



BURSA-ACEMLER BÖLGESİ DES VE DP VERİLERİ İLE ISIL UÇLAŞMA MODELLEMESİ

Petek SINDIRGI*

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Doğal Potansiyel,
Sıcaklık,
Uçlaşma.*

Öz

Doğada, basınç, sıcaklık ve derişim farklılığı nedeniyle uçlaşma akımları meydana gelir. Doğal potansiyel (DP) yöntemi, yorumlama çalışmalarında geleneksel olarak kullanılagelen popüler jeofizik araç olup, bu yöntem uçlaşma akımlarının yarattığı doğal potansiyel farklarının ölçülmesine dayanır. Bu çalışmada, ısıl uçlaşma problemi kümelenmiş elemanlar ağı modeli ile çözülerek bir jeotermal alana uygulanmıştır. Bu yöntemin diğer geleneksel jeofizik yöntemlere kıyasla temel üstünlüğü, incelenen sistemin karmaşık doğası hakkında daha detaylı bilgi verebilmesidir. Bursa ili Çekirge Mahallesi'nin kuzeybatısında yer alan Acemler Mevkiinden toplanan düşey elektrik sondaj (DES) ve DP verileri öncelikle geleneksel yöntemlerle (ters çözüm) değerlendirilmiş, elde edilen parametreler kullanılarak alanın ısıl uçlaşma modeli kurulmuştur. Böylece jeotermal alan için en uygun termal ve jeofizik parametre değerleri, kaynak yerleri ve sayıları ile jeolojik birimlerin geometrik yapıları saptanmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, ısıl uçlaşma yönteminin DP verilerinin yorumlanmasında güçlü bir araç oluşturduğunu ve jeotermal sistemlerin çeşitli özelliklerinin belirlenmesinde etkin şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

THERMAL COUPLING MODELLING WITH THE VES AND SP DATA OF BURSA-ACEMLER REGION

Keywords

*Self Potential,
Temperature,
Coupling.*

Abstract

In nature, due to differences in pressure, temperature and concentration, coupling flows occur. The self potential (SP) method is the popular geophysical instrument traditionally used in interpretation studies, which is based on the measurement of the natural potential differences created by the coupling flows. In this study, the thermal coupling problem was solved by a lumped elements network model and applied to a geothermal field. The basic advantage of this method over the other traditional geophysical methods that it can provide more detailed information about the complex nature of the system under consideration. The vertical electric sounding (VES) and SP data collected from the Acemler Location in west of the Çekirge District of Bursa province were firstly evaluated by traditional methods (inverse solution), and the thermal coupling model was established by using the obtained parameters. Thus, the most appropriate thermal and geophysical parameter values for geothermal fields, the location of the sources and their numbers and the geometrical structures of the geological formations were determined. The results obtained from this study showed that the thermal coupling method is a powerful tool in the interpretation of SP data and it can be used effectively to determine the various properties of geothermal systems.

Alıntı / Cite

Sındırgı, P., (2019). Bursa-Acemler Bölgesi DES ve DP Verileri ile Isıl Uçlaşma Modellemesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(4), 751-760.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

P. Sındırgı, 0000-0002-1328-9988

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	10.12.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.04.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.05.2019
Yayın Tarihi / Published Date	19.12.2019

* İlgili yazar / Corresponding author: petek.sindirgi@deu.edu.tr, +90-232-301-7270

1. Giriş

Elektrokimyasal, elektrokinetik ve termoelektrik kaynakların ürettiği potansiyel farklılığının ölçümüne dayanan doğal potansiyel yönteminde doğal gerilim belirtileri genel olarak, yer kabuğundaki basınç, sıcaklık, iyon ve akışkan hareketlerinden türer. Yer altındaki akışkan akımı, konveksiyon akımlarında artışa neden olurken, bu akımların elektriksel yapı ile etkileşimi de elektrik potansiyelini artırır. Ayrıca, ortamların özdirenç farklılığı, sıcaklık, gözeneklilik gibi özellikleri de doğal gerilim belirtilerinin oluşumundaki ana etkilendir (Corwin ve Hoover, 1979).

Geleneksel doğal potansiyel modelleme yöntemleri, uçlaşmış küre (de Witte, 1948; Yungul, 1950) veya çubuk dipol (Meiser, 1962; Paul, 1965) gibi akım kaynakları esasına dayanır. Ancak bu yöntemler ana kaynağın doğasına yönelik çok az bilgi verebilmektedirler. Bu nedenle, özellikle sıvı akımı olan ve ısı özellik gösteren bölgeler için, kaynağın bu tür özelliklerini de içeren çözümler yapılmaya çalışılmıştır (Marshall ve Madden, 1959; Nourbehecht, 1963; Sill ve Johng, 1979). Bu çalışmalarda kaynak mekanizması ayrıntılı bir biçimde tartışılmış, sıcaklık ve basınç gibi birincil potansiyeller ile doğal potansiyel çözümlerini birleştiren teknikler geliştirmiştir. Bu yöntemde, genel uçlaşmış akım eşitliğinden (Onsager, 1931; Marshall ve Madden, 1959; Nourbehecht, 1963) yararlanarak, önce birincil potansiyel problemi çözülmüş, daha sonra bu potansiyeller uçlaşma katsayıları dağılımı ile birleştirilerek elektrik kaynak terimleri hesaplanmıştır. Sayısal yöntemler yardımıyla da elektrik potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. Yöntem, baraj sızdırması (Wilt ve Butler, 1990) ve jeotermal alan modellemelerinde (Corwin, 1990; Schima vd., 1996; Drahor ve Berge, 2006) uygulanmıştır. Yasukawa (1993) ise bu yöntemi, Bodvarsson (1982)'un akışkan ve ısı akımı modellemesi yapan PT adlı programı ile birleştirerek yeni bir bilgisayar programı haline getirmiş ve çeşitli alanlara uygulamıştır (Yasukawa vd., 2003; Yasukawa vd., 2005). Konu ile ilgili deneysel çalışmalar da bulunmaktadır (Ishido vd., 1983; Sheffer, 2007; Giampaolo vd., 2016).

Yöntem, yukarıda açıklanan literatürde uçlaşmış akım kaynaklarına dayalı bir yöntem olarak tanımlanarak tam bir isim verilmemiştir. Türkçe literatürde ise konu ile ilgili tek bir çalışma vardır ve bu çalışmada Sındırgı (2005); jeotermal alanlar için birincil akım ısı olarak kabul edildiği için yöntemi *ısıl uçlaşma yöntemi* olarak nitelemiştir.

Bu çalışmada, düşey elektrik sondaj (DES) verileri ve DP yönteminin yığınsal veri kümeleri geleneksel ters çözüm teknikleri ile değerlendirilerek elde edilen tabaka özdirenç ve kalınlıkları ile uçlaşma açısı gibi

parametrelerle, jeotermal ortamı karakterize edecek bazı ısı parametreleri birlikte dikkate alınarak jeolojik ortamın ısıl uçlaşma modeli ortaya konmaya çalışılmıştır.

Çalışma içeriğinde, ısıl uçlaşma yönteminin kuramsal gelişimi ve iki örnek teorik model verildikten sonra, Bursa ilindeki bir jeotermal alandan toplanan DES ve DP verileri ile gerçek bir alan problemine uygulaması sunulacaktır.

Uygulanan Tam Schlumberger düşey elektrik sondaj (DES) yönteminde, görünür özdirenç değerleri (ρ_a) bir log-log grafiğindeki yarı akım elektrot aralığına ($AB / 2$) göre çizdirilir. İki ve üç tabakalı durumlar için, tabakaların özdirenç değişimlerine bağlı olarak eğriler, K, H, Q ve A tipi olarak sınıflandırılır (Başokur, 2004). Daha sonra, sondaj eğrileri, yeraltı katmanlarının gerçek dirençlerini ve kalınlıklarını belirlemek üzere çeşitli tekniklerle (abak çıkartma, ters çözüm gibi) yorumlanır.

Çalışmanın uygulama alanı olarak seçilen Bursa ilinde, jeoloji (Erişen ve Öngür, 1976), hidrojeoloji ve termal sulara ait jeokimyasal analiz çalışmaları yapılmıştır (Özgüler ve Ünay, 1978; Haklıdır, 2013). Bu çalışmalarda bölgeye, alüvyon, mermer, kireçtaşı, kumtaşı ve traverten birimlerinin hâkim olduğu ve düşük basınç ve sıcaklığa sahip akiferlerin neojen kumtaşı, kireçtaşı, marn ve alüvyon birimleri içinde yer alabileceği saptanmıştır. Özgüler ve Ünay (1978), ısıtıcı kaynağın derin kaynaklı olduğunu, ayrıca kırık ve çatlakların akifer rolü oynadığını belirtmiştir. Son yıllarda ise, bölgenin sismik aktivitesinin (Gök ve Polat, 2012) ve yeraltı suyu kimyasının incelendiği (Haklıdır, 2013) çalışmalar mevcuttur.

2. Materyal ve Yöntem

Bir ortamda zorlayıcı bir kuvvet veya potansiyel farklılığına yol açan sıvı, ısı, elektrik ve kütle akımlarına genel olarak *uçlaşma nedeniyle oluşan akımlar* denir. Uçlaşma nedeniyle oluşan akımlar matris formunda,

$$\begin{pmatrix} \vec{J}_f \\ \vec{J}_h \\ \vec{J}_e \\ \vec{J}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\nabla}P \\ \vec{\nabla}T \\ \vec{\nabla}V \\ \vec{\nabla}C \end{pmatrix} \quad (1)$$

yazılabilir. Burada, \vec{J}_f ; $\vec{\nabla}P$ basınç gradyentine bağlı akışkan akımı, \vec{J}_h ; $\vec{\nabla}T$ sıcaklık gradyentine bağlı ısı akımı, \vec{J}_e ; $\vec{\nabla}V$ elektrik potansiyeli gradyentine bağlı elektrik akımı ve \vec{J}_m ise $\vec{\nabla}C$ derişim gradyentine bağlı oluşan iyonik akımı göstermektedir. Genel olarak,

kararlı hal için akım eşitliği (Onsager,1931; Marshall ve Madden, 1959; Nourbeheceht, 1963; Sill, 1983);

$$\vec{J}_i = \sum_j L_{ij} \vec{X}_j \quad (2)$$

olarak verilir. Bazı diğer birincil akımlardan oluşan ikincil akımların birincil akımların üzerine etkisi küçüktür. Bu durumda birincil ve ikincil akımlar genel olarak aşağıdaki gibi verilir:

$$\vec{J}_1 = L_{11} - \vec{\nabla} \zeta \quad (3)$$

$$\vec{J}_{Top} = \vec{J}_2 = -L_{21} \vec{\nabla} \zeta - \sigma \vec{\nabla} V \quad (4)$$

Burada, \vec{J}_1 ; birincil akımı (ısı, çözelti, elektrik vb.), L_{11} ; iletkenliği (termal iletkenlik, geçirgenlik vb.), ζ ; birincil potansiyeli (sıcaklık, basınç vb.), \vec{J}_{Top} ; toplam elektrik akımını, \vec{J}_2 ; ikincil akımı, L_{21} ; uçlaşma iletkenliği, σ ; elektriksel iletkenliği ve V ise elektrik potansiyelini göstermektedir. Eşitlik 4'ün sağ tarafının ilk kısmı, birincil akım nedeniyle oluşan dolaşım (konveksiyon) akımı, ikinci kısmı ise elektrik potansiyeli gradyenti nedeniyle oluşan iletim (kondüksiyon) akımıdır. Bu durumda Eşitlik 4;

$$\vec{J}_{Top} = \vec{J}_{konv} + \vec{J}_{kond} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Doğal potansiyel ölçümlerinde dış akım kaynağı bulunmadığı için doğru akım koşulları geçerlidir ve toplam akım diverjansı sıfırdır ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{Top} = 0$). Bu durumda;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{kond} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{konv} = \vec{\nabla} (L_{21} \vec{\nabla} \zeta) \quad (6)$$

ve

$$\vec{\nabla} \cdot (L_{21} \vec{\nabla} \zeta) = \vec{\nabla} L_{21} \cdot \vec{\nabla} \zeta + L_{21} \vec{\nabla}^2 \zeta = -\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) \quad (7)$$

olur. Burada Eşitlik 7'nin sol tarafı sıcaklık ya da basınç nedeniyle olan değişimi ifade eder. Sağ tarafı ise bilinen doğru akım iletim denklemdir. Bu eşitliklerden yararlanarak, ısı akısı, geçirgenlik veya ısıl iletkenlik katsayıları, ısıl elektrik potansiyeli katsayıları ve elektriksel özdirenç dağılımı bilinen ortamların iki boyutlu sıcaklık veya basınç dağılımları; ayrıca doğal potansiyelleri elde edilebilir.

"S" kaynağı sembolize etmek üzere, birincil akım ile kaynağın ilişkisi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_1 = S \quad (8)$$

şeklinde verilir (Madden,1971). Verilen eşitlikler sayısal olarak çözülürken, Eşitlik 3'teki L_{11} iletkenliğinin y -yönünden bağımsız olduğu, ortamın y -yönünde, $[-\infty, \infty]$ aralığında, tekdüze ve izotrop olduğu varsayılır. \vec{J}_1 birincil akımı ve bunu doğuran ζ

birincil potansiyelleri ise üç boyutludur ve y -yönünde tekdüze, izotrop bir ortamda çift fonksiyon özelliği gösterirler. y -yönündeki etkileri sabit hale getirmek amacıyla, Eşitlik 3 ve Eşitlik 8'in y -yönündeki Fourier kosinüs dönüşümleri alınarak dalgasayısı (λ) ortamında çözüm yapılır. Buna göre, Eşitlik 3'ün y -yönünde Fourier kosinüs dönüşümü alınarak;

$$J_x(x, \lambda, z) = -L_{11} \frac{\partial \zeta(x, \lambda, z)}{\partial x} \quad (9)$$

$$J_z(x, \lambda, z) = -L_{11} \frac{\partial \zeta(x, \lambda, z)}{\partial z} \quad (10)$$

ve

$$S(x, \lambda, z) = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_z}{\partial z} + \lambda^2 L_{11} \zeta \quad (11)$$

elde edilir. Bu eşitlikler yer altı modelinin her bir noktası için kümelenmiş elemanlar ağı (Lumped-element rectangular network) oluşturularak çözülebilir (Sill, 1983; Yasukawa, 2003; Oliveti ve Cardarelli, 2017.) Bunun için;

$$Y_x = L_{11} \Delta x / \Delta x \quad (12)$$

$$Y_z = L_{11} \Delta x / \Delta z \quad (13)$$

$$Y = \lambda^2 \Delta x \Delta z \quad (14)$$

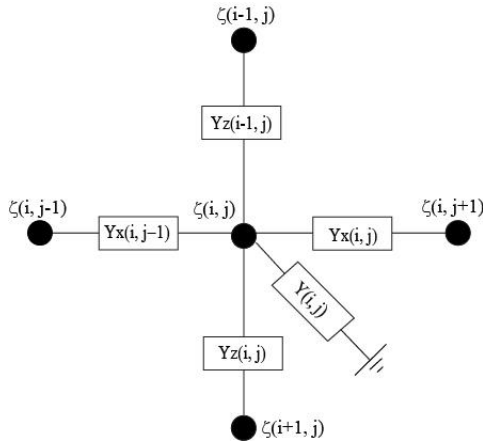
tanımlamaları kullanılarak (n, m) boyutlu bir ağda herhangi bir (i, j) noktası için fark eşitliği; $i=1, 2, 3, \dots, n$ iken,

$$\begin{aligned} S(i, j) \Delta x \Delta z = & Y_x (i, j-1) [\zeta(i, j-1) - \zeta(i, j)] \\ & + Y_x (i, j) [\zeta(i, j+1) - \zeta(i, j)] + Y_z (i-1, j) \\ & [\zeta(i-1, j) - \zeta(i, j)] + Y_z (i, j) [\zeta(i+1, j) \\ & - \zeta(i, j)] + Y(i, j) \zeta(i, j) \end{aligned} \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir (Şekil 1) (Sill, 1983). Eşitlik 15 genel olarak tüm ağ için matris formunda;

$$\vec{C} \zeta = \vec{S} \quad (16)$$

olarak gösterilir. Matris çözümünden elde edilen $\zeta(\lambda)$ dalgasayısı değerleri, üç boyutlu uzay ortamına, y -yönünde Ters Fourier Dönüşümü alınarak geçirilir. Artık potansiyel değerleri (sıcaklık veya basınç) hesaplandığından, Eşitlik 7'de yerine yazılabilir. Bu denklemden elektriksel kaynak terimleri her nokta için hesaplanır. Aynı eşitliğin sağ tarafındaki ($\sigma=1/\rho$) terimi bilindiğinden, elektrik potansiyeller de bulunabilir.



Şekil 1. Kaynak fonksiyonunun sayısal çözümü için oluşturulan kümelmiş elemanlar ağı (Sill, 1983)

Jeotermal alanlardaki doğal gerilim belirtilerinin sıcaklık ya da basınca bağlı olarak oluştuğu bilinmektedir. Doğal gerilime neden olan birincil potansiyelin sıcaklık (T), bundan doğan birincil akımın ısı akımı (\vec{J}_h), ikincil akımın ise elektrik akımı (\vec{J}_e) olduğu düşünüldüğünde, uçlaşma bağıntıları,

$$\vec{J}_h = -K \cdot \vec{\nabla} T \quad (17)$$

$$\vec{J}_e = -C \vec{\nabla} T - \sigma \vec{\nabla} V \quad (18)$$

şeklini alır (Sill ve Johng, 1979). Burada; K; ortamın ısı iletkenliği, C; ısı elektrik potansiyel katsayısı olup, uçlaşma iletkenliğinin elektrik iletkenliğe oranıdır ($C = L_{21}/\sigma$). Çeşitli kayaç birimleri için ısı iletkenlik ve ısı elektrik potansiyel katsayıları değişim aralıkları Tablo 1 'de verilmiştir.

Eşitlik 17, Fourier ısı iletim bağıntısıdır ve sıcaklık dağılımı bu eşitlikten elde edilebilir. Sıcaklık değerleri ile birlikte ısı elektrik potansiyel katsayıları bir arada kullanılarak elektrik kaynak terimleri de bulunur. Elektrik kaynak terimleri bilindiğinde ise, sayısal yöntemlerle (sonlu farklar vb.) elektrik potansiyel hesaplanır. Özdirenç, ısı iletkenlik ve ısı elektrik potansiyel katsayıları gibi ortam parametreleri, oluşan elektrik potansiyeli etkilemektedir. Özellikle kaynağın gücü, ısı iletkenlik ve ısı elektrik potansiyel katsayıları doğal potansiyel belirtilerinin genlik ve biçimlerini önemli derecede etkilemektedir. Literatürde, değişik ortam parametreleri için pek çok kuramsal model üretilmiştir (Sill, 1983; Sındırgı, 2005). Bu çalışmada ise, tekdüze homojen ortam ve dayk modelleri için çeşitli örnek modeller oluşturulmuştur. Arazi uygulamasında ise, Bursa ili Çekirge mahallesi kuzeybatısındaki Acemler mevkiinde toplanmış DES ve DP verileri kullanılarak sıcaklık uçlaşması modeli oluşturulmuştur.

Tablo 1. Çeşitli Jeolojik Yapılar için Fiziksel Parametrelerin Değer Aralıkları (Wilt,&Butler, 1990)

KAYAÇ TİPİ		Özdirenç (ohm.m)	Isıl İletkenlik (W/m°C)	Isıl Elektrik Potansiyel Kats. (mV/°C)
TORTUL	Kumtaşı	5 - 100	0.1 - 1.5	0.04 - 0.1
	Şeyl	2 - 50	0.2 - 2	0.05 - 0.5
	Kireçtaşı	20 - 500	0.15 - 1.5	0.05 - 0.5
VOLKANİK VE BAŞKALAŞIM	Granitik	50 - 1000	0.5 - 10	0.1 - 2
	Volkanik	20 - 500	1 - 15	0.1 - 2
	Başkalaş.	50 - 1000	0.5 - 10	0.1 - 2
	Kırıklı	10 - 100	0.05 - 0.5	0.1 - 2

2.1. Kuramsal Modeller

Tekdüze homojen ortam ve dayk modelleri için oluşturulan kuramsal modellerde bazı parametreler sabit tutulurken diğer parametreler değiştirilmiş ve bu değişiminin DP anomalilerine etkileri incelenmiştir (Tablo 2).

2.1.1. Tekdüze homojen ortam modeli

Tekdüze homojen ortam modelinde üç değişik durum incelenmiştir. Her üç durumda da noktasal sıcaklık kaynağı modelin tam ortasında yer almaktadır. Durumlardan ilkinde, sabit özdirenç ($\rho=200 \Omega m$), ısı elektrik potansiyel katsayısı ($C=0.1 mV/°C$) ve ısı iletkenliğe ($K=15 W/m°C$) sahip tekdüze, homojen ortam için değişken kaynak güçleri incelenmiştir. 0.01MW ve 0.04 MW güçlerindeki kaynaklar için hesaplanan doğal gerilim değişimleri, ilgili model ve parametreleri Şekil 2.a'da verilmiştir.

İkinci durumda, gücü 0.1 MW, özdirenç 200 Ωm ve ısı elektrik potansiyel katsayısı $C=0.1 mV/°C$ olan ortamın, ısı iletkenliği 1, 5 ve 6 $W/m°C$ olarak değiştirilmiştir. Bu duruma ait model, parametreleri ve ısı iletkenliklerin değişimine bağlı olarak hesaplanan doğal gerilim grafikleri Şekil 2.b'de verilmiştir.

Tablo 2. Kuramsal modellerde kullanılan parametre değerleri

Model	Sabit Parametreler	Değişken Parametreler
Tekdüze Hom. Ortam	I.DURUM: $\rho=200 \Omega m$ $C=0.1 mV/^{\circ}C$ $K=15 W/m^{\circ}C$	Kaynak gücü ($S=0.01MW$ ve $0.04 MW$)
	II.DURUM: $S=0.1 MW$ $\rho=200 \Omega m$ $C=0.1 mV/^{\circ}C$	Isıl iletkenlik (1, 5 ve $6 W/m^{\circ}C$)
	III.DURUM: $S=0.1 MW$ $\rho=200 \Omega m$ $K=15 W/m^{\circ}C$	Isıl el. pot. kats. (0.1, 2 ve $5 mV/^{\circ}C$)
Dayk	I.DURUM: Her üç bölgede, $K=8 W/m^{\circ}C$ ve $C=1 mV/^{\circ}C$ aynı	$\rho_1=\rho_3>\rho_2$ $\rho_1=\rho_3<\rho_2$
	II.DURUM: Her üç bölgede, $\rho=1 \Omega m$ ve $C=1 mV/^{\circ}C$ aynı	$K_1=K_3=8 W/m^{\circ}C$, $K_2=0.5 W/m^{\circ}C$ $K_1=K_3=0.5 W/m^{\circ}C$, $K_2=8 W/m^{\circ}C$
	III.DURUM: Her üç bölgede, $\rho=1 \Omega m$ ve $K=8 W/m^{\circ}C$ aynı	$C_1=C_3=0.1 mV/^{\circ}C$, $C_2=1 mV/^{\circ}C$ $C_1=C_3=1 mV/^{\circ}C$, $C_2=0.1 mV/^{\circ}C$ $C_1=0.1 mV/^{\circ}C$, $C_2=1 mV/^{\circ}C$, $C_3=2 mV/^{\circ}C$

Tekdüze homojen ortam modeli için oluşturulan son durumda, kaynak gücü ve öz direnci ikinci durumla aynı olan modelin ısı iletkenliği $15 W/m^{\circ}C$ olarak seçilmiştir. Isıl elektrik potansiyel katsayısı ise 0.1, 2 ve $5 mV/^{\circ}C$ olarak değiştirilmiştir. Oluşturulan model,

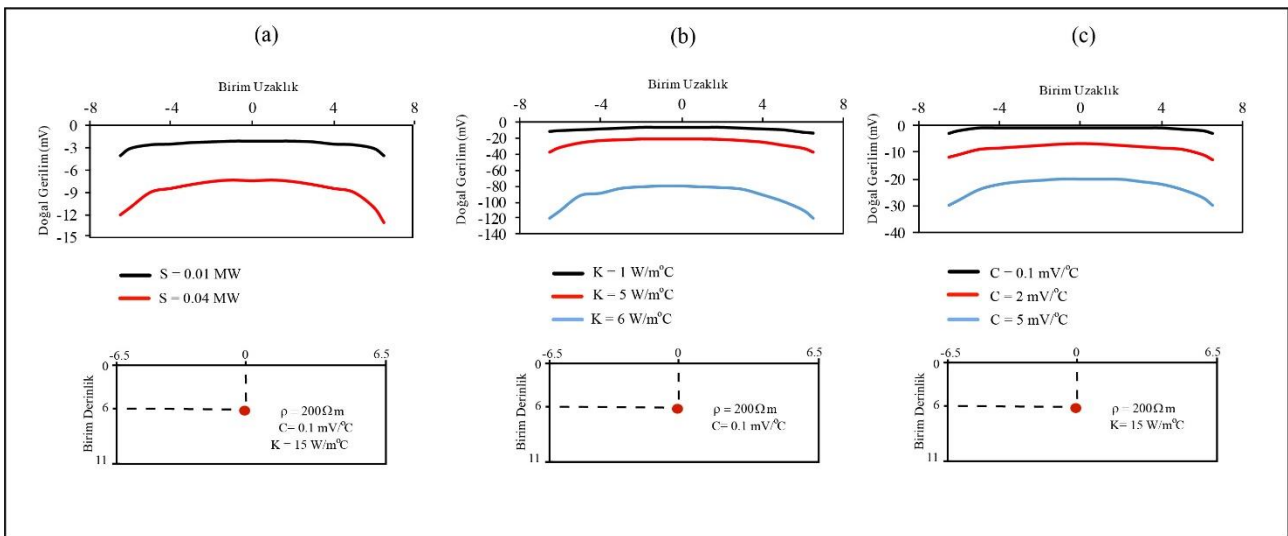
parametreleri ve ısıl elektrik potansiyel katsayısının değişimine bağlı olarak hesaplanan doğal gerilim grafikleri Şekil 2.c'de verilmiştir.

2.1.2. Dayk modeli

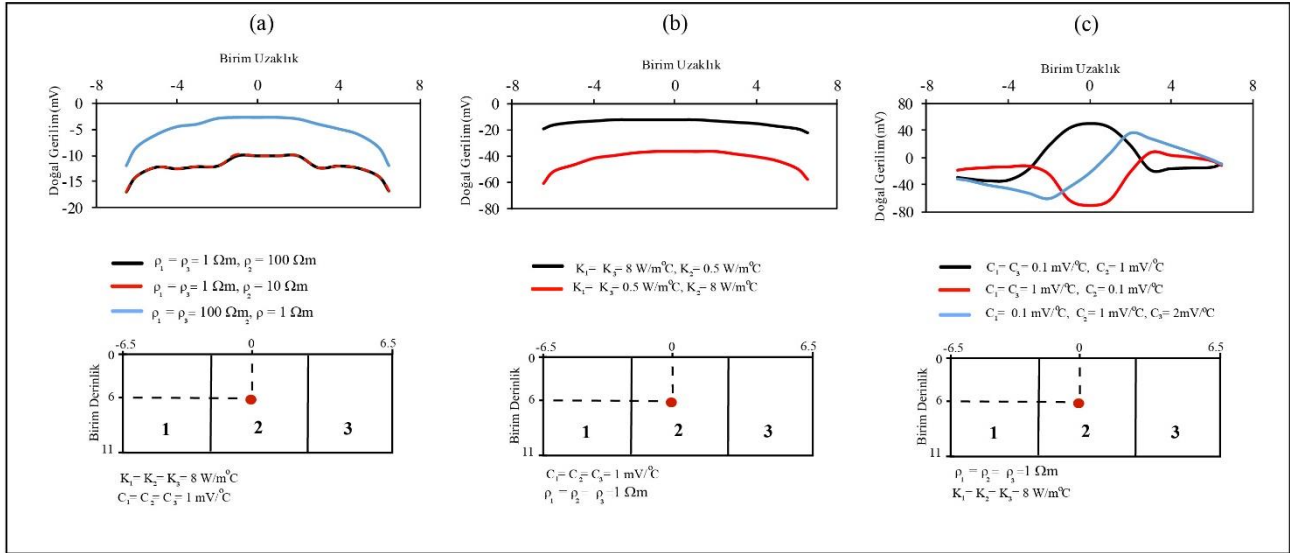
Dayk modeli üç kısımdan oluşmuştur. Modelin solu 1, ortası 2 ve sağ 3 numaralı ortam olarak adlandırılmıştır. Gücü $0.4 MW$ olan noktasal sıcaklık kaynağı, modelin tam ortasına yerleştirilmiştir. Bu modelde de üç farklı durum incelenmiştir. İlk durumda, her üç bölgenin ısı iletkenliği ($K=8 W/m^{\circ}C$) ve ısıl elektrik potansiyel katsayısı ($C=1 mV/^{\circ}C$) aynıdır. Öz dirençleri ise, 1 ve 3. Bölgelerin aynı olacak şekilde 2. Bölgeden daha büyük ve küçük olması durumları incelenmiştir. Bu duruma ait model, parametreleri ve bunlara bağlı olarak hesaplanan doğal gerilim anomalisi Şekil 3.a'da verilmiştir.

İkinci durumda, daykı temsil eden 2 numaralı bölgenin ısı iletkenliği değiştirilip diğer parametreler sabit tutulmuştur. Tüm ortamların öz direnci $1 \Omega m$, ısıl elektrik potansiyel katsayısı $1 mV/^{\circ}C$ 'dir. İkinci duruma ait model, parametreleri ve bunlara bağlı olarak hesaplanan doğal gerilim anomalisi Şekil 3.b'de verilmiştir.

Dayk modeli için son durumda ise, bu kez daykı temsil eden 2 numaralı bölgenin ısıl elektrik potansiyel katsayısı değiştirilip diğer parametreler sabit tutulmuştur. Tüm ortamların öz direnci $1 \Omega m$, ısıl iletkenliği $8 W/m^{\circ}C$ 'dir. Isıl elektrik potansiyel katsayısının her üç ortam için farklı olması hali de oluşturulmuştur. Üçüncü duruma ait model, parametreleri ve bunlara bağlı olarak hesaplanan doğal gerilim grafiği Şekil 3.c'de verilmiştir.



Şekil 2. Tekdüze homojen ortam modeli. (a) ısıl elektrik potansiyel katsayısı değişiminin DP'ye etkisi, (b) ısı iletkenliğinin değişiminin DP'ye etkisi, (c) kaynak güçlerinin değişiminin DP'ye etkisi



Şekil 3. Dayk modeli. (a)Özdirenç değişiminin DP'ye etkisi, (b)ısı iletkenliğin değişiminin DP'ye etkisi,(c) ısı elektrik potansiyel katsayısı değişiminin DP'ye etkisi

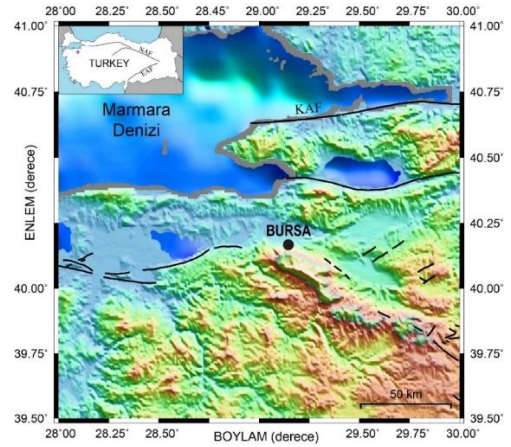
3. Arazi Uygulamaları

3.1. Bursa ilinin jeolojisi ve hidrojeolojisi

Bursa ovasını Uludağ masifinin çekirdeğini oluşturan granitler ve bunu kuşatan Uludağ metamorfik şistleri ve mermerleri, Karakaya formasyonu, Kalabakkaya formasyonu, neojen birimler, kuvaterner travertenler ve alüvyonlar oluşturur (Şekil 5). Bölgede genelde eğim atımlı normal faylar bulunmaktadır. Güneydoğudaki Demirkapı mahallesinden Kaynarca sıcak su kaynaklarına kadar uzanan bu faylar, birbirlerine paralel ve diyagonal kesecek şekilde uzanırlar. Güneyde Çekirge bölgesinde ve İnkaya Köyü civarında da bu tip faylar yer almaktadır. Bölgede ayrıca, Uludağ metamorfikleri Karakaya formasyonuna bindirme yapmaktadır (Erişen ve Öngür, 1976). Bölgedeki sıcak su kaynakları iki gruba ayrılabilir. Bunlardan Çekirge grubu sıcak su kaynakları, ortalama sıcaklıkları 28-50 °C arasında olan on adet kaynaktan oluşur. Kaynarca grubu sıcak su kaynakları ise sıcaklıkları ortalama 35-82 °C arasında olan sekiz adet sıcak su kaynağından oluşur (Erişen vd., 1996).

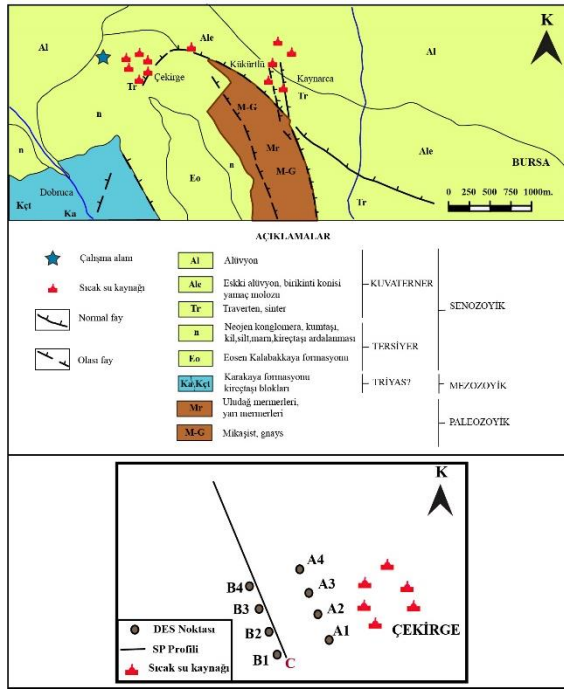
3.2. Bölgede Yapılan Öz direnç (DES) ve Doğal Potansiyel (DP) Uygulamaları

Doğal potansiyel (DP) ve düşey elektrik sondaj (DES) yöntemleri Bursa ili, Çekirge Mahallesinin yaklaşık 1km kuzeybatısında yer alan bir bölgede yapılmıştır. (Şekil 4 ve 5).



Şekil 4. Çalışma alanının yer bulduru haritası

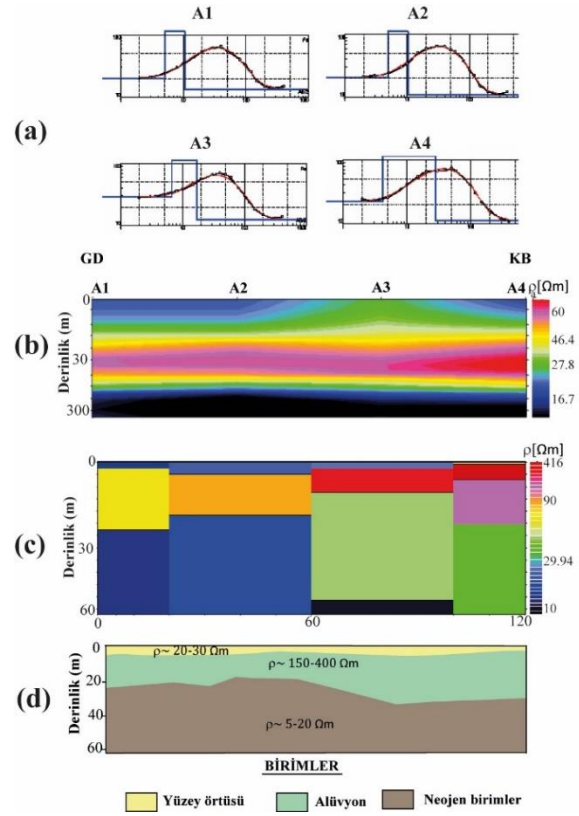
Bölgede, açılım uzaklığı 240 m. araştırma derinliği yaklaşık 60 m. olan, 40 m. aralıklı A1, A2, A3, A4 ve B1, B2, B3, B4 noktalarında Tam Schlumberger düşey elektrik sondaj (DES) ölçümleri yapılmıştır. Bu noktalardan oluşan A ve B profillerinin arasındaki uzaklık 80 metredir. Toplanan verilerinin, IPI2WIN v.2.1 (Bobachev vd., 2002) programı ile ters çözümleri yapılarak, DES noktaları altındaki elektrik tabakalanma modelini açıklayan ve her tabakaya ait olan derinlik ve gerçek öz direnç parametreleri hesaplanmıştır. Ters çözümleri yapılmış DES noktalarına ait eğriler Şekil 6-7(a)'da, bu noktaların hesaplanmış öz direnç ve derinlikleri Tablo 3'te, oluşturulan görünür öz direnç kesitleri Şekil 6-7(b)'de, gerçek öz direnç kesitleri Şekil 6-7(c)'de, jeolojik yapı kesitleri ise Şekil 6-7(d)'de verilmiştir.



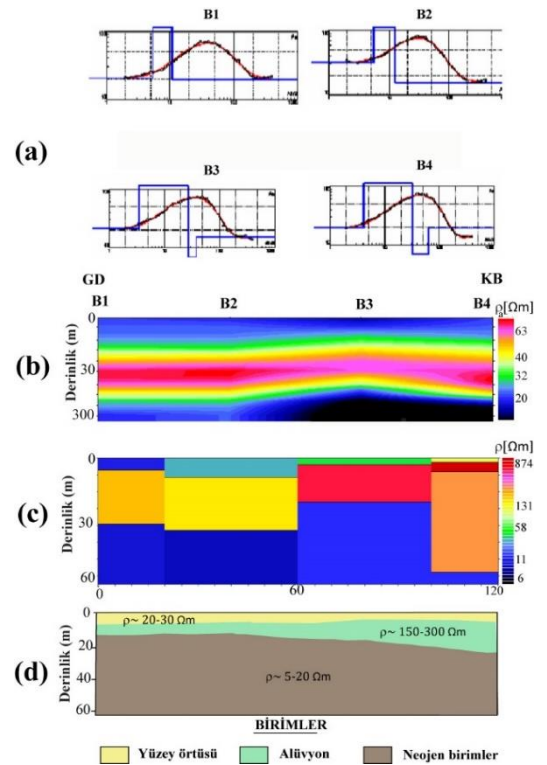
Şekil 5. Bursa bölgesine ait genel jeoloji haritası (Erişen vd., 1996'dan değiştirilmiştir) ve yapılan jeofizik çalışmalara ait gözlem noktaları

Kesitlerden ince bir yüzey örtüsü (0-5 m) altında, nispeten yüksek öz dirençli (~150-300 Ω m), yaklaşık 25 m. derinliğe kadar inen kil, kum ve çakıl içeren alüvyon birimlerin bulunduğu, bu birimin altında ise neojen yaşlı konglomera, kumtaşı, kil, silt, marn ve kireçtaşı ardalanmasının yer aldığı söylenebilir. Bu birimlerin oldukça düşük öz dirence (~5-20 Ω m) sahip olması nedeniyle sıcak su içerebileceği düşünülmüştür. Isıl uçuşma modeli tasarlanırken, bu özellik göz önünde tutulmuştur

5 metre aralıklarla, 500 metre uzunluğundaki C profili boyunca toplanan doğal potansiyel ölçümlerinin yığınsal değerleri, uzaklığın fonksiyonu olarak grafiklenerek SPINV (Ram Babu ve Atchuta Rao, 1988) ters çözüm programı ile değerlendirilmiştir (Şekil 8(a)). Küre modeline göre değerlendirilen C profilinin uçuşma açısı 20° olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. DES yönteminin uygulandığı A profilinin Ters çözümü yapılmış (a) görünür öz direnç eğrileri, (b) görünür öz direnç yapma kesiti, (c) gerçek öz direnç kesiti ve (d) jeolojik yapı kesiti



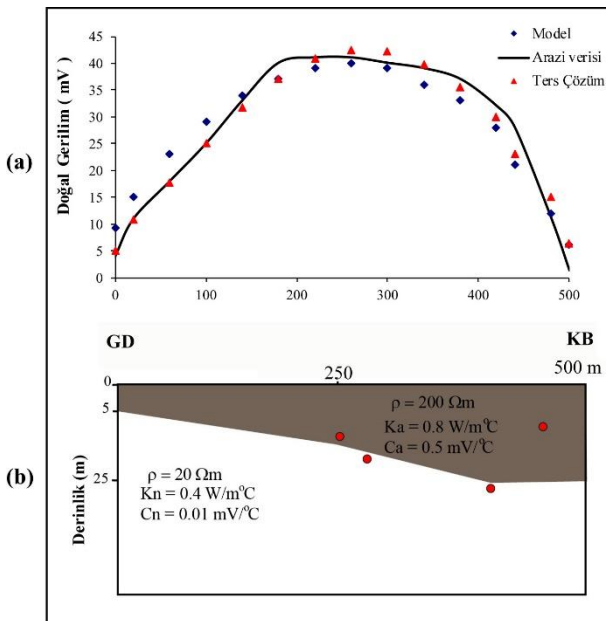
Şekil 7. DES yönteminin uygulandığı B profilinin Ters çözümü yapılmış (a) görünür öz direnç eğrileri, (b) görünür öz direnç yapma kesiti, (c) gerçek öz direnç kesiti ve (d) jeolojik yapı kesiti

Tablo 3. A ve B profillerindeki DES noktalarının ters çözüm sonucu ulaşılan parametreleri

Nokta No	Özdirenç ($\rho, \Omega m$)	Tabaka kalınlığı (h, m)
A1	21	5
	201	10
	13	
A2	21	5
	397	5.5
	11	
A3	29	6.6
	146	16
	13	
A4	20	4
	184	17
	12	
B1	22	6
	407	6
	21	
B2	20	5
	402	5.5
	22	
B3	16	2.5
	157	9
	12	
B4	22	5
	167	17
	16	

3.3 Isıl Uçlaşma Yöntemi Uygulamaları

Elde edilen özdirenç ve doğal gerilim bilgileri birleştirilerek, Eşitlik 17 ve 18 ile verilen uçlaşmadan dolayı oluşan akımlar denklemlerinin düz çözümlerinden olası model ve parametrelerine ulaşmak amaçlanmıştır.



Şekil 8. (a) Bursa- Acemler bölgesinde C profilinde ölçülen, ters çözüm ve ısıl modele göre hesaplanan DP anomalileri, (b) ısıl uçlaşma yöntemiyle oluşturulan model

Yöntem yeraltına uygulanırken, jeolojik yapı ile doğal potansiyel dağılımının hesaplanması için kullanılan ortam parametreleri (ortamın özdirenç, ısıl iletkenliği, ısıl elektrik potansiyeli katsayıları) uyumlu olmalıdır. Bu nedenle oluşturulacak model için DES yönteminden elde edilen derinlik ve özdirenç bilgileri kullanılmıştır. Özdirenç değerleri, alüvyon için 200 Ω m, neojen birimler için ise 20 Ω m. olarak seçilmiştir. Bölgede ısıl iletkenlik ölçümü verileri bulunmadığından Tablo 1'deki uygun kayaç tipine göre ısıl iletkenlik değeri ataması yapılmıştır. Ayrıca, modeldeki alüvyon ve neojen birimler arasındaki sınırın geometrisi, özdirenç yönteminden elde edilen kesitler ve DP yönteminin ters çözümünden elde edilen polarlanma açısı (20°) göz önünde tutularak belirlenmiştir. Özdirenç değerleri dışındaki model parametreleri, ortamdaki birimlere göre değiştirilerek en uygun model eğrisi elde edilene kadar sürdürülmüştür. Buna göre, neojen birimlerin ısıl iletkenliği (K_n) 0.4 W/ m $^\circ$ C, ısıl elektrik potansiyel katsayısı (C_n) 0.01 mV/ $^\circ$ C ve alüvyonun ısıl iletkenliği (K_a) 0.8 W/ m $^\circ$ C, ısıl elektrik potansiyel katsayısı (C_a) ise 0.5 mV/ $^\circ$ C olarak seçilmiştir. Alüvyon ve onun altındaki neojen birimler arasındaki sınırlara yakın olarak dört adet termal kaynak modele yerleştirilmiştir (Şekil 8(b)). Modeldeki kaynakların güçleri 0.5 MW olarak alınmıştır. Ölçülen, ters çözümü yapılan ve bu modele göre hesaplanan doğal potansiyel değerleri Şekil 8(a)'da gösterilmiştir. Eğriler arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu söylenebilir (Isıl uçlaşma modeli ve ters çözüm için Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) sırasıyla; 3.77mV ve 2.42 mV'dur).

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, jeotermal bir alana ait ısıl ve jeofizik parametrelerinin birlikte kullanılmasıyla sistemin modellenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, kuramsal modeller üretilmiş ve gerçek bir alana yöntem uygulanmıştır.

Tekdüze, homojen ortam ve dayk kuramsal modelleri oluşturulurken, noktasal sıcaklık kaynaklarının yarattığı doğal gerilim belirtileri üzerinde ortamların özdirenç, ısıl iletkenlik, ısıl elektrik potansiyel katsayıları ve kaynak gücünün değişiminin etkileri incelenmiştir. Tekdüze, homojen ortamda ısıl iletkenliğin, ısıl elektrik potansiyel katsayılarının ve kaynak gücünün değişiminin doğal gerilim belirtilerinin şeklini az, genliğini ise önemli oranda etkilediği görülmüştür.

Dayk modelinde ise, daykın çevresiyle olan özdirenç ve ısıl iletkenlik farklılığının, belirtinin genliğini değiştirdiği görülmüştür. Hatta özdirenç değişiminin anomalide bir miktar şekil değişikliğine de yol açtığı söylenebilir. Dayk ve çevresinin ısıl elektrik potansiyel katsayıları birbirinden farklı olduğu durumda, belirtilerin şekilleri birbirinden oldukça

farklıdır. Doğal potansiyel belirtilerini en çok ısı elektrik potansiyel katsayılarının etkilediği görülmüştür.

Alan çalışmasının yapıldığı Bursa Acemler bölgesinde doğal gerilim ve düşey elektrik sondaj yöntemleri uygulanmıştır. Isıl uçuşma yöntemini uygulamak amacıyla, ölçülen özdirençlere ve bölgenin jeolojisine uygun bir model oluşturulmuştur. Model oluşturulurken, DP ve DES yöntemleri ile saptanan parametreler kullanılmıştır. Model parametreleri ve kaynak yerleri değiştirilerek ölçülen doğal potansiyel belirtilerine en uygun model eğrisi üretilmiştir. Buna göre, yüzeydeki alüvyon birimin; özdirencinin 200 Ωm ., ısı elektrik potansiyel katsayısının 0.5 mV/ $^{\circ}\text{C}$, ısı iletkenliğinin 0.8 W/ m $^{\circ}\text{C}$ ve altındaki neojen birimin, özdirencinin 20 Ωm ., ısı elektrik potansiyel katsayısının 0.01 mV/ $^{\circ}\text{C}$, ısı iletkenliğinin 0.4 W/ m $^{\circ}\text{C}$ olabileceği belirlenmiştir. Elde edilen DES modellerinde kuzeybatıya doğru alüvyon kalınlığının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca bu yönde Çekirge termal alanından da uzaklaşmaktadır. Isıl uçuşma modelinin geometrisine bu durum yansıtılmıştır. Modeldeki her iki birimin ısı iletkenliklerinin çok büyük olmaması ve sıcaklık kaynağı sayısının az olması bu durumu açıklamaktadır.

Isıl uçuşma yönteminde, ısı iletkenliğinin ölçülerek modellemede kullanılması uygundur. Ancak, çalışma alanına ait ölçülmüş ısı iletkenlik verilerinin bulunmaması nedeniyle, bu parametreler deneme yanılma yöntemi ile modeldeki birimlere atanmıştır. Bu işlem yapılırken rasgele değil, Wilt ve Butler(1990)'ın belirlediği birimlere ait parametre aralıklarına uygun değerler verilmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, ısı uçuşma yönteminin, yukarıda bahsedilen bazı kabullerin yapılması şartıyla, DES ve DP verilerinin birlikte yorumlanmasında güçlü bir araç oluşturduğunu ve jeotermal sistemlerin çeşitli özelliklerinin belirlenmesinde etkin şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, "Sıcak Alanlarda Jeofizik Modellemeler ve Uygulamaları, (2005)" adlı doktora tezinden üretilmiştir. Ayrıca Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü tarafından 02.KB.FEN.013 nolu bilimsel araştırmaya projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazar Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne teşekkür eder.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar

- Başokur, A. T., 2004. Düşey Elektrik Sondajı Verilerinin Yorumu. Ankara: A. Ü. , Müh. Fak. Jeofizik Müh. Bölümü.
- Bobachev, A.A., Modin, I.N., Shevnin, V.A., 2002. IPI2WIN v2.1, Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics (yayınlanmamıştır).
- Bodvarsson, G.S., 1982. Mathematical Modeling of the Behavior of Geothermal Systems under Exploitation, D o k t o r a Tezi. California Berkeley Üniversitesi, USA.
- Corwin, R.F., 1990. The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications. S.H. Ward (Edt.), Geotechnical and Environmental Geophysics içinde, (s. 127-145), Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
- Corwin, R.F., Hoover, D.B.,1979. The Self-potential Method in geothermal exploration. Geophysics, 44, 226-245.
- de Witte, L., 1948. A New Method of Interpretation of Self-Potential Data. Geophysics, 13, 600-608.
- Drahor M.G., Berge M.A., 2006. Geophysical Investigations of the Seferihisar Geothermal Area, Western Anatolia, Turkey. Geothermics, 35, 302-320.
- Erişen B., Öngür T., 1976. Bursa City Thermal Water Study. Report No: 5659. Mineral Research and Exploration Institute (MTA), Ankara, Turkey.
- Erişen, B., Akkuş, İ., Uygur, N., Koçak, A., 1996. Türkiye Jeotermal Envanteri. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Giampaolo V., Calabrese, D., Rizzo, E., 2016. Transport Processes in Porous Media by Self-Potential Method. Applied and Environmental Soil Science, 2016, 1-12.
- Gök, E., Polat, O., 2012. An Assessment of the Seismicity of the Bursa Region from a Temporary Seismic Network. PAGEOPH, 169, 659-675.
- Haklıdır, F.S.T., 2013. Hydro-geochemical Evaluation of Thermal, Mineral and Cold Waters between Bursa City and Mount Uludağ in the South Marmara Region of Turkey. Geothermics, 48, 132-145.
- Ishido, T., Mizutani, H., Baba, K., 1983. Streaming Potential Observations, Using Geothermal Wells and In Situ Electrokinetic Coupling Coefficients under High Temperature. Tectonophysics, 91, 89-104.

- Madden, T.R., 1971. The Resolving Power of Geoelectric Measurements for Delineating Resistive Zones with the Crust. T.G. Haecock (Edt.), The Structure and Physical Properties of the Earth's Crust. AGU Monograph Series-14 içinde (s.95). Washington DC: American Geophysical Union.
- Marshall, D.J., Madden, T.R., 1959. Induced Polarization, a Study of Its Causes. *Geophysics*, 24, 790.
- Meiser, P., 1962. A Method for Quantitative Interpretation of Self-Potential Measurements. *Geophys. Prospect.*, 10, 203-218.
- Nourbehecht, B., 1963. Irreversible Thermodynamics Effects in Inhomogenous Media and their Application in Certain Geoelectric Problems. Doktora Tezi. M.I.T., USA.
- Oliveti, I., Cardarelli E., 2017. 2D Approach for Modelling Self-Potential Anomalies: Application to Synthetic and Real Data. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 58, 415-430.
- Onsager, L., 1931. Reciprocal Relations in Irreversible Processes I. *Physical Review*, 37, 405-426.
- Özgüler, M.E., Ünay, T., 1978. Bursa Ovası Jeotermal Enerji Aramaları Rezistivite Etüd Raporu, MTA Rapor No:6255, Ankara, Türkiye.
- Paul, K., 1965. Direct interpretation of self potential anomalies caused by inclined sheet of infinite horizontal extension. *Geophysics*, 30, 418-423.
- Ram Babu, H.V., Atchuta Rao, D., 1988. A Rapid Graphical Method for the Interpretation of the Self-Potential Anomaly over a Two-Dimensional Inclined Sheet of Finite Depth Extent. *Geophysics*, 53, 1126-1128.
- Sheffer R. M., 2007. Forward Modelling and Inversion of Streaming Potential for the Interpretation of Hydraulic Conditions from Self-Potential Data. Doctorate thesis, The University of British Columbia, Canada.
- Sındırgı P., 2005. Sıcak Alanlarda Jeofizik Modellemeler ve Uygulamaları, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye.
- Sill, W.R., Johng, D.S., 1979. Self Potential Survey, Roosevelt Hot Spring, UTAH. DOE/DGE topical report. University of Utah.
- Sill, W.R., 1983. Self-Potential Modeling from Primary Flows. *Geophysics*, 48, 76-86.
- Schima, S., Wilt, M., Ross, H.U.S., 1996. Modeling Self-potential Data in the Abraham and Meadow-Hatton Geothermal Systems. Department of Energy, research summaries.
- Wilt, M., Butler, D., 1990. Numerical Modeling of SP anomalies: Documentation of Program SPPC and Application in Geotechnical Applications of the Self-potential Method. Technical Report No:4. Department of the Army Waterworks Experiments Station, Corps of Engineers, Mississippi, USA.
- Yasukawa, K., 1993. A Coupled Self Potential (SP), Fluid and Heat Flow Model for Subsurface Fluid Flow Systems. Yüksek Lisans Tezi. California Üniversitesi, USA.
- Yasukawa, K., Mogi, T., Widarto, D., Ehara, S., 2003. Numerical Modeling of a Hydrothermal System Around Waita Volcano, Kyushu, Japan, Based on Resistivity and Self-Potential Survey Results, *Geothermics*, 32(1), 21-46.
- Yasukawa, K., Ishido, T., Suzuki, I., 2005. Geothermal Reservoir Monitoring by Continuous Self-Potential Measurements, Mori Geothermal Field, Japan. *Geothermics*, 34(5), 551-567.
- Yungul, S.H. 1950. Interpretation of Spontaneous Polarization Anomalies Caused by Spheroidal Orebodies. *Geophysics*, 15, 237-246.