



Hasan Dağı Volkanı ve Çiftlik-Bozköy (Orta Anadolu) Gömülü Kalderasını Besleyen Aktif Magma Odalarına İlişkin Isı Transferi Analizleri
Heat Transfer Analysis of Active Magma Chambers Feeding Hasan Dağı Volcano and Çiftlik-Bozköy (Central Anatolia) Hidden Caldera

Özgür Karaoğlu*

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir

• Geliş/Received: 17.08.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 28.12.2023 • Kabul/Accepted: 19.01.2024
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 03.04.2024 • Baskı/Printed:

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Ülkemizdeki Jeotermal enerji kaynaklarının %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Kapadokya bölgesi son yıllarda jeotermal sektörünün potansiyelin artırılması adına pek çok yatırımın yapıldığı önemli bir saha olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda Hasan Dağı ve çevresinde jeotermal enerji bulmak ve işletmek amaçlı sondaj faaliyetleri sürdürülmektedir. Bunların en önemlisi 3S Kale Enerji şirketi tarafından yürütülen çalışmalarda Çiftlik-Bozköy bölgesinde, 3.814 metre derinlikte 295 °C; diğer daha derin sondajdan 3.957 metre derinlikten 341 °C kuyu dibi sıcaklık değeri elde edilmiştir. Bu iki sondaj verisinden yararlanarak sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre söz konusu sıcaklık değerlerini üretebilmek için 7 km derinlikte 600-700 °C ve/veya 8 km derinlikte 900-1.000 °C sıcaklığında ısı kaynağı olarak işlev gören bir magma odasının (magma odası çatısı) üst kabukta bulunması gerekmektedir.

Hasan Dağı ve çevresinde gerçekleştirilen manyetotellurik (MT) çalışmaları sonucunda özellikle Niğde düzlüğüne doğru elde edilen profillerde 4-6 km derinlikte ve yaklaşık aynı ölçülerdeki genişlikte olası bir magma odası olduğu önerilmiştir. Bu MT çalışmaları ile sondaj verileri birlikte değerlendirilerek Hasan Dağı ve çevresinde muhtemel açılacak sondaj çalışmaları için çeşitli sıcaklık belirtileri elde edilmiştir. Buna göre, Hasan Dağı güneybatısında yer alan düzlük alanlarda yürütülecek jeotermal sondaj faaliyetlerinden 3.814 metrede 120 °C; 3.000 metrede 90 °C; 2.000 metrede 74 °C; 1.000 metrede 41 °C gibi yaklaşık sıcaklık değerlerinin elde edilmesi beklenmektedir. Hasan Dağı altındaki magma odasına doğru aynı derinlikte sıcaklık değeri 600 °C'ye ulaşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hasan Dağı, ısı transferi, jeotermal enerji, Magma, sayısal modelleme, volkan.

Abstract: In Turkey, 78% of geothermal energy resources are located in Western Anatolia, 9% in Central Anatolia, 7% in the Marmara Region, 5% in Eastern Anatolia, and 1% in other regions. The Cappadocia region stands out as an important area where many investments have been made in recent years to increase the potential of the geothermal sector. In recent years, drilling activities were carried out in and around Hasan Dağı volcano to find and utilise geothermal energy. The most important of these was carried out by the 3S Kale Energy company in the Çiftlik-Bozköy region, where temperature values of 295 °C at a depth of 3,814 meters and 341 °C from another deeper drilling at a depth of 3,957 meters were obtained. Numerical modelling studies were carried out using data from these two individual drillings. According to the simulation results, the magma chamber (magma chamber roof), which acts as a heat source with a temperature of 600-700 °C at a depth of 7 km and/or 900-1,000 °C at a depth of 8 km, must still be actively present in the upper crust to produce these temperature values.

Magnetotelluric (MT) studies conducted in Hasan Dağı and vicinity suggest a potential magma chamber with a depth of 4-6 km and a width of approximately the same dimensions, especially in the profiles obtained towards Nigde plain. These MT studies and drilling data were evaluated together and temperature anomalies were obtained for possible drilling in and around Hasan Dağı. Accordingly, it is estimated that approximate temperature values of 120 °C at 3814 meters, 90 °C at 3,000 meters, 74 °C at 2,000 meters, and 41 °C at 1,000 meters will be obtained from geothermal drilling carried out in the flat areas located southwest of Hasan Dağı. The temperature ascends to 600°C at the equivalent depth beneath the magma chamber of Hasan Dağı.

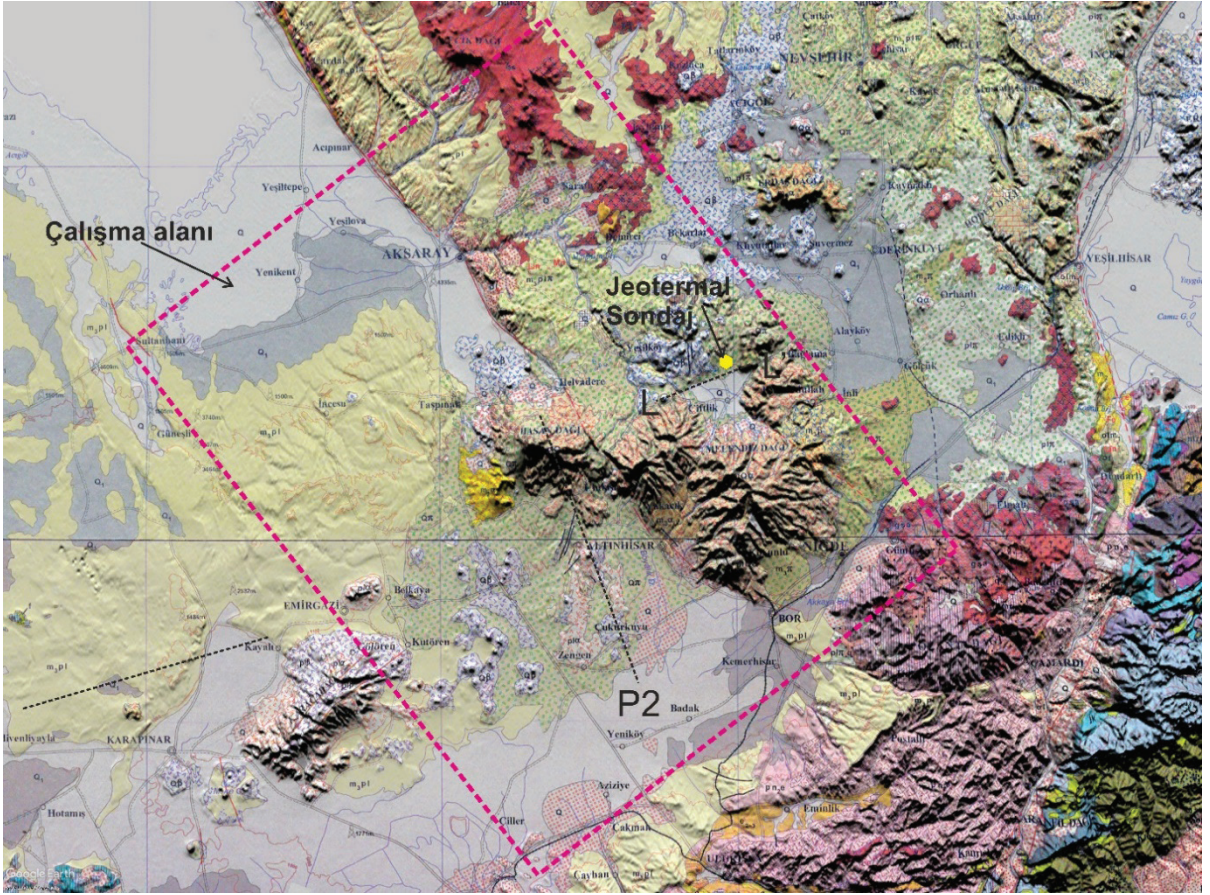
Keywords: Geothermal energy, Hasan Dağı, heat transfer, Magma, numerical modelling, Volcano.

GİRİŞ

Jeotermal enerji yenilebilir enerji kaynakları arasında en çok yatırım yapılan alanlardan birisini teşkil etmektedir. Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa'nın 1. ülkesi ve kurulu güç bakımından ise Dünyanın 4. ülkesi konumundadır (Şener vd., 2022). Ülkemizdeki Jeotermal enerji kaynaklarının %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır (Şener vd., 2022). Kapadokya bölgesi son yıllarda jeotermal sektörü adına pek çok yatırımın yapıldığı önemli bir saha olarak öne çıkmaktadır. Bölge jeolojisinin özellikle Kuvaterner dönemi boyunca aktif magma odalarından püsküren volkanik malzemeler ile örtülü olması, jeotermal sektörünün bu bölgeye olan ilgisini daha da artırmaktadır. Kuvaterner dönemi boyunca aktif volkanik bölgeler, volkanik püskürümler sürecinde ve birkaç milyon yıl boyunca ısı kaynağı görevi gören magma oda ve rezervuarların sığ kabuğa yerleşmeleri sonucunda bölgedeki ısı akısının artışına neden olması sebebiyle jeotermal kaynakların yaygın olarak bulunacağı sahalardır (Jaeger, 1959; De Silva and Gregg, 2014; Gelman et al., 2013; Karakas et al., 2017; Karaoğlu 2021).

Kapadokya Volkanik Bölgesi (KVB) jeotermal enerji potansiyeli olan bir bölge olarak son yıllarda öne çıkmaktadır. Gömülü kaldera yapıları, aktif kabuğa yerleşmiş sıcak intrüzyonlar

temel ısı kaynakları arasında sayılabilir. KVB bölgesinde geniş düzlüklere yayılan ve birkaç yüz metreye ulaşan ignimbiritlerin olası püskürüm merkezlerine ilişkin pek çok jeofiziksel çalışma yürütülmüştür (örn., Pasquare vd., 1988; Le Pennec vd., 1994; Toprak, 1998; Froger vd., 1998; Koşaroğlu vd., 2016; Bilim vd., 2017; Aydemir vd., 2019). Bölgede gömülü kaldera yapıları ile ilgili yürütülen çalışmalar KVP'nin özellikle orta ve batı kesiminde birkaç km derinlikteki bu depresyon yapılarına işaret etmektedir. Pasquare vd. (1988) özellikle KVP'nin batısında yüzeylemiş ignimbiritlerin olası püskürüm merkezi için Melendiz stratovulkanı ve Çiftlik bölgesine işaret etmişlerdir (Şekil 1). Bilim vd. (2017) yaptıkları çalışmada çapı 50 km'yi aşan Aksaray-Nevşehir-Niğde-Yeşilhisar arasındaki bölgenin bir depresyon ya da kaldera özelliği gösterdiklerini önermişlerdir (Şekil 1). Ayrıca araştırmacılar söz konusu bölgenin jeotermal gradyan değerinin 50-68 °C/km; ısı akışı değerinin 2,3 ve 2,7 Wm⁻¹ K⁻¹ ayrıca radyojenik ısı akış üretim değerinin 0,45 ve 0,70 IW m⁻³ arasında olduğunu belgelemişlerdir. Şener vd. (2023) Kapadokya bölgesinde sıcaklık jeotermometre sıcaklık hesaplamaları yaparak çalışma alanına yakın bölgeler için çeşitli sıcaklık değerleri elde etmiştir. Kalsedon jeotermometre hesaplamaları 54-126 °C (Nevşehir); 48-159 °C (Aksaray); 73-159 °C (Niğde) olarak ölçülmüştür. Kuvars jeotermometre hesaplamaları 85-173 °C (Nevşehir); 79-180 °C (Aksaray); 102-180 °C (Niğde) sıcaklık değerlerine işaret etmektedir.



Şekil 1. Bölgenin rölyef etkili üç boyutlu Jeoloji haritası (MTA Jeoloji Etüdları Dairesi tarafından hazırlanmıştır, Atabey, 1999) ve önceki çalışmalardan elde edilen manyetotellürik ölçümlere ilişkin profiller (L-L' profili: Hacıoğlu vd., 2023; P2 profili: Tank ve Karaş, 2020).

Figure 1. Three-dimensional geological map of the region with relief effects (prepared by the General Directorate of Geological Studies of the Mineral Research and Exploration Institute, Atabey, 1999) and profiles of magnetotelluric measurements obtained from previous studies (L-L' profile: Hacıoğlu et al., 2023; P2 profile: Tank and Karaş, 2020).

Söz konusu ticari girişimin web sitesinden (URL1, 2023) yaptığı açıklamada Bozköy ruhsatından (i) 2016 yılında 3.814 metre derinliğinde bir sondaj yaparak Türkiye'nin en sıcak kuyusunu bulduğunu; 295 °C taban sıcaklığı olan bu kuyu buhar üretme kapasitesine sahip olduğunu duyurmuştur (Şekil 1). Aynı sahada 2021 yılında açılan ve 3.957 metre derinliğinde olan 2. kuyudaki taban sıcaklığı ise 341 °C olarak ölçülmüş olup, her iki kuyu da Türkiye'nin en yüksek taban sıcaklığı olan kuyuları olarak kayıtlara geçmiş durumdadır.

Bu çalışmada söz konusu ticari girişimin açmış olduğu kuyu sıcaklık verilerine dayanarak, ısı kaynağının Hasan Dağı mı yoksa bu bölge altında daha önce bilinmeyen bir ısı kaynağının mı olduğu sorularına cevaplar aranmaya çalışılacaktır. Bunun için Lisanslı Comsol Multiphysics 6.1 programı (Tabatabaian, 2014) kullanılarak katı özellikteki litolojilerde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir.

BÖLGE JEOLojİSİ ve JEOFİZİĞİ

Geç Senozoyik dönemi boyunca Avrasya, Afrika ve Arabistan plakaları arasındaki yakınlaşma ve nihayetindeki bu plakaların çarpışmaları bölgesini şekillendirmiştir. Orta Anadolu platosu bu orojenik olaylara tektonik deformasyon, hızlı kabuksal yükselimler ve oldukça yüksek hacimdeki volkanik etkinlikler ile karşılık vermiştir. Orta Anadolu platosu günümüz topografyasını son 10 My'lık süreç içinde yaklaşık 1 km'lik yükselme sonucu kazanmıştır (Cosentino vd. 2011; Yildirim vd. 2011; Schildgen vd. 2012). Bu yükselimlere sebep olan kabuksal deformasyon manto kaynağından ergiyen magmanın yüzeye taşınmasında büyük rol oynamıştır. Magmanın çoğunlukla litosferik-ancak yer yer astenosferik manto katkıların da olduğu gözlenmektedir.

Magma yüzeye ulaşması sürecinde fraksiyonlaşma sürecinin baskın bir şekilde izlendiği görülmektedir. Magmanın özellikle üst kabuk boyunca kabarcıklaşma ve köpüklenmesi yüksek enerjili püskürmeli volkanik etkinliklere sebep olmuştur. Manto ergimeleri sonucu, daha çok kabuk boyunca yerleşen magma rezervuar ve bunlardan ayrılan magma odaları ile sonuçlanmıştır. Söz konusu magma rezervuar ve odaları kabuk boyunca yerleşimlerinin ardından, kabuksal deformasyonlar sonucu gelişen zayıf zonlar boyunca (bazen kırık-çatlak ve fay düzelmeleri) büyük hacimli (1-10 km³) stratovolkanları, dom yerleşimlerini, daha küçük hacimli (1 km³) çatlak kontrollü lav püskürmelerini sürekli beslemiştir.

Kapadokya Volkanik Bölgesi (KVB) stratovolkanlar (örn., Hasan Dağı, Erciyes ve Göllüdağ) ve kaldera volkanlarından püsküren ignimbirit serileri ile karakteristiktir (Şekil 2). Birkaç yüz metreye ulaşan ignimbirit ve püms-kül geri düşme ürünleri kökensel olarak magmanın kabuk boyunca fraksiyonlaşması ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir.

Hasan Dağı'nın güneybatısında yer alan Keçikalesi volkanı, KVP'nin batı kesimindeki ilk volkanik etkinliklerinden birini temsil etmektedir (Şekil 1 ve 2). Besang vd. (1977) bu volkanik ürünlerin 13,7±0,3 My ile 12,4±0,6 arasında püskürdüğünü tarihlemiştir. Paleo-Hasan Dağı olarak Aydar ve Gorgaud (1998) tarafından adlandırılan ilk lav ürünleri 6,31 My±0,9 (K/Ar yaşı) ile Taşpınar köyü civarında gözlenen ignimbiritler Deniel vd. (1998) tarafından 7,21±0,9 My (K/Ar yaşı) olarak tarihlendirilmiştir. Mezo-Hasan Dağını oluşturan lav akıntıları, dom yerleşimleri ve piroklastik malzemeler 700 bin yıl olarak tarihlendirilirken (Aydar, 1992); Neo-Hasan Dağı olarak adlandırılan ve volkanın günümüz morfolojisini şekillendiren volkanik ürünlerden oldukça genç yaşlar elde edilmiştir. Karakapı köyü civarındaki dom ve lav akıntılarında 0,08 ve 0,58 My (Ercan vd., 1990); Gözlükuyu köyü civarındaki bazaltik koniden 120-65 bin yıl (Ercan vd., 1990) lav akıntılarında ise 34 bin yıl yaş verileri elde edilmiştir (Aydar ve Gourgaud, 1998). En genç efüzif karakterli volkanik aktiviteler 29 ve 33 bin yıl olarak Kuzucuoğlu vd. (1998) tarafından belgelenmiştir. Ayrıca en genç ürünler arasında bazaltik dom, blok kül akıntısı ve andezitik lavlardan 29 ve 9 bin yıl yaş verileri kaydedilirken; kaldera sonrası domun 6 bin yıl önce yerleştiği belirtilmiştir (Aydar ve Gourgaud, 1998).

Çiftlik-Bozköy bölgesi morfolojik olarak 6-6,5 km çapına ulaşan kaba bir elipsoid geometriye sahip çukurluk bir alandır. Üstte birkaç 10 metreye kadar ulaşan volkaniklerden türeme alüvyon malzemesi, bunun altında oldukça kalın bir piroklastik birim yer alır. Bozköy ve Çardak civarından Yeşilköy sırtlarına doğru bu ignimbiritik örtünün üzerinde yer alan genelde ortaç volkanik kayaçlar bulunmaktadır (Şekil 1 ve 2).

BASKIDA

Hasan Dağı Volkanı ve Çifilik-Bozköy (Orta Anadolu) Gömülü Kalderası Besleyen Aktif Magma Odalarına İlişkin Isı Transferi Analizleri

Sistem	Seri	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA	Kalınlık (km)	k [w/m.K]	Cp [J/(kg.K)]	α [1/K]	
Kuvaterner	Holosen		Aluvyal fan depozitleri Pomza ve skorya geri düşme ürünleri Bazaltik lav akmaları Blok ve kül akmaları	L1	2	0,45	850	$3,0 \times 10^{-6}$
	Pleyistosen		Bazaltik lav ve piroklastik ürünleri Andezitik lav ve piroklastik ürünleri Piroklastik ve breşik ürünler ve andezitik ve bazaltik lav ürünleri	L2	5	1,50	950	$7,2 \times 10^{-6}$
Neojen	Pliyosen		Gösel kireçtaşı ve ara katkılı kiltası	L3	1	1,30	840	$4,6 \times 10^{-6}$
			İgnimbirit Lav, tuf ve diğer piroklastik çökeller	L4	7	0,45	800	$4,8 \times 10^{-6}$
	Miyosen		İgnimbirit Bazalt, obsidyen ve andezitten oluşan breşik ignimbiritler Andezitik lav Pümis geri düşme ürünleri ve ignimbiritler	L5	2	0,41	930	$8,8 \times 10^{-6}$
Paleojen	Oligosen		Jips Konglomera, kumtaşı ve çamurtaşı	L6	3	0,25	850	$8,9 \times 10^{-6}$
	Eosen		Kireçtaşı Konglomera, kumtaşı ve kiltası	L7	2	0,85	980	$6,2 \times 10^{-6}$
Kretase			Diyabaz, gabro ve serpantinit	L8	10	1,90	980	$9,2 \times 10^{-6}$
Kretase öncesi			Mermer Kalk-şist, kuvars-şist ve gnays					

Şekil 2. Bölgenin jeolojik dikme kesiti (MTA Jeoloji Etüdüleri Dairesi tarafından hazırlanmıştır, Atabey, 1999) üzerinde farklı litolojilere ait termal parametreler (k: termal iletkenlik (kondaktivite); Cp: özgül ısı kapasitesi, α : termal genleşme sabiti).

Figure 2. Thermal parameters for various lithologies on the geological cross-section of the region (prepared by the General Directorate of Geological Studies of the Mineral Research and Exploration Institute, Atabey, 1999) (k: thermal conductivity; Cp: specific heat capacity, α : thermal expansion constant).

Tank ve Karaş (2020) tarafından Hasan Dağı, Keçiboyduran ve Melendiz dağlarının güney kesimlerini kapsayan 27 lokasyondan manyetotellürik (MT) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya göre Hasan Dağı'nın güneybatısı Niğde düzlüğüne doğru elde edilen yaklaşık 45 km'lik iki boyutlu profillerde 4-6 km derinlikte ve yaklaşık aynı ölçülerde genişlikte potansiyel bir magma odası önermişlerdir. Hacıoğlu vd. (2023) Melendiz dağı kuzeyinde, Çiftlik bölgesini de içine alan, 60 lokasyondan gerçekleştirdikleri MT çalışmalar neticesinde 3 km derinliğe ve çapı 12 km'ye kadar ulaşan gömülü bir kalderanın varlığına işaret etmektedirler. Ancak araştırmacılar, bu bölgede bir magma odasına ilişkin kanıt elde edememişlerdir (Hacıoğlu vd., 2023). Dornadula vd. (basımda) gerçekleştirdikleri nümerik modelleme çalışmasında, Şahinkalesi (Çiftlik bölgesi) altında 5 km derinlikte bir magma odası varsayımıyla, 4 km derinlikte 378 °C'ye ulaşan termal bir sistemin varlığını önermişlerdir.

Bu çalışmada magma odası ve ısı kaynağı ile ilişkili elde edilen veriler göz önünde bulundurularak söz konusu ticari girişim tarafından derin kuyu ölçümleri sonucu elde edilen sıcaklık değerleri ile olan analitik ilişkisi ele alınacaktır.

METODOLOJİ

Sayısal Modeller

Bölgenin jeolojik harita ve kolon istiflerine dayanarak sayısal modelleme çalışmalarında 8 ana kaya birimi tanımlanmıştır (Atabey, 1999; Şekil 2). Temelde, L8 olarak adlandırılan Kretase ve öncesi dönemleri temsil eden kalk-şist, mermer, diyabaz, gabro ve serpantin kayaçları yer almaktadır. Eosen dönemi kireçtaşları (L7); Oligosen dönemi konglomera ve jipsler (L6); Miyosen dönemi pümis geri düşme ürünleri ve ignimbiritler, bazalt, obsidyen ve andezitler ile başka bir ignimbiritik seviye (L5); Pliyosen

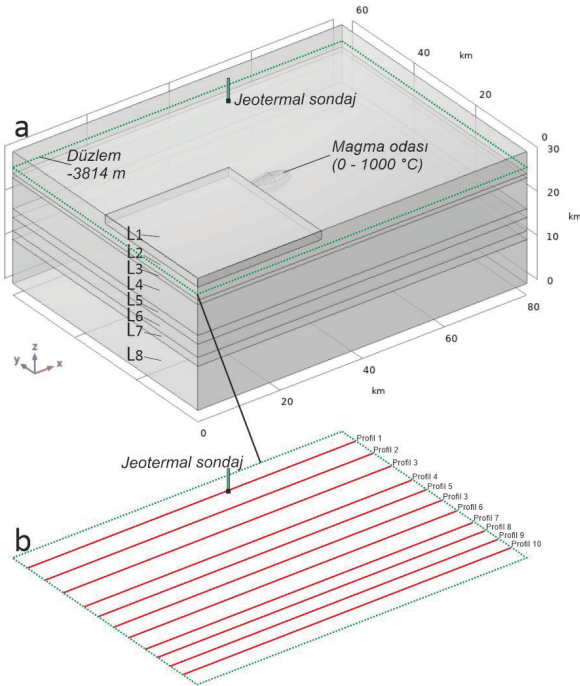
dönemi ortaç lav, tüf ve ignimbiritler (L4) ve üzerini uyumsuzlukla üzerleyen gösel kireçtaşları gelmektedir (L3). Kuvaterner döneminin erken evrelerini temsil eden bazaltik-andezitik lavlar ve ortaç ve asidik piroklastik ürünler (L2) ile blok ve kül akma çökelleri, bazaltik lav akmaları ve pomza-skorya geri düşme ürünleri ile en üstte bulunan alüvyal çökeller (L1) Holosen dönemi istiflerini temsil etmektedir (Şekil 2).

Tüm sonlu elemanlar model geometrileri COMSOL Multiphysics 6.1 (Tabatabaian, 2014) Isı Transferi Modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Magma odası geometrisi Tank ve Karaş (2020) tarafından elde edilen MT verileri ile aynı zamanda jeofizik yöntemlerle görüntülenmiş dünyadaki sıg kabul koşullarında bulunan diğer magma odaları da dikkate alınarak elipsoid şeklinde olduğu kabul edilmiştir (örn., Gudmundsson, 2012; Chestler ve Grosfils, 2013; Le Corvec vd., 2013; Caricchi vd., 2014). Modeller üç boyutlu (3-B) simetrik, içsel kaçma basıncı (P_e) ve sıcaklığa (T_e) sahip ve boş olarak kabul edilen magma odalarına uygulanmıştır (örn., Gudmundsson, 2012; Gerbault, 2012; Karaoğlu vd., 2016).

İzotermal çalışmalarda kıtasal kabuk koşullarında saf magnetitlerin ortalama Curie sıcaklığı 580 °C, genel termal gradyan değeri 25 °C -30 °C arası olarak kabul edilir (Okubo vd., 1985; Rozimant vd., 2009). Her ne kadar bölgenin termal özelliklerini çalışılan iki temel çalışma (Bilim vd., 2017; Aydemir vd., 2019) söz konusu bölgenin termal gradyan sıcaklığını nispeten yüksek 50 °C/km olarak hesaplamış olsalar da bu yüksek gradyana zaten kabuk koşullarındaki magmatik etkinlik olması sebebiyle bu çalışmada 25 °C dünya ortalama kabuk sıcaklık değerine yaklaşık bir değer kullanılmıştır.

Bu kaya birimlerinin her birine (L1-L8) litolojik özelliklerine uygun termal parametreler tanımlanmıştır (Şekil 3). Modellemelerde termal kondaktivite değerleri için k [W/(m*K)] 0,25 ve 1,9 arasında; değişken sıcaklık değişimi

koşullarını hesaplanması için (bir kaya kütlelerinin geçici bir ısı kaynağına tepkisi) özgül ısı kapasitesi C_p [J/(kg*K)] 840 ve 980 arasında; α değeri termal genişleme sabiti olarak [1/K] her bir litoloji için $3,0 \times 10^{-6}$ ve $9,2 \times 10^{-6}$ arasında kullanılmıştır (Nabelek et al., 2012; Rodriguez et al., 2015). Modellemeleri değerlendirmek için hem üç boyutlu hacimsel hem de yatay kesitlerden yararlanılmıştır (Şekil 3a-b). Söz konusu Bozköy sondajları için 3.814 metreden yatay kesit alınmıştır (Şekil 3b). Yüzeiden 3.814 metre derinliği temsil eden kesit üzerinde mekânsal sıcaklık değişimlerini çok daha iyi gözlemek için 10 adet profil tanıtılmıştır (Şekil 3b).



Şekil 3. Heterojen kabuk segmenti boyunca elipsoidal-şığ bir magma odası ve geometrik ilişkileri gösteren üç boyutlu sayısal model kuruluşu. Magma Odası 5 MPa'lık içsel basınç ile baskılanmaktadır. Magma odası 10 X 4 X 4 km boyutlarına sahiptir.

Figure 3. Three-dimensional numerical model setup showing an ellipsoidal-shallow magma chamber and its geometric relationships along a heterogeneous crustal segment. The magma chamber has an internal pressure of 5 MPa. The dimensions of the magma chamber are 10 X 4 X 4 km.

Eşitlikler

Radyoaktif ısı transferi ihmal edilerek COMSOL'un "Heat Transfer in Solids" ara yüzünde aşağıdaki eşitlik kullanılmış olup:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = q_0 + Q_{ted} + Q \quad (1)$$

burada, ρ yoğunluk, sabit stres altında özgül ısı, mutlak sıcaklık, öteleme hareketinin hız vektörü; Q diğer kaynaklardan ısı transferi (bu durum şığ magma Odası ya da derin magma rezervuarını temsil eder); q konduksiyon ısı akısını temsil etmekte olup aşağıdaki eşitlikte tanımlanır:

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

burada, k daha önce de bahsedildiği gibi termal konduktivite değeridir. Q_{ted} katılardaki termoelastik etkileri açıklayan bir termoelastik sönümlemedir ve yalnızca ısı transferi katı mekânine bağlandığında geçerlidir ve şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{ted} = -\alpha T: \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

burada daha önce bahsedildiği gibi, α termal gerilme sabiti ve S ikinci Piola-Kirchhoff stres tensor değeridir.

Sınır Koşullar ve Parametreler

Isı transferi simülasyonları için; hesaplama alanının (T_{up}) üst yatay sınırının (yerküre yüzeyi) sıcaklığı 10 °C olarak ayarlanmıştır. Magma odasının magma rezervuar duvar sıcaklığı (T_{e1} , T_{e2} , T_{e3} , T_{e4} , T_{e5} , T_{e6} , T_{e7} , T_{e8} , T_{e9} , T_{e10}) 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 ve 1.000 °C olarak ayarlanmıştır. Hesaplama alanının sol tarafı, sağ tarafı ve alt sınırı için iki ek sıcaklık sınır koşulu kullanılır. Tüm modellerde, daha önce Jaupart vd. (1998) ve Eldursi vd. (2009) tanımladığı gibi, dikey kenarların sıcaklığı, alt yatay sınırdaki maksimum 765 °C'ye ulaşan her 1 km'lik derinlik artışı için sıcaklığın 25 °C arttığı derinliğin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$T_b(y)[^{\circ}C] = -30 y[km] \quad (4)$$

Model Ağı (Mesh)

Simülasyonlarda dört yüzlü ikinci dereceden elemanlarla COMSOL'da önceden tanımlanmış son derece ince ağ örgüsü ayarları uygulanmıştır. Bu ağ ayarı, 6,4 km'lik bir maksimum öge boyutu ve 0,8 km'lik bir en küçük öge boyutu, 0,5 değerinde eğrilik katsayısı; 0,6 değerinde dar bölgelerin çözünürlük değeri ile 1,45'lik en büyük öge büyüme hızı tanımlanmıştır. Böylelikle modellerde kullanılan toplam eleman sayısı 85.719 olmuştur.

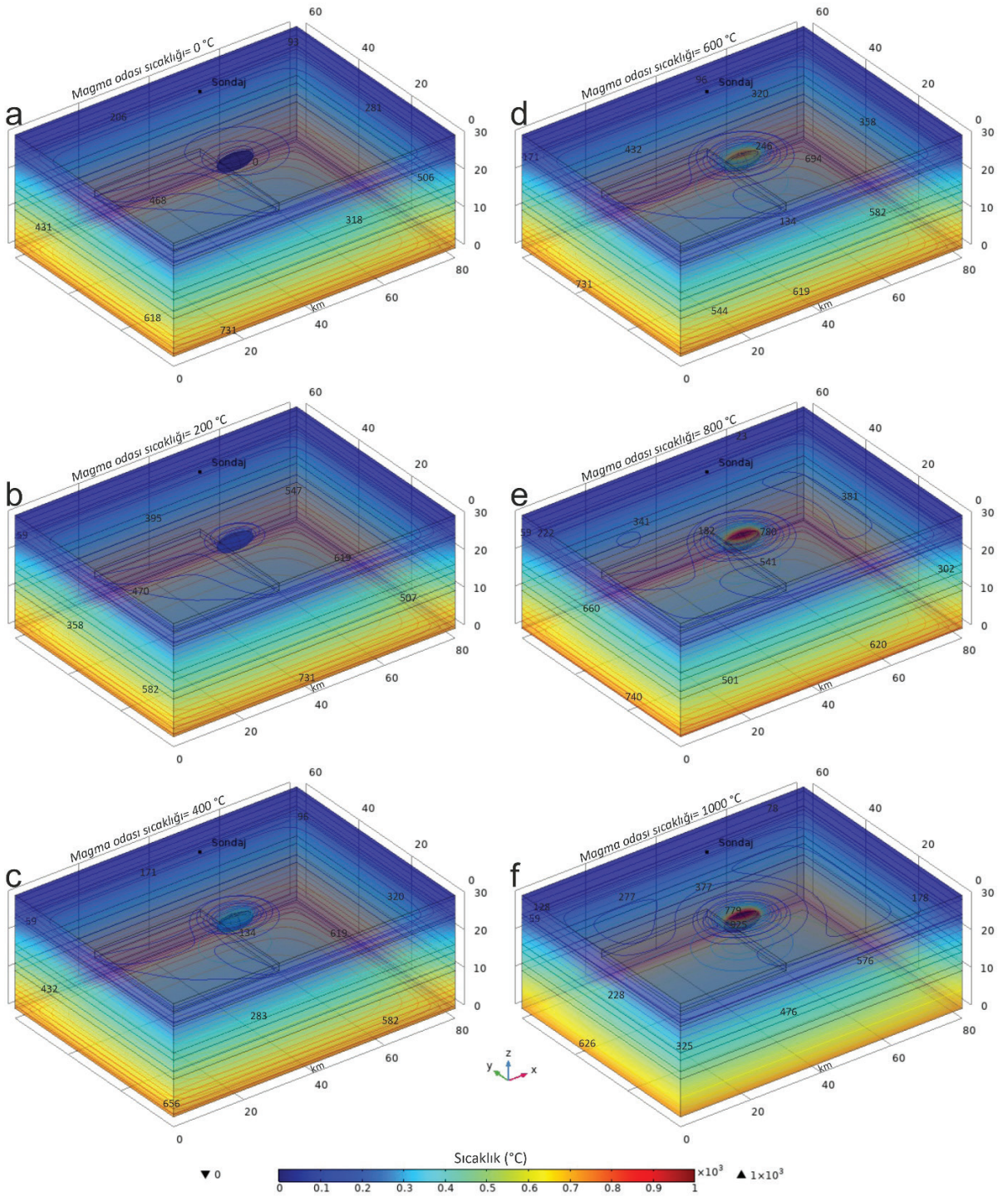
BULGULAR

Hasan Dağı Altında Magma Odası

Üç boyutlu hacimsel "ısı transferi" uygulamasında Hasan Dağı altında farklı sıcaklıklara sahip (0, 200, 400, 600, 800, 1.000 °C) magma odalarının heterojen kabuk boyunca sıcaklık dağılımları izlenmektedir (Şekil 4). Magma odası sıcaklığının etkin olmadığı (0 °C) durumda ortamda yalnızca termal gradyan ile ilgili sıcaklık dağılımı gözlenmektedir. 30 km derinlikteki sıcaklığın 765 °C olduğu yeniden hatırlanmalıdır (Şekil 4a). Magma odası sıcaklığı 200 °C olduğu durumda yalnızca magma odası ve çevresinde düşük seviyelerde bir ısı artışı olduğu söylenebilir (Şekil 4). 400 °C uygulamasında magma odasının 1 km'lik yakın çevresinde 134 °C sıcaklığa ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 4c). Magma odasına 600 °C uygulamasında sondaj ve çevresinde 96 °C'lik sıcaklık değerleri dikkati çekmektedir (Şekil 4d). Magma odasına 800 °C uygulamasında magma odasının yanal olarak 3-4 km çevresinde 200 °C'ye sıcaklık değerleri izlenirken (Şekil 4e); 1.000 °C uygulamasında sondaj bölgesi ve çevresinde 128 °C civarı sıcaklık değerleri elde edilmektedir (Şekil 4f).

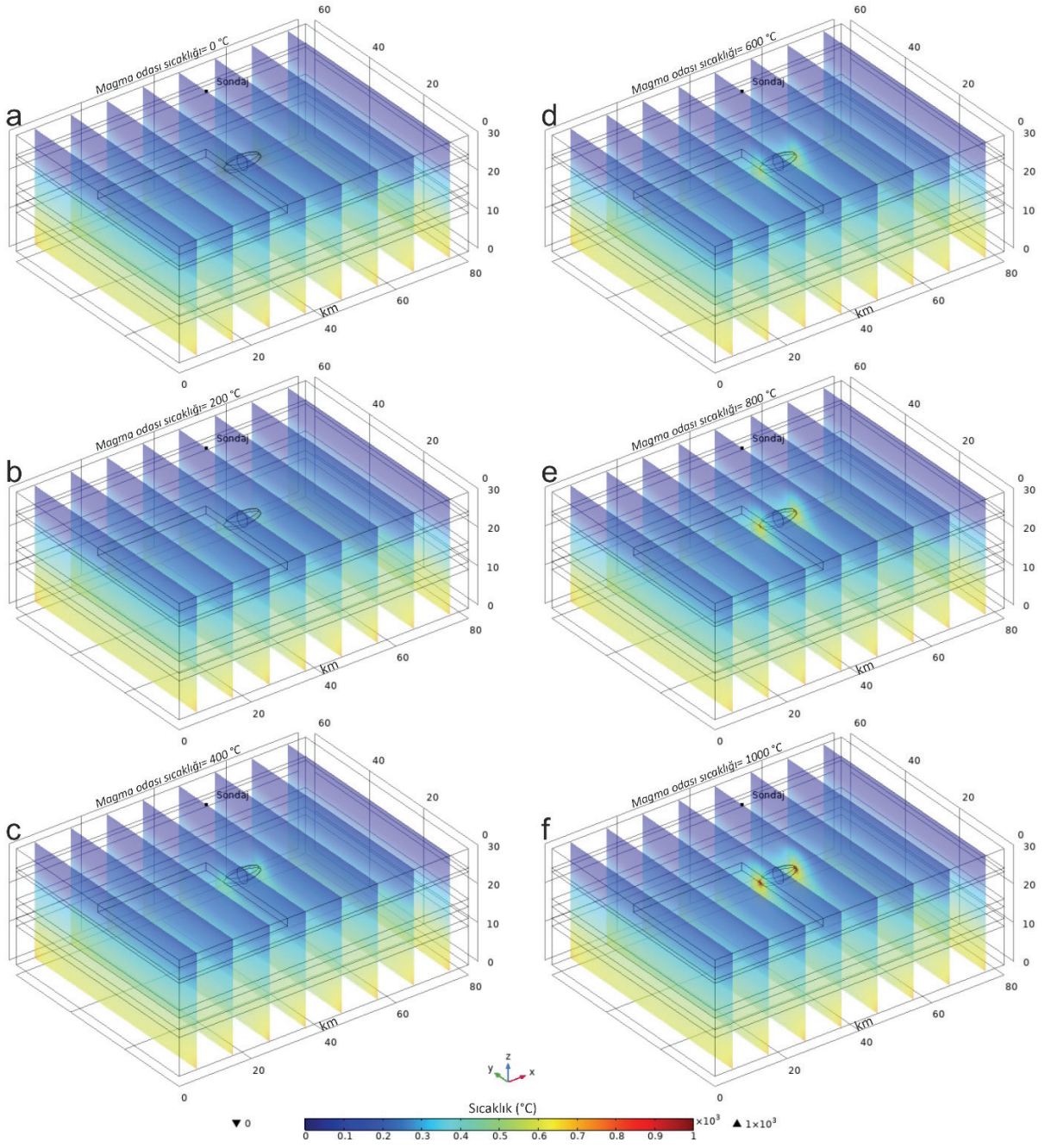
Aralarında 10 km aralıklar uygulanarak elde edilen dikey kesitler üzerinde sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 5). Tüm kesitlerde mavi renklerle simgelenen düşük sıcaklıklardan (minimum 10 °C) sarı renk ile gözlenen yüksek sıcaklıklara (maksimum 715 °C) olan dağılım ilişkileri izlenebilmektedir. Tüm uygulamalarda en yüksek sıcaklık değerleri magma odası çevresinde gözlenmektedir (Şekil 5). Magma odasının 1.000 °C olduğu uygulamada yüksek sıcaklık olarak sınıflanabilecek 600-700 °C sıcaklık değerlerinin en fazla 1 km yanal yayılımla olduğu izlenmektedir (Şekil 5).

Sondaj faaliyetinin yürütüldüğü maksimum derinliklerden birisi olan 3.814 metre boyunca kabuk içindeki sıcaklık dağılımlarının ölçülmesi için yatay bir kesit alınmıştır (Şekil 6). Söz konusu derinlikte (3.814 m) uygulanan farklı sıcaklığa sahip magma odaları için sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 6). Buna göre magma odasına uygulanan 0 °C ile beklendiği şekilde yalnızca bu derinlikteki termal gradyan değerleri elde edilmiştir. Sondaj bölgesinde 59 °C sıcaklık değeri gözlenmektedir (Şekil 6a). 200 °C uygulamasında, magma odası ve çevresinde 127 °C, sondaj bölgesinde 90 °C sıcaklık gözlenmektedir (Şekil 6b). Sıcaklık 400 °C'ye yükseldiğinde magma odası ve çevresinde 243 °C, sondaj bölgesinde yaklaşık 94 °C sıcaklık dağılımı söz konusudur (Şekil 6c). Magma odası sıcaklığı 600 °C olduğunda 1 km çevresine kadar 395 °C ve sondaj çevresinde 73 °C sıcaklık takip edilmektedir (Şekil 6d). Magma odası sıcaklığı 800 °C olması durumunda sondaj bölgesinde 82 °C (Şekil 6e); magma odası sıcaklığı maksimum 1.000 °C uygulanması durumunda ise sondaj bölgesi ve çevresinde 78 °C sıcaklık değeri elde edilmektedir (Şekil 6f).



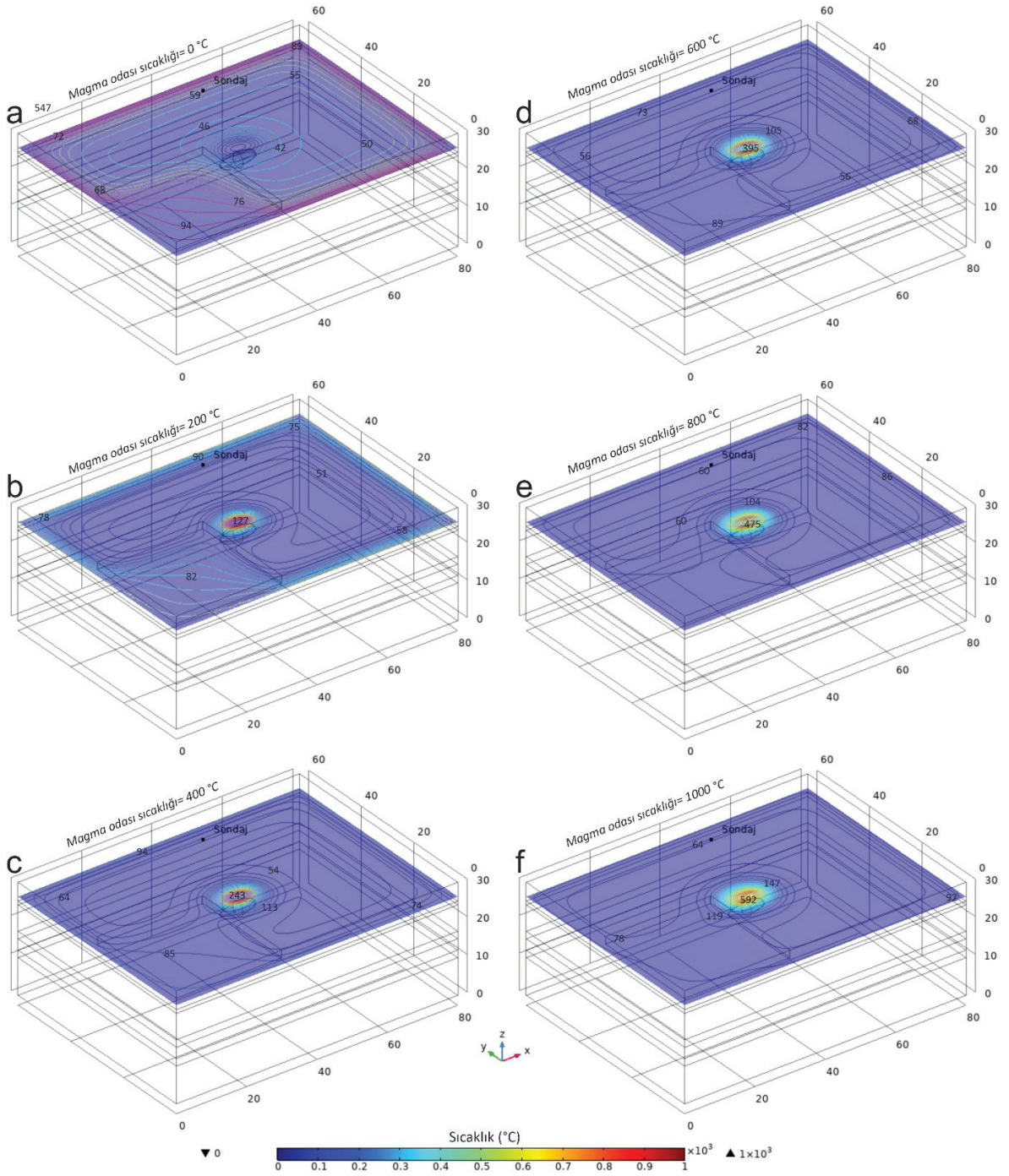
Şekil 4. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu hacimsel sıcaklık dağılımları.

Figure 4. Volumetric temperature distributions caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) along the three-dimensional crustal segment beneath Hasan Dağı volcano.



Şekil 5. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, aralarında 10 km bulunan kabuğu dik kesen dilimler boyunca sıcaklık dağılımları.

Figure 5. Temperature distributions along slices perpendicular to the crustal segment at intervals of 10 km caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) beneath Hasan Dağı volcano.



Şekil 6. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, 3814 metre derinliği temsil eden yanıl kesit boyunca sıcaklık dağılımları.

Figure 6. Temperature distributions along a lateral section representing a depth of 3814 meters caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) beneath Hasan Dağı volcano.

Sıcaklık dağılımını daha iyi takip edebilmek için, 3.814 metre derinliğe sahip sondaj derinliğinde, yatay bir kesit üzerinde birbirinden 6 km aralıklı birbirine paralel 10 adet profil boyunca incelenmiştir (Şekil 7a). Magma odasına 0-1.000 °C aralığında farklı sıcaklık uygulamaları simüle edilmiştir. Buna göre tüm profiller boyunca ortalama 100 °C sıcaklık değerleri izlenirken en yüksek sıcaklık magma odasının tam üzerinden geçen profilden ve 1.000 °C uygulanarak maksimum 600 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7a). Sondaj faaliyetinin gerçekleştirildiği alandaki sıcaklık dağılımını daha detaylı izlemek amacıyla elde edilen *Profil 1* boyunca lokal sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 7b). Söz konusu kesit boyunca ortalama 45 °C; 1.000 °C magma odası uygulaması sonucunda ise maksimum 57 °C sıcaklık değerleri hesaplanmıştır (Şekil 7b).

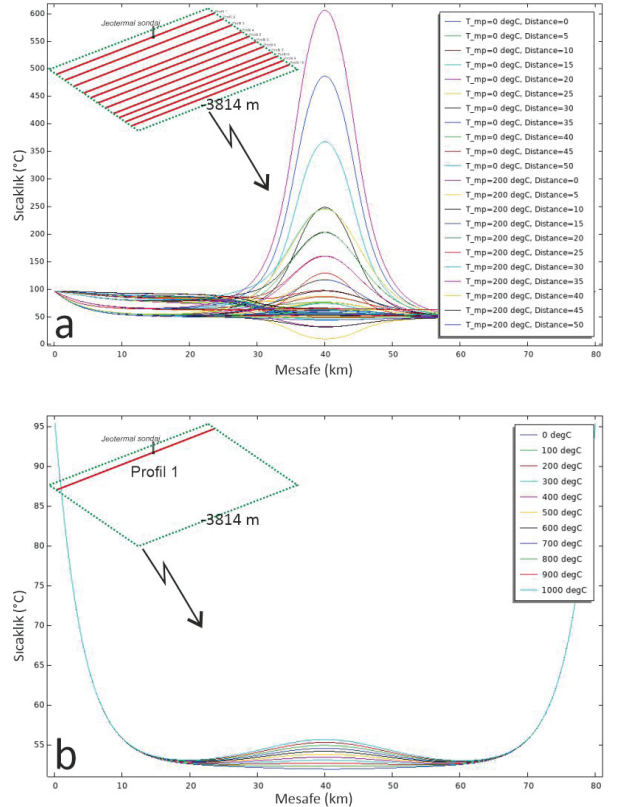
Çiftlik-Bozköy Altında Magma Odası

3814 metre derinlikte, aynı geometriye ancak farklı derinliklere sahip (7, 8, 9 ve 10 km) magma odalarına 0-1.000 °C arasında 100 °C aralıklarla sıcaklıklar uygulanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Sondaj faaliyetinin yürütülmüş olduğu bölgenin 7 km altında ve magma odası 0-1.000 °C arası 10 farklı sıcaklık uygulanması durumunda, en yüksek sıcaklık 600 °C'ye ulaşmaktadır (Şekil 8a). Magma odası 8 km olması durumunda 3.814 metre derinlikte en fazla 360 °C sıcaklık değeri gözlenirken (Şekil 8b); 9 km derinlikte en yüksek 210 °C sıcaklık dağılımı gözlenmektedir (Şekil 8c). Daha da derine 10 km'ye yerleşen magma odasının ortalama 70 °C iken en yüksek yaklaşık 150 °C olarak hesaplanmıştır (Şekil 8d).

TARTIŞMA ve SONUÇ

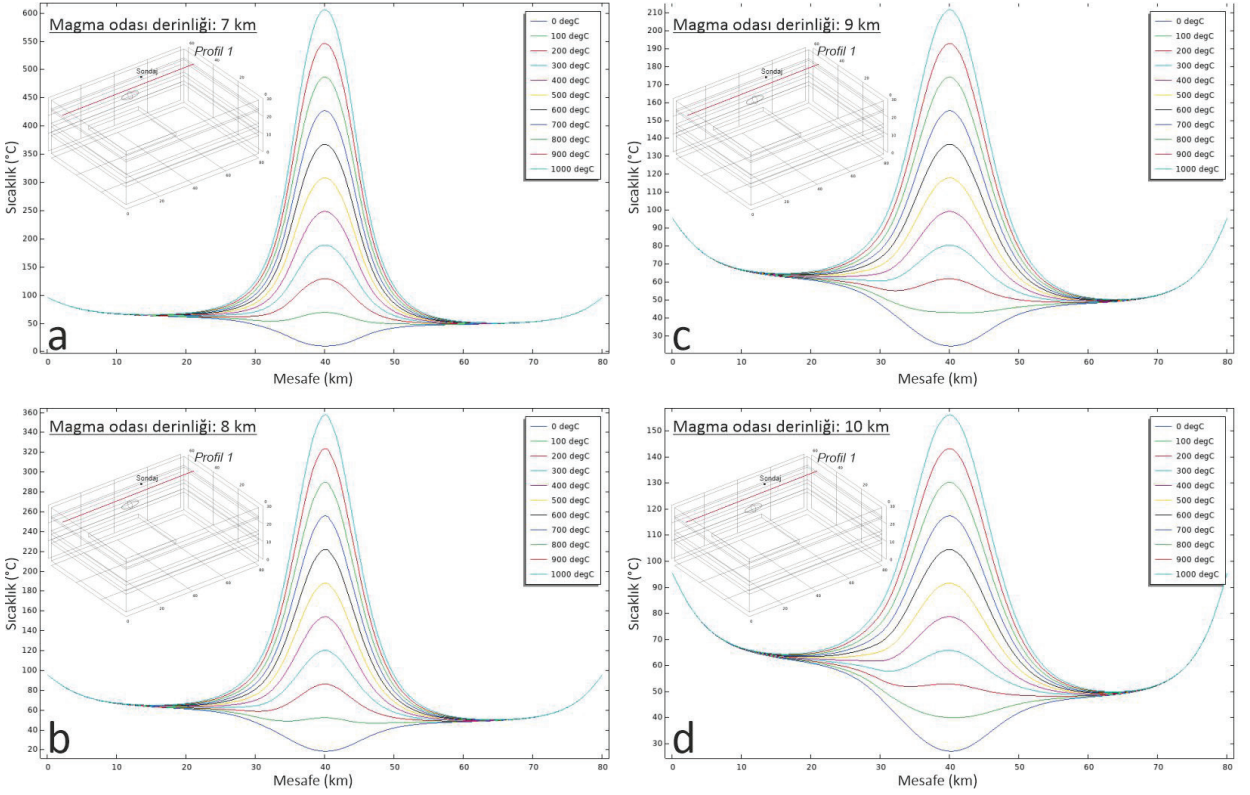
Bu çalışmada iki soruya cevap aranmaktadır: Hasan Dağı volkanı altında MT yöntemiyle saptanan magma odasının ısı transferi ve termal gradyana olan etkisi nasıldır? Diğer soru ise 3S Kale enerji

şirketi tarafından gerçekleştirilen Türkiye'nin en derin sondajlarından elde edilen sıcaklık değerleri için gerekli olan ısıtıcı kaynağın sıcaklık değeri ve kabuk içindeki derinliği nedir? Bu sorulara cevap bulabilmek için sayısal modelleme çalışmaları yapılmış olup ısıtıcı kaynağın termal özelliklerine ilişkin önemli bilgiler elde edilmiştir.



Şekil 7. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip (0 °C – 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, 3.814 metre derinliği temsil eden yanıl kesit üzerinde, **a)** farklı profiller boyunca **b)** Jeotermal sondaj bölgesini kesen Profil 1'den elde edilen sıcaklık dağılımları.

Figure 7. Temperature distributions obtained from different profiles **a)** along a lateral section representing a depth of 3,814 meters and **b)** from Profile 1 intersecting the geothermal drilling area, caused by the magma chamber with temperatures ranging from 0 °C to 1,000 °C beneath Hasan Dağı volcano.

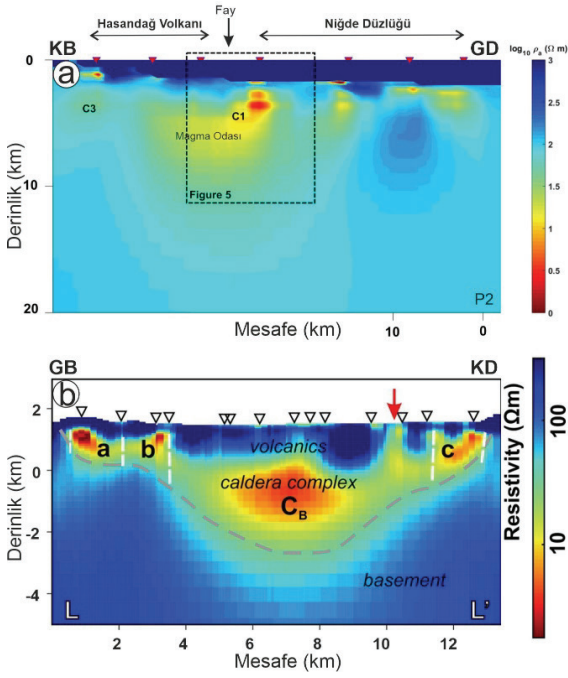


Şekil 8. Çiftlik-Bozköy volkanik alanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip (0 °C – 1.000 °C) magma odasının (a) 7 km, (b) 8 km, (c) 9 km ve (d) 10 km derinlikte jeotermal sondaj bölgesini kesen Profil 1’den elde edilen sıcaklık dağılımları.

Figure 8. Temperature distributions obtained from Profile 1 intersecting the geothermal drilling area at depths of (a) 7 km, (b) 8 km, (c) 9 km, and (d) 10 km beneath the Çiftlik-Bozköy volcanic field.

Manyetotellürik veriler Hasandağı Volkanı'nın kabuk boyunca merkez konisinin tam altı yerine; 3-4 km güneydoğusuna doğru magma odasına işaret eden düşük rezistivite değerleri göstermektedir (Şekil 9; Tank ve Karas, 2020). Çiftlik-Bozköy alanı altında ise söz konusu depresyon alanının merkezi olarak tam altında 2-4 km derinlikte oldukça düşük rezistivite değerleri elde edilmiş olup araştırmacılar bunları kaldera yapısı içerisinde değerlendirmiş olup magma odasına ilişkin veri sunmamışlardır (Hacıoğlu vd., 2023). Ancak bu bölge altında magma odası varsayımıyla gerçekleştirilen numerik modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçların (Dornadula vd., basımda), son dönemde gerçekleştirilen

manyetotellürik sonuçları ile örtüşmediği görülmektedir (Hacıoğlu vd., 2023). Ayrıca bu bölge altında 5 km altında magma odası bulunması durumunda, bu bölgeyi yaklaşık 4 km derinliğe ulaşan derin sondaj faaliyetleri sonucunda, visko elastik özellik sergileyen litolojik özelliklere sahip, magma odasının neredeyse çatısına ulaşılması beklenirdi. Bu açıdan, güncel manyetotellürik çalışmalarının bir magma odasının bulunmadığını belirtmeleri sebebiyle, Şahinkalesi (Çiftlik-Bozköy) volkanik bölgesi altında 5 km derinlikte bir magma odasının varsayımıyla gerçekleştirilen numerik modelleme sonuçlarının (Dornadula vd., basımda) yeniden değerlendirmeye ihtiyaç vardır.



Şekil 9. a) Hasandağı (Tank ve Karaş, 2020) ve **b)** Çiftlik-Bozköy (Hacıoğlu vd., 2023) volkanik bölgelerinde belirli profil doğrultularından üç boyutlu ters çözüm modelleme ile elde edilen resistivite haritaları.

Figure 9. Resistivity maps obtained by three-dimensional inversion modelling of some profile directions in the volcanic regions of **a)** Hasan Dağı (Tank and Karaş, 2020) and **b)** Çiftlik-Bozköy (Hacıoğlu et al., 2023).

Hasan Dağı volkanı altında, 1000 °C yüksek sıcaklık değerlerine sahip magma odası dahi Çiftlik-Bozköy bölgesindeki 3814 metre derinlikteki kabuğu, ancak 78 °C civarı ısıtmaktadır. Söz konusu sondajlardan elde edilen 295 °C (3.814 metre) ve 341 °C (3.957 metre) sıcaklık değerleri göz önüne alındığında Hasan Dağı volkanı altındaki bir ısıtıcı kaynağın Çiftlik-Bozköy bölgesindeki yüksek jeotermal gradyanın ısı kaynağı olarak işlev görmesi mümkün gözükmemektedir.

Hasan Dağı altındaki ