 °C arasında değişen kaynaklar, kuyular açıldıktan sonra kurumuştur. Sandıklı bölgesi içerisinde de Koçhisar, Hüdai Hamamı ve Kızılören bölgelerinden geçen KD-GB doğrultulu bir fay bulunmaktadır. Ana fayın etkisiyle fay çevresinde gelişen sentetik faylar da tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Afyonkarahisar ili Sandıklı ilçe sınırları içerisindeki bir alanda jeotermal su araştırması amacı ile toplam 6 noktada bir elektrik özdirenç çalışması "Düşey Elektrik Sondaj (DES)" tekniği ve Schlumberger elektrot dizilimi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile alanda bir jeotermal aktiviteyle ilişkili olabilecek düşük özdirenç zonlarının ve jeotermal rezervuarın belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada alanın mevcut durumunun jeolojik-litolojik açılarından incelenmesi ve olası jeotermal sondaj lokasyonlarının belirlenmesi amaçlanarak ilerleyen dönemde yapılacak sondaj ve test çalışmalarına baz alınması öngörülmektedir. Ayrıca bu çalışmada, Afyon-Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyuların ve kuyulardan elde edilen sıcak akışkanın fiziksel özellikleri incelenerek bölgenin genel durumu irdelenmiştir.

2. Çalışma Alanı ve Çevresi Kaynak Araştırması (Literature Survey for Study Area and Its Surrounding)

Çalışma alanı ve çevresini kapsayan bölgede jeotektonik ve jeofizik açıdan birçok yerli ve yabancı araştırmacı tarafından pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir.

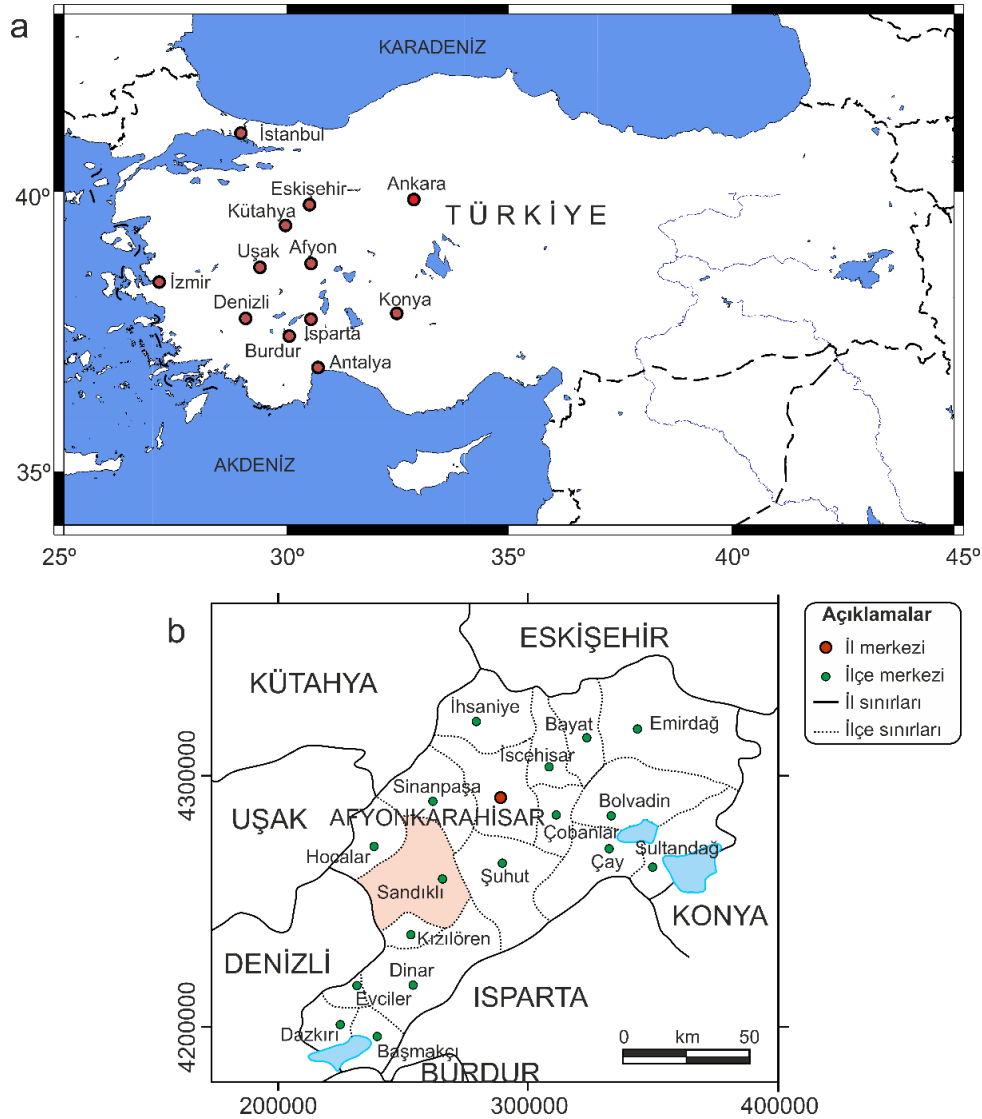
Müller (1955) tarafından yapılan Afyon vilayetindeki termal kaynaklar adlı çalışmasında Hüdai Hamamı yanısıra Gazlıgöl, Ömer, Gecek ve Kızıl Kilise jeotermal kaynakları hakkında bilgiler verilmiştir. Hüdai kaplıcasının bulunduğu alanın tektoniğinden söz edilmiş ve Hamamçayı vadisi boyunca oluşmuş sıcak su kaynaklarının iyi bir kaptaja tabi tutulması gereği vurgulanmıştır.

Ronner (1956) tarafından Hüdai hamamı termal kaynaklarına ve kaplıcalarına dair muvakkat rapor adı altında, bölgenin jeolojisi ve tektoniği, sıcak suların radyoaktivite özellikleri araştırılmıştır.

Ronner (1962) tarafından Sandıklı ovası tektonik ve volkanik açıdan değerlendirilmiştir. Sandıklı ovasının (Orta Anadolu) bir Neojen havzası çöküntüsü olduğu, iki kademededen oluştuğu ve alttaki kademenin Pliyosen-Kuvaterner'den, üstteki kademenin ise Miyosen'den meydana geldiği savunulmuştur. Ayrıca, Kuvaterner boyunca Hüdai hamamı sıcak su kaynaklarının oluştuğunu ve bunların çıkış ısısı ve radyoaktivite tenörü bakımından orta termal ve post volkanik bir safhaya ait olduğu sonucuna varılmıştır.

Şamilgil (1964) tarafından gerçekleştirilen Hüdai Hamamı (Sandıklı) hakkında jeolojik ve hidrojeolojik rapor isimli çalışmasında bölgenin jeolojisi ve tektoniği incelenmiş olup, sıcak suların kökenine dair değerlendirmeler yapılmıştır. Yüksek debide su temini için derin sondajların yapılması gereğini vurgulayan araştırmacı, kaynak civarındaki fayların düşeye yakın bir konuma sahip oldukları ve sondaj lokasyonlarının kaynaklardan çok uzakta olması gerektiği belirtilmiştir.

Öngür (1973) tarafından Sandıklı yerleşim merkezi ve civarının jeolojisi 1/25000 ölçekli olarak çalışılmıştır. Çalışmasında, jeomorfolojik ve tektonik özelliklere ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Sonuç olarak da hidrojeolojik ve jeotermal yönden jeofizik çalışmalarının yapılmasının gerekliliği ve önemi vurgulanmıştır.



Şekil 1. a, b) Çalışma alanı yer bulduru haritaları (Study area location maps)

Yenal vd. (1975) tarafından Sandıklı kaplıcası ile ilgili yapılan çalışmada, yörede bulunan sıcak su kaynaklarının kimyasal tahlil sonuçlarına göre; sular alkali, toprak alkali-acı ve bikarbonatlı sular olarak üç gruba ayrılmıştır. Tıbbi açıdan değerlendirmelerin de yer aldığı çalışmada, ileri aşamaya ulaşmayan romatizma vb hastalıkların terapötik tedavilerinde sıcak suların çok yararlı olduğu belirtilmiştir.

Afşin (1991) tarafından Sandıklı Kuruçay ovası ve Hüdai kaplıcasının ayrıntılı olarak hidrojeolojisi incelenmiştir. 450 km² lik bir alanda çalışılan inceleme sahasının temelini, Paleozoyik yaşlı epimetamorfiteğin oluşturduğu, bunların üzerine gelen birimlerin Mesozoyik ve Senozoyik boyunca Kuvaternere kadar yer yer kesikli olarak devam ettiği savunulmuştur. İnceleme alanına düşen yıllık ortalama yağış miktarının 474,93 mm, gerçek buharlaşma-terlemenin 380,74 mm olduğu, serbest ve basınçlı akiferlerde yeraltı suyu akım yönünün GD'dan KB'ya doğru olduğu belirlenmiştir. Hüdai kaplıcasında; sıcak ve mineralli su kaynaklarının K-G ve D-B doğrultusunda uzanan fayların birbirini kestiği noktalarda olduğu, sıcaklıklarının 46,5-70 °C, debilerinin ise 87,0-91,5 l/s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Afşin ve Canik (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, Sandıklı yerleşim merkezinde yeralan Hüdai kaplıcası detaylı olarak incelenmiştir. Hüdai sıcak ve mineralli su kaynaklarının K-G ve D-B yönünde uzanan fayların kesişme noktalarında açığa çıktığını ve kaynakların sıcaklık, pH, toplam debi ve toplam çözünmüş madde miktarlarının sırasıyla 62°C- 68°C, 6,2-7,5, 87-91,5 l/s ve mineral değerinin 1360-1750 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, kimyasal bileşimleri nedeniyle tedavi edici nitelikte olan kaynakların Ca, HCO₃, SO₄, SiO₂ 'li

radioaktif sıcak ve mineralli sular olduğu ifade edilmiş ve kaynakların farklı jeotermometreler kullanılarak ölçülen hazne kaya sıcaklığının 100 °C-250 °C arasında değiştiği belirtilmiştir.

Ölmez vd. (2000) tarafından Afyon- Sandıklı Hüdai kaplıcası çevresinde yapılan jeofizik çalışmaları sonucu AFS-3 nolu sondaj lokasyonu önerilmiştir.

Hamut ve Şengüler (2001) tarafından hazırlanan Afyon-Sandıklı (Hüdai) jeotermal sahası koruma alanları raporunda 1994 yılında yapılan AFS-1 ve AFS-2 sondaj verileri ile 2000 yılında yapılan AFS-3, AFS-4, AFS-5 ve AFS-6 sondaj verilerini baz alarak koruma alanları belirlenmiştir.

Koçyiğit vd. (2001) tarafından Batı Anadolu horst-graben sisteminin en doğu kesiminde yer alan Sandıklı grabeninin neotektonik özellikleri ve depremselliği incelenmiştir. Sandıklı grabeninin, verev atımlı normal faylarla (Akın, Kemer kayatepe, Ballık fayları) Miyosen sonunda gelişmeye başlamış, Geç Pliyosende başlayan ve Kuvaternerde de devam eden faylanmalarla (Gökçealan, Sandıklı, Maymunkayası ve Hüdaihamamı fayları) bugünkü geometrisini kazandığı ve bölgedeki fayların jeolojik olarak diri olduğu belirtilmiştir.

Özpinar vd. (2002) tarafından Sandıklı civarındaki volkanitlerin yayılımını belirlemek amacıyla öncelikle, 250 km² lik alanda 1/25 000 ölçekli jeolojik haritası yapılmış, daha sonra bölgedeki tüflerin teknolojik özelliklerinin saptanmasına yönelik laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Erdoğan vd. (2004) tarafından Sandıklı bölgesindeki temel birimler ayrıntılı olarak incelenmiş ve metamorfik temelde mikaşist, kuvarsit, fillit ve mermerlerin egemen oldukları belirlenmiştir.

Karaman deresi (2004) tarafından Afyon Sandıklı Hüdai Kaplıcası sıcak su sondajlarının (AFS-11, AFS-12, AFS-13 ve AFS-14) lokasyonları belirlenerek gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Karaman deresi (2008) tarafından AFS-14 nolu sondaj lokasyonu belirlenerek sondajın takibi gerçekleştirilmiştir.

Güngör vd. (2004) çalışmalarında, Sandıklı (Afyon) bölgesinde bulunan Erken Kambriyen yaşlı Kocayayla Grubu'nun deformasyon özelliklerini tanımlamışlardır. Kocayayla Grubu 2500 m kalınlığa ulaşan Erken Kambriyen yaşlı bir istif ile temsil edilmektedir. Bu istifin en altında, Erken Kambriyen simgeleyen iz fosilleri içeren fillit arakatlı kuvars kumtaşlarından oluşan Celiloğlu birimi bulunmaktadır. Gögebakan birimi, çört mercekleri, mafik volkanit ve kanal dolgusu çakıltası arakatlıları içeren metapelitler ve metapsammitlerden oluşur ve uyumlu bir dokanak boyunca Celiloğlu biriminin üstünde yer alır. Gögebakan birimi, tortul arakatlılar içeren riyolitlerden oluşan Kestel Çayı volkanitleri ile yan ve düşey yönde geçişlidir. Taşoluk biriminin fillit arakatlıları içeren sarı renkli kumtaşlarından oluşup uyumlu bir dokanak boyunca Kestel Çayı volkanitlerinin üstünde Kocayayla Grubunun en üst birimini oluşturduğunu savunmuştur.

Memiş (2010) tarafından Afyon Sandıklı Hüdai jeotermal alanının hidrojeokimyasal özellikleri belirlenerek iz element kirliliği incelenmiştir. Çalışma alanındaki jeotermal sular Na-SO₄-HCO₃ tipli sular, yeraltı suları ise Ca-HCO₃ tipli sular olarak sınıflandırılmıştır. Jeotermal sulara hakim iyon dizilimi, katyonlar için Na+K>Ca>Mg, anyonlar için SO₄>HCO₃>Cl olarak belirlenmiştir. İyon değişim diyagramları, jeotermal suların yeraltında uzun süre kalmadığını göstermektedir. Hüdai jeotermal alanındaki suların rezervuar sıcaklıkları silika jeokimyasal termometreleri ile 85-120 °C arasında hesaplanmıştır. Entalpi-silika ve entalpi-klorür karışım modelleri sırasıyla 108-134 °C ve 98-120 °C rezervuar sıcaklıkları önermektedirler.

Aksever (2011) tarafından yapılan çalışmada yarı kapalı havza özelliğindeki Afyon Sandıklı havzasının jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sandıklı havzasında en önemli sorunun yoğun tarımsal faaliyetler sonucu aşırı yeraltı suyu çekimi olduğu ve bu nedenle sürdürülebilir kullanım için su potansiyelinin belirlenmesinin büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir. Çalışma alanının orta kesimindeki hazne kayacın kuvarsit ve kireçtaşı olan Hüdai sıcak ve mineralli su kaynağının ise Na-SO₄'lı sular sınıfında olduğu belirtilmiştir. Özellikle Al, Fe, Ba ve Cd elementlerinde kaya-su etkileşimi ve sıcak su akiferi ile etkileşimde olan noktalarda yersel artışlar gözlenmektedir.

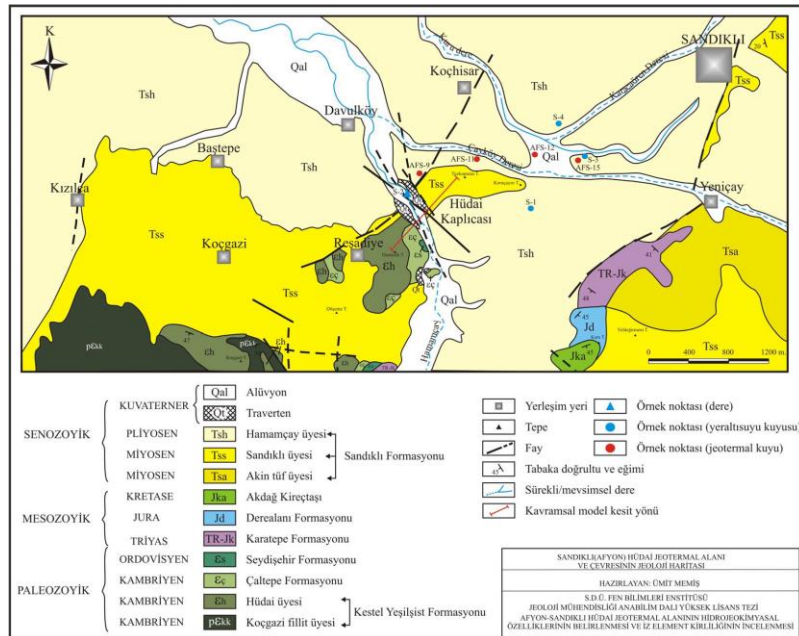
Oğuz (2011) tarafından Sandıklı'da jeotermal alanın temelini oluşturan Paleozoyik yaşlı kayaların sıcak suların ana rezervuarı olduğu ifade edilmiştir. Afyon Paleozoyik grubu olarak tanımlanan birimin metamorfize olmuş kesimi Kestel Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Paleozoyik yaşlı kayaların en üst seviyelerini Hüdai kuvarsit üyesi oluşturmaktadır. Bölgede yapılan arama ve üretim sondajlarından AFS-14 nolu sondaja ait kırıntı örnekleri üzerinde yapılan XRD analiz sonuçlarına göre; dolomit, kuvarsit, feldispat, kil mineralleri, zeolit, klorit, illit ve mika birliktelikleri saptanmıştır. Bu verilerden hareketle, bölgede potasik - albitik alterasyon ve 70 °C-110 °C'lik bir jeotermal ve/veya hidrotermal akışkan etkilerinden söz edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Dolmaz (2014) tarafından İç Batı Anadolu'daki sismik belirtisi olmayan zon ile Sandıklı alanının jeotermal yapısı arasındaki ilişki ile ilgili çalışma yapılmıştır. Yüksek sismik aktiviteli alanlardaki sismik olmayan zonlar ile jeotermal yapı arasında bir ilişki bulunduğu belirtilmiş ve sismik olmayan bu rejyonel zonlarda jeotermal yapılar hakkında arama çalışmalarının yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Dolmaz (2014)'e göre, Sandıklı yerleşimi de sismik olmayan Uşak-Afyon zonunda bulunduğu ve Sandıklı'nın jeotermal yapısının Afrika-Avrasya litosferik plaka sınırlarındaki tektonik hareketler ile ilişkili kontrol edildiği belirtilmiştir. Sismik aktif olmayan bu zonun kuzeyinde Gediz güneyinde ise Dinar son yüzyıl içerisinde büyük depremlere maruz kalmıştır. Sismik aktivite görülmeyen Uşak-Afyon zonunda ise elde edilen sığ Curie derinlikleri, yüksek ısı akısına sahip alanlar, yüksek düşey ısıl gradientler, bölgede üst kabuktaki incelmeye ve yüksek kondüktiviteli alt kabuğun sığlaşması büyük bir termal yapıdan kaynaklanmaktadır. Güneyde Dinar ve kuzeyde Gediz gibi iki rejyonel aktif sismik alan arasında kalan ve Sandıklı'yı da içine alan düşük sismik aktivitenin bulunduğu Uşak-Afyon zonu sığ Curie derinlikleri ve yüksek ısı akısı ile özdeşleşmiş olup rejyonel bir jeotermal yapıya sahiptir (Dolmaz vd., 2005; Dolmaz, 2014).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanının Jeolojisi (The Geology of Study Area)

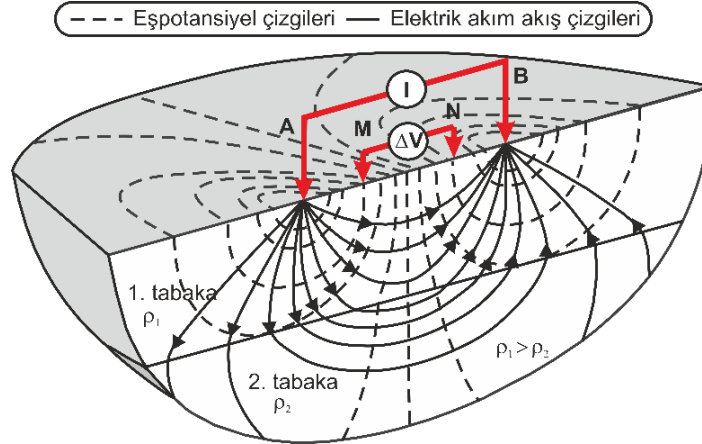
Hüdaî jeotermal alanı, Sandıklı ilçesi sınırları içerisinde Afyon iline 65 km uzaklıkta ve güneybatısında bulunmaktadır (Şekil 1 ve 2). Sandıklı ilçesi ve civarında Hamamçay kaynakları adı altında birçok sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Tabanda Koçgazi fillit üyesi çok düşük metamorfizmalı bej, kahvemsi bej renkli ince taneli kumtaşı, siyah ve kahve-mor renkli silttaşı ve bunlarla yer yer arakatlı metabazik sillerinden meydana gelmektedir (Şekil 2). Alt Kambriyen yaşlı Hüdaî Formasyonu çoğunlukla kuvarsitlerden meydana gelmekte ve yer yer şistlerle ardalanmalı olarak bulunmaktadır. Jeotermal sistemin örtü kayacını oluşturan Seydişehir Formasyonu miltaşı, şeyl ve kuvars kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. İstifin alt düzeylerinde ince, alacalı renkli ve yumrulu kireçtaşı bantları izlenmektedir (Afsin 1991; Özgül vd., 1991; Günay vd., 1995; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005). Üst Triyas-Alt Jura yaşlı Karatepe Formasyonu çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşlarından oluşur. Derealanı Formasyonu Alt Jura yaşlı olup, marnlı kumtaşı ile başlayıp, üste doğru kumlu, siltli ve killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanması şeklinde devam etmektedir. Üst Jura-Alt Kretase yaşlı olan Akdağ Formasyonu ise masife yakın breşik kireçtaşları ile başlar, yukarıya doğru çıkıldıkça çört bantları bulunan kireçtaşları ve daha üstte çört oranı artarak dolomitik özellikte kireçtaşları ile devam eder (Afsin, 1991; Özpınar, 2008). Sandıklı Formasyonu, Üst Miyosen yaşlı Akin tüf üyesi, Üst Miyosen yaşlı Sandıklı üyesi ve Pliyosen yaşlı Hamamçayı üyesinden oluşmaktadır. Kuvaterner yaşlı traverten ve alüvyon en genç çökellerdir (Afsin,1991; Özgül vd., 1991; Dean ve Özgül, 1994; Kozlu ve Göncüoğlu, 1995; 1997; Gürsu ve Göncüoğlu, 2005; Özpınar, 2008). Sandıklı jeotermal sahasının ısı kaynağını bölgedeki volkanikler oluştururken, Paleozoik yaşlı metamorfikler içindeki çatlak ve kırıklı şistler ve kuvarsitler rezervuar kayacını meydana getirir (Şekil 2).



Şekil 2. Sandıklı ve çevresinin jeoloji haritası (Memiş, 2010) (The geological map of Sandıklı and its surrounding)

3.2. Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) Yöntemi (Direct Current Resistivity (DCR) Method)

DAÖ yöntemi, görece maliyetinin düşük olması, kolay uygulanabilmesi ve oldukça verimli sonuçlar üretmesi nedeniyle arama jeofiziğinde özellikle; hidrojeoloji, jeotermal, maden/mineral araştırmalarında ve arkeolojik prospeksiyon çalışmalarında en çok uygulanan yer elektrik yöntemidir. Bu yöntemde, genel olarak yerinin jeolojik yapısı katmanların elektrik iletkenlik özelliklerinden yararlanarak araştırılır. Bu amaç için, yer yüzeyi boyunca gerçekleştirilen görünür özdirenç ölçümleri; iki elektrot yardımıyla yere elektrik akımının uygulanması ve diğer iki elektrot arasında oluşan potansiyel farkının ölçülmesi esasına dayanır (Şekil 3). Görünür özdirenç verileri, sondaj, profil ve sondaj-profil olarak tanımlanan üç farklı ölçü tekniği kullanılarak elde edilir ve toplanan veri kümeleri bir, iki ve üç boyutlu (1B, 2B ve 3B) ters çözüm teknikleriyle değerlendirilebilir.



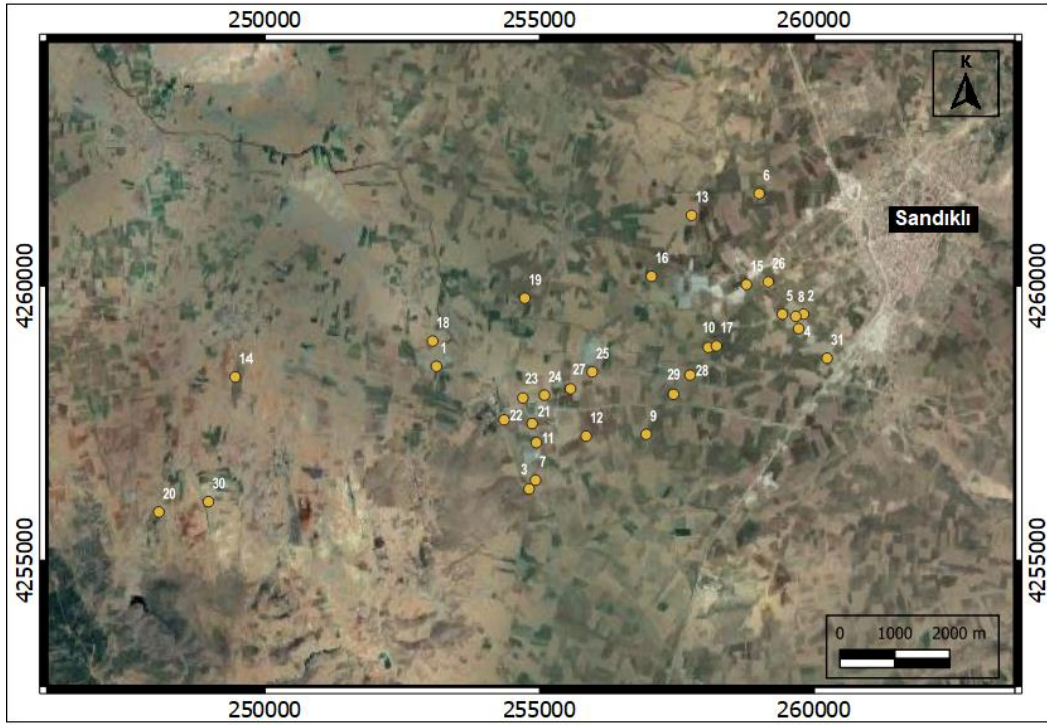
Şekil 3. DAÖ yönteminin temel çalışma prensibi (Seidel ve Lange, 2007'den düzenlenmiştir) (The basic application principle of DCR method)

Bu çalışmada, DAÖ yöntemi, DES tekniği kullanılarak toplam 6 profil üzerinde Schlumberger elektrot dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Görünür özdirenç veri kümeleri, genel olarak, minimum ve maksimum $AB/2$ değerleri sırasıyla 10 m ve 1200 m olan doğrultular üzerinde toplanmış ve nicel yorum için sönümlü en-küçük kareler yöntemiyle 1B ters çözüm uygulanmıştır. Değerlendirmede, başlangıç modeli olarak her bir DES belirtisindeki ortalama görünür özdirenç değerleri kullanılırken, Jacobian dizeyleri her bir yinelemeye ileri fark yöntemiyle hesaplanmıştır. Dizey terslemeleri için eşlenik türev en-küçük kareler yöntemi (Bjorck, 1996) kullanılmıştır. Ayrıca, yaklaşık K-G doğrultulu bir profil üzerinde bulunan toplam 6 DES noktası düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler iyileştirmesine dayanan bir ters çözüm tekniği (Uchida ve Murakami, 1990) ile 2B olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan 2B ters çözüm algoritması, ölçülen ve düz çözümde sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan görünür özdirenç veri kümeleri arasındaki çakışmazlığı en küçükleyerek her bir blokun özdirenç değerini yinelemeli olarak hesaplamaktadır. Algoritmanın jeotermal (Özürkan vd., 2006), arkeolojik prospeksiyon (El-Qady vd., 1999; Candansayar ve Başokur, 2001) ve çevre jeofiziği (Balkaya vd., 2009; Balkaya vd., 2012; Kaya vd., 2015) çalışmalarında başarılı uygulamaları bulunmaktadır.

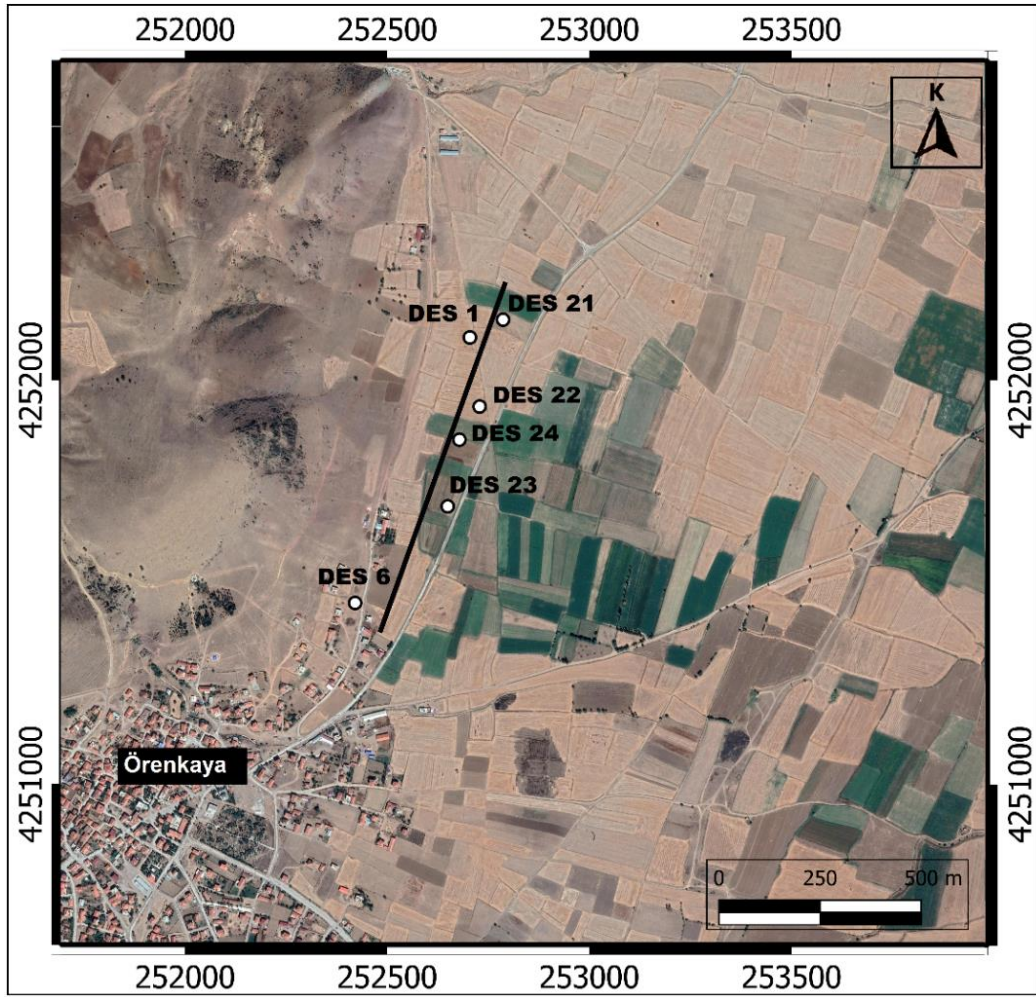
4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Arazide yapılan çalışmalardan elde edilen bütün sonuçların değerlendirilmesi, çalışma sahasında jeotermal ortamın olup olmayacağına yönelik olmuştur. Bu kapsamda Afyon Sandıklı bölgesinde yer alan çalışma sahaları içerisinde jeotermal potansiyelin araştırılmasına yönelik aşamalı olarak bölgede daha önce açılmış kuyulardan alınan sıcaklık değerleri değerlendirilmiş ve jeofizik yöntemlerden DAÖ yöntemi uygulanmıştır.

Araştırma sahasında çalışmalar genel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak açılan kuyuların lokasyonları belirlenmiş (Şekil 4) ve lokasyonları belirlenen birçok kuyudan sıcaklık değerleri alınmıştır. İnceleme alanındaki kuyuların koordinatları ve elde edilen sıcaklık değerleri sınıflandırılmış olarak renk ölçeği ile Tablo 1' de verilmektedir. Sandıklı ilçesi ve civarında bulunan sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde, çalışma alanı içerisinde sıcaklıkların homojen ve düzenli bir dağılım göstermediğini söyleyebiliriz. Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerleri çevredeki diğer alanlardaki kuyulara göre göreceli olarak daha yüksektir ve ortalama 65 °C seviyelerindedir. Buna rağmen yüksek ısıda akışkan bulunduran kuyulara yakın mesafedeki düşük sıcaklık (18-25 °C arası) içeren soğuk su kuyularının olmasında; bu kuyuların derinliklerinin sığ olması, kuyu teçhizat planları (kuyu çapı, boru dizaynı, çakıllama vb.) ve çıkarılan akışkanın kullanım amaçları (tarımsal sulama, hayvancılık vb.) önemli rol oynamaktadır.



Şekil 4. Çalışma alanındaki kuyuların konumları (Kuyu numaraları için Tablo 1'e bakınız) (The location of wells in study area)



Şekil 5. 2B ters çözümde kullanılan DES noktalarının çalışma alanı üzerindeki konumları (The locations of VES points used in 2D inversion)

Tablo 1. Şekil 4'te konumları verilen kuyuların sıcaklık durumuna göre sınıflandırılması (The classification of wells given in Figure 4 according to their temperature conditions)

KUYU NO	KUYU ADI	KOORDİNATLARI		SICAKLIK (°C)
		X	Y	
1	Halil Hilmi Kırkpınar kuyusu	4258633	253109	13.3
2	Belediye Terfi merkezi içme suyu	4259587	259798	14.3
3	Çelik Turşu Fabrikası-1	4256396	254797	14.6
4	Sandıklı Tarım kuyusu	4259321	259708	16.4
5	Mehmet Diker kuyusu	4259586	259412	16.4
6	Hidayet Kıymaz kuyusu	4261785	258989	17.8
7	Çelik Turşu Fabrikası-2	4256556	254915	18.2
8	ASS-1	4259546	259656	18.5
9	Sipsim 2 nolu içme kuyusu	4257393	256932	22.3
10	Selçiköyü kuyu güneyi	4258978	258064	24.6
11	Kadioğlu kuyusu	4257241	254930	26.4
12	İrfan Coşkun kuyusu	4257359	255837	26.6
13	Ali Yağcı kuyusu	4261388	257758	27.9
14	Beştepe kuyusu	4258439	249464	28.6
15	Sandıklı Beton kuyusu	4260127	258758	29.1
16	Şaban kuyusu	4260276	257026	36.1
17	Çakıcının kuyusu	4259005	258211	38.8
18	İshak Özbek kuyusu	4259094	253039	46.5
19	İshak Özbek Koç 1	4259877	254719	51.4
20	Aldosan 2 kuyusu	4255974	248074	61
21	Mevlüt Özçınar	4257589	254854	62.7
22	AFS-2	4257656	254342	66.8
23	AFS-9	4258055	254684	69.1
24	Sinanoğlu-1	4258107	255078	69.2
25	Okşanlar kuyusu	4258533	255946	71.5
26	Sanjet kuyusu	4260175	259155	76
27	Yaşarlar kuyusu	4258223	255551	78
28	AFS-11	4258473	257731	80
29	AFS-13	4258123	257428	80
30	Aldosan 1 kuyusu	4256163	248977	80
31	Aktürkler kuyusu	4258782	260227	85

Renk	Sıcaklık
	10°C-20 °C
	20°C-40 °C
	40°C-70 °C
	70°C-90 °C

Sandıklı jeotermal alanında bulunan suların kaynak başında ölçülen bazı kimyasal özellik değerlerine göre, Sandıklı sıcak su kaynakları asidik karakter taşımaktadır (Tamgaç vd., 2008; Oğuz, 2011). Sandıklı jeotermal alanında yer alan kuyu ve kaynaklardan alınan su örneklerinin analiz sonuçlarına göre, beslenmenin alanın doğu, batı ve güney kesiminden alana doğru bu bölgelerden geldiği Tamgaç vd. (2008) tarafından belirtilmiştir.

Sandıklı jeotermal alanındaki bazı kuyulardan elde edilen verilerle oluşturulan sıcaklık dağılımı haritasına göre; mevcut sıcak su kuyularının olduğu bölgeler en yüksek sıcaklıklı alanlardır (Tamgaç vd., 2008). Başlangıçta DSİ'den soğuk su ruhsatı olarak alınan 200-300 m derinliklere sahip ılık su kuyuları civarı bölgelerde suyun sıcaklığı 28-40 °C arasında değişmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen İshak Özbek Koç 1 jeotermal kuyusuna ait statik sıcaklık ve basınç ölçümleri Tablo 2'de verilmiştir. İshak Özbek'e ait Afyon ili Koçhisar köyünde bulunan jeotermal sahasındaki Koç-1 jeotermal kuyusunda alınan kuyu içi ölçümleri Datacan firmasının 1,25"DXB elektronik kuyu içi sıcaklık basınç ölçüm ve kayıt cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler yapılırken dakikada 40 metre halat çekebilen elektrikli wireline vinç kullanılmıştır. Yüzeiden itibaren 640 metreye kadar her 20 metrede bir, 640-900 metre arasında ise her 10 metrede bir, 1'er dakika beklenerek statik sıcaklık-basınç profili alınmıştır. Kuyu tabanı 900 metrede ölçülen sıcaklık 51,41 °C dir. Kuyu tabanı basıncı 84,73 bar_g'dir. Yeryüzünden derine inildikçe jeotermal ısının arttığı ve

kuyu içinde birkaç farklı gradyan gözlenmektedir.

Tablo 2. Çalışma alanındaki İshak Özbek Koç 1 kuyusuna ait statik sıcaklık ve basınç ölçümleri (Static temperature and pressure measurements of İshak Özbek Koç 1 well in the study area)

Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Derinlik (m)	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)
20	0.278168	20.085	398	36.312.928	41.287	716	66.727.077	47.371
40	2.113.654	25.753	417	38.296.061	42.745	726	67.679.987	47.537
60	4.001.597	27.463	437	40.175.781	42.729	736	68.631.455	47.492
80	5.907.887	29.151	457	42.080.225	43.221	746	69.577.683	47.718
99	7.828.236	30.961	477	43.977.361	43.324	755	7.052.452	48.144
119	971.506	32.524	497	45.988.639	43.505	765	71.479.375	48.465
139	11.622.561	33.989	517	47.771.837	43.769	775	72.420.421	48.759
159	13.543.716	35.11	537	49.679.572	44.143	785	73.359.907	48.933
179	15.429.334	35.749	557	51.586.111	44.494	795	74.314.626	49.231
199	17.319.961	36.221	577	53.449.115	45.043	805	75.269.994	49.2
219	19.320.357	36.414	596	55.367.341	45.306	815	76.213.893	49.07
239	2.113.995	36.882	616	57.252.795	45.849	825	77.165.103	49.248
258	23.056.468	37.453	636	59.147.397	45.98	835	78.102.735	49.624
278	24.967.248	37.953	646	60.097.859	46.175	845	7.904.213	49.855
298	26.862.834	38.311	656	61.029.399	46.304	855	79.982.463	50.038
318	28.766.703	38.825	666	619.837	46.227	865	80.936.088	50.221
338	30.675.788	39.503	676	62.939.571	46.243	875	81.884.507	50.347
358	32.575.114	40.032	686	63.898.472	46.41	885	82.850.134	50.671
378	34.484.091	40.55	696	64.847.433	46.842	895	83.802.224	50.892
398	36.312.928	41.287	706	65.783.182	47.182	902	84.732.465	51.41

Tablo 3. DES'ler 1, 6, 21-24 için 1B ters çözümden elde edilen katman parametreleri (Layer parameters obtained from 1D inversion for VES' 1, 6, 21-24)

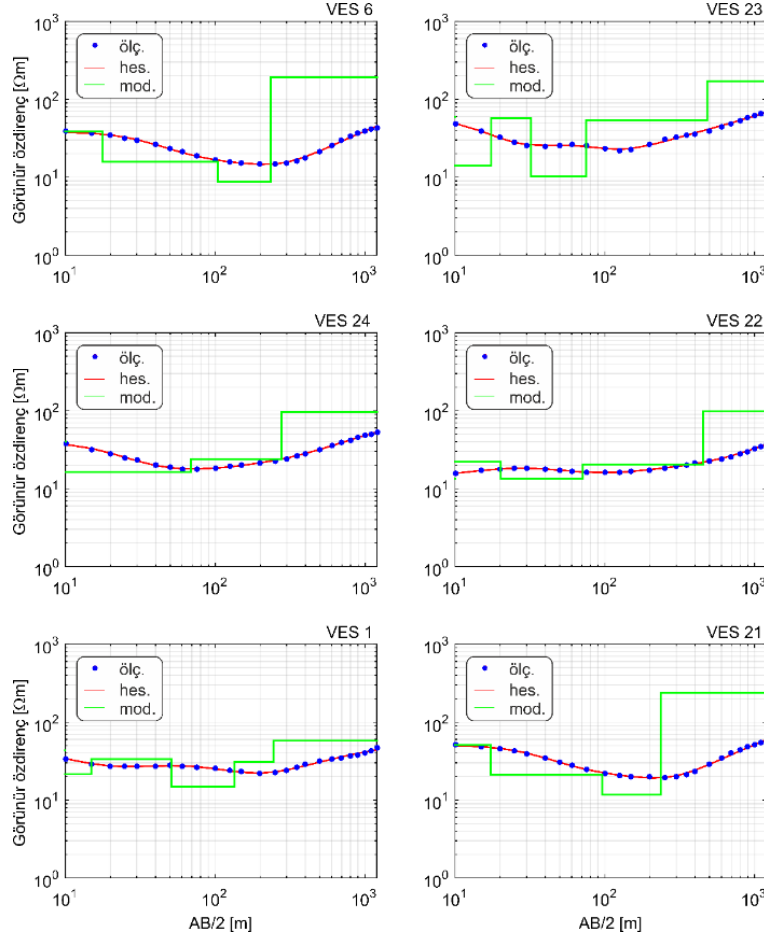
DES No	Katman parametreleri											RMSE
	Özdirenç (ohm.m)						Kalınlık (m)					
1	43.2	21.5	33.3	14.9	31.1	57.9	4.9	10.0	36.3	83.1	110.7	0.90
6	38.4	15.7	8.7	192.5	-	-	17.7	86.7	131.3	-	-	0.68
21	51.1	21.4	11.8	240.1	-	-	17.2	78.6	139.3	-	-	1.03
22	13.4	22.0	13.5	20.5	98.8	-	5.1	15.0	51.0	379.7	-	0.38
23	59.9	14.0	57.7	10.3	54.1	170.2	7.5	9.9	14.7	42.9	408.5	1.08
24	40.1	16.3	23.8	96.7	-	-	9.5	58.8	208.4	-	-	0.39

İkinci aşama olarak Sandıklı çalışma sahasında lokal olarak seçilen alanda altı noktada DAÖ yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmalarda düşük özdirenç zonlarının seviyeleri ve varsa altta sıcak su rezervuarı olabilecek kayaların derinlikleri araştırılmıştır. Çalışma yapılan noktalarla ilgili değerlendirmeler; öncelikle kayaların özdirençlerine göre ve sahanın jeolojik, topoğrafik yapıları da dikkate alınarak Schlumberger dizilimiyle bir DES çalışması gerçekleştirilmiştir.

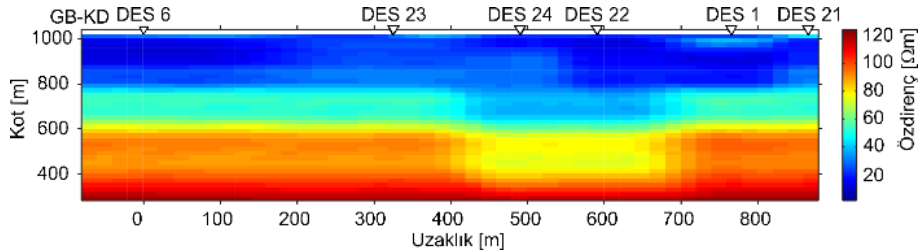
Seçilen noktalarda, yukarıda özetlenen prensibe bağlı kalınarak yüzeyden aşağıya doğru kayaların özdirenç değişimleri gözlenmiştir. DES noktalarında elde edilen bilgiler önce bilgisayar ortamında, daha sonra her ölçü noktasında elde edilen verilerin tek tek değerlendirilmeleri ile çalışma yapılan yerde sıcak kaynağa örtü olma ihtimali olan yerler ve seviyeler ile rezervuar kayaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Jeotermal ortamların özdirenç değerlerinin örtü olabilecek üst birimlerde ve daha çok da alttaki formasyonların özdirenç değerlerinden göreceli de olsa düşük değerlerde olması beklenir.

Sandıklı ilçesinin güneyinde yeralan Örenkaya kasabası civarında gerçekleştirilen çalışmada, Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümeleri 1B ve 2B olarak modellenmiştir (Şekil 4 ve 5). Şekil 6, K-G doğrultulu 6 DES noktasından elde edilen belirtiler ile bunların 1B değerlendirmesiyle hesaplanan belirtilerin bir karşılaştırmasını göstermektedir. 1B ters çözüm ile elde edilen katman parametreleri (özdirenç ve

kalınlıklar) ile ortalama karekök hata (RMSE) değerleri de ayrıca Tablo 3'te sunulmuştur. 1B değerlendirmeden, genel olarak, 4-6 katman arasında ve görece düşük öz direnç değerleri sunan çözümler elde edilmiştir. Şekil 7 ise aynı DES noktalarına ait veri kümelerinin 2B ters çözümünden elde edilen yer elektrik kesitini göstermektedir (RMSE: 0.65). Buna göre, çalışma alanının bu bölümü yaklaşık 200 m derinlik seviyelerine değin yaklaşık 15 ohm.m değerinden küçük öz direnç değerleriyle temsil edilmektedir. 200-400 m derinlik seviyelerindeyse öz direnç 40-60 ohm.m arasında değişmektedir. Bu derinlik seviyesinden sonra ise öz direnç değerleri >80 ohm.m olan bir birim izlenmektedir.



Şekil 6. Şekil 5 üzerinde görülen DES noktalarından elde edilen veri kümelerinin 1B ters çözüm tekniği ile değerlendirilmesiyle elde edilen modeller (Models evaluated by 1D inversion technique of data sets obtained from VES points shown in Figure 5)



Şekil 7. DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yer elektrik kesit (The geoelectrical cross-section obtained from the 2D inversion of VES data)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Hem kuyulara ait fiziksel parametrelerin değerlendirilmesi hem de jeofizik arama çalışması (DES) yapılmış olan Sandıklı jeotermal sahasının (çalışma alanı), jeotermal saha tanımlamasının temel bileşenleri olan ısıtıcı kayaç, rezervuar kayaç ve örtü kayaç niteliğindeki litolojik grupları ve bunları kesen fay zonlarını bünyesinde barındıran bir saha olduğu kanaatine varılmıştır. Bu temel bileşenlerin varlığı, jeotermal bir potansiyelden söz edilebilmesinin kanıtlarıdır.

Elde edilen tüm sonuçlar tek tek ele alınmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Jeofizik çalışmalar neticesinde toplam 6 adet DES noktası veri kümesini içeren veriler ve sonuçların değerlendirilmesi sahanın jeotermal aktivitesinin fayların kesişme noktasında olabileceğini göstermiştir. K-KB yönlü ve doğuya doğru eğimli Hüdai hamamı fay segmenti ile kesişen ve kesiştiği yerde sıcak su çıkışlarının olduğu fay Örenkaya fayı olarak bilinmektedir. Jeofizik ölçümlerde özellikle P22-P24 ölçüm noktaları civarında elde edilen değerler örtü kayaç olarak kabul edilen Pliyosen-Miyosen birimlerde düşük özdirenç kaparımları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Örenkaya kasabası civarından alınan DES ölçülerinin ters çözüm modellemesi ile oluşturulan kesit 6 noktada gerçekleştirilen bütün ölçülerin bir arada değerlendirilmesini sağlamıştır. Böylece jeolojik formasyonların yanal ve düşey yöndeki uzanımları, yeraltındaki su içeriği ve düşük özdirençli zonlar belirlenerek çalışma alanının jeotermal potansiyeli ortaya konmuştur. Özdirenç dağılımları incelendiğinde; Miyosen birimlerinin özdirenç değerlerinin temel birimlerden daha düşük olması beklenir. Oysa araştırma sahası grabenin ortalarına doğru derinleşmesine rağmen, özdirenç değerlerinin düşmesi sahanın P22-P24 noktalarının yer aldığı kesiminde yoğunlaşmıştır. Bu etkinin faya bağlı aktiveden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen tüm sonuçlar dikkate alındığında alandaki 15 ohm.m'den düşük özdirenç değerleri gösteren bölgelerde sondajlar önerilmiştir.

Sahada yapılmış olan jeofizik etüt verilerinin mevcut tespitlerle entegre edilerek, entalpi (debi, sıcaklık) beklentisi optimum noktalarda yapılacak sondaj ya da sondajlarda alınacak birincil veriler ışığında netleşebilecektir. Ancak yakın çevredeki sahalar olan Afyon-Ömer ve Gecek sahalarında yakalanmış olan 80-135 °C aralığındaki bir akışkan sıcaklığı, Sandıklı bölgesi için karakteristik sıcaklık beklentisinden uzaktır. Olası debiye ilişkin ise, net bir şey söylemek şu an için pek mümkün görünmemektedir. Sahanın genelinde yapılan gözlemler ve daha önce yapılan çalışmalara ilişkin elde edilen kısıtlı veriler çerçevesinde yüksek entalpi beklentisinin maksimum olacağı zonun derinlerde olduğu düşünülmektedir.

Sandıklı havzasındaki sığ ve derin kuyulardan alınan sıcaklık bilgileri değerlendirildiğinde; Sandıklı ilçe merkezinin batısındaki kuyulardaki sıcaklık değerlerinin çevredeki diğer alanlara göre yüksek olması (ortalama 65 °C) jeotermal kökenli rezervuarın bu bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. Sandıklı jeotermal sahasındaki elde edilen bu değerler yapılacak olan 1000 m ve daha derin sondajlarda 50-60 °C arasında akışkan alınma ihtimalini güçlü tutmaktadır. Alandaki termal suların varlığı normalin üzerinde bir ısı akışının göstergesidir. Bu durumda ısıtıcı olarak gittikçe alçalan bir gelişimin son aşamalarında da olsa büyük olasılıkla volkaniklere bağlı bir ısı söz konusudur. Kısacası ısı kaynağı volkanizma sonrası hidrotermal aşamaya bağlı yüksek basınç altındaki emanasyonlardır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından SDÜ-BAP 4453-YL1-15 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Sorumlu Editör ve adı belirtilmemiş hakemlere teşekkür ederiz.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Afşin, M., 1991. Afyon-Sandıklı Kuruçay Ovası ve Hüdai Kaplıcalarının Hidrojeoloji İncelemesi. AÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayınlanmamış), 330s.
- Afşin, M., Canik, B., 1996. Hüdai (Sandıklı/Afyon) sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeoloji ve hidrokimyasal incelemesi ve kökensel yorumu, Yerbilimleri Dergisi (Geosound), 28, 69-86.
- Aksever, F., 2011. Afyon Sandıklı Havzası Hidrojeoloji İncelemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 231 s, Isparta.
- Balkaya, Ç., Kaya, M.A., Göktürkler, G., 2009. Delineation of shallow resistivity structure in the city of Burdur, SW Turkey by vertical electrical sounding measurements. *Environmental Geology*, 57, 571-581.
- Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Erhan, Z., Ekinci, Y.L., 2012. Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdag, Izmir (western Turkey). *Geophysics*, 77, B135-B146.
- Bjorck, A., 1996. Numerical Methods for Least Squares Problems, SIAM, Philadelphia.
- Candansayar, M.E., Başokur, A.T., 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49, 13-25.
- Dean, W.T., Özgül, N., 1994. Cambrian rocks and faunas, Hüdai area, Taurus Mountains, southwestern Turkey. *Bull. Instit. R. Sci. Naturelle de Belgique-Science de la Terre*, 64, 5-20.

- Dolmaz, M.N., 2014. İç Batı Anadolu'daki Sismik Olmayan Zon ile Sandıklı'nın Jeotermal Yapısı Arasındaki İlişki, Markakent Sandıklı Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 254-264, 16-18 Ekim 2014, Sandıklı-Afyonkarahisar.
- Dolmaz, M.N., Ustaömer, T., Hisarlı, Z.M., Orbay, N., 2005. Curie Point Depth variations to infer thermal structure of the crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey, *Earth Planets and Space*, 57, 5, 373-383.
- El-Qady, G., Sakamoto, C., Ushijima, K., 1999. 2-D inversion of VES data in Saqqara archaeological area, Egypt. *Earth, Planets and Space*, 51, 1091-1098.
- Erdoğan, B., Uchman, A., Güngör, T., Özgül, N., 2004. Lithostratigraphy of the Lower Cambrian metaclastics and their age based on trace fossils in the Sandıklı region, southwestern Turkey. *Geobios*, 37(3), 346-360.
- Günay, Y., Derman, A. S., Kozlu, H., Göncüoğlu, C. M., Gül M. A., 1995. Stratigraphy of Lower Paleozoic in Southern Turkey. IGCP Project 351 -Early Paleozoic Evolution in NW Gondwana Excursion Guide Book, 3-9.
- Güngör, T., Akay, E., Arslan, A., 2004. Deformation of the Sandıklı porphyroids, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 102Y064, 1-39, Ankara.
- Gürsu, S., Göncüoğlu, M. C., 2005. Batı Torosların (Sandıklı GB'sı, Afyon) Geç Neoproterozoyik ve Erken Paleozoyik Yaşlı Birimlerinin Jeolojisi ve Petrografisi. *MTA Dergisi*, 130, 29-55.
- Hamut, M.N., Şengüler, L., 2001. Afyon-Sandıklı (Hüdayi) jeotermal sahası koruma alanları raporu. MTA Rap., No. 10458, Ankara.
- Karamandere, İ.H., 2004. Sandıklı (Afyon) SANJET A.Ş. Sıcak su arama etüt raporu. JEM-2004-1. (SANJET A.Ş.).
- Karamandere, İ.H., 2008. Sandıklı(Afyonkarahisar) SANJET A.Ş. AFS-14 nolu sondaj ve kuyu jeolojisi bitirme raporu 8.
- Kaya, M.A., Özürlan, G., Balkaya, Ç., 2015. Geoelectrical investigation of seawater intrusion in the coastal urban area of Çanakkale, NW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 73, 1151-1160.
- Koçyiğit, A., Cihan, M., Özacar, A., 2001. Dombayova ve Sandıklı (Afyon) grabenlerinin depremselliği ve kenar faylarının, kinematik analizi, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 199Y007, 1-57, Ankara.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1995. Infracambrian units in Sandıklı area. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Guide Book to Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists, Special Publication, 2, 11-13.
- Kozlu, H., Göncüoğlu, M.C., 1997. Stratigraphy of the Infracambrian Rock-Units in the Western Taurides and Their Correlation with Similar Units in Southern Turkey. (eds: Göncüoğlu M.C. and Derman A.S.) Early Palaeozoic in NW Gondwana. Turkish Association Petroleum Geologists Special Publication, 3,50-61.
- Memiş, Ü., 2010. Afyon-Sandıklı Hüdayi Jeotermal Alanının hidrojeokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi ve İz Element Kirliliğinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74 s., Isparta.
- Müller, G., 1955. Heybeli (Kızılkilise) Kaplıcasının Hidrojeolojisi., 20, Ankara.
- Oğuz, A., 2011. Sandıklı (Afyonkarahisar) Jeotermal Alanının Hidrotermal Alterasyon Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 73s.
- Ölmez, E., Karlı, R., Hamut, M.N., Karzaoğlu, H., 2000. Afyon-Sandıklı (Hüdayi Kaplıcası) jeotermal alanı jeolojik etüt raporu. MTA Rap., No.10419, Ankara.
- Öngür, T., 1973. Sandıklı (Afyon) Jeotermal Araştırma Bölgesine İlişkin Jeolojik Durum ve Jeotermal Enerji Olanakları. MTA Rapor No: 5520, Ankara (yayımlanmamış).
- Özgül, N., Bölükbaşı, S., Alkan, H., Öztaş, Y., 1991. Göller bölgesi ve Ispartanın Jeolojisi ve Stratigrafisi. TPAO arama grubu rapor no: 3028, 321 s., Ankara (yayımlanmamış).
- Özpinar, Y., Çobanoğlu, İ., Bozkurt, R., 2002. Sandıklı zeolitik tüflerin petrografik petrokimyasal ve teknolojik özelliklerin incelenmesi, TÜBİTAK YDABÇAG Proje No. 198Y102, 1-268, Ankara.
- Özpinar, Y., 2008. Sandıklı (Afyon) Yöresinde Şabazit ve Fillipsit Mineralleri İçeren Tüflerin Minerolojik Petrografik ve İyon Değiştirme Özellikleri ve Tarımda Kullanılması, GB Anadolu, Türkiye. MTA Dergisi, 137, 27-47.
- Özürlan, G., Candansayar, M.E., Şahin, M.H., 2006. Deep resistivity structure of the Dikili-Bergama region, west Anatolia, revealed by two-dimensional inversion of vertical electrical sounding data. *Geophysical Prospecting*, 54, 187-197.
- Ronner, F., 1956. Hüdayi Hamamı termal kaynaklarına ve kaplıcalarına (Sandıklı- Afyon) dair muvakkat kısa rapor. M. T. A. Rap. No. 2493, Ankara.
- Ronner, F., 1962. Sandıklı ovası çöküntüsü -Genç tektonik ve volkanik durumlar, MTA Dergisi, 59, 69-89, Ankara.
- Seidel, K., Lange, G., 2007. Direct current resistivity methods. *Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies*, pp. 205-237.
- Şamilgil, E. 1964. Hüdayi Hamamı (Sandıklı) hakkında jeolojik ve hidrojeolojik rapor. MTA Rap. No:3598, Ankara.
- Tamgaç, Ö.F., Akan, B., Peker, B., Ünal, H., 2008. Sandıklı (Afyon) Jeotermal Alanının Koruma Alanları Etüt Raporu, MTA Rap. No. 2006-33-46, Ankara.
- Uchida, T., Murakami, Y., 1990. Development of a Fortran Code for the Two-Dimensional Schlumberger Inversion. *Geological Survey of Japan Open-File Report*, No. 150, p 50.
- Yenal, O., Osman, N., Kanan, E., 1975. Türkiye Maden Suları Ege Bölgesi, İstanbul Üniversitesi Tıp Fakültesi, Hidroklimatoloji Kürsüsü, İstanbul, 3, 335 s.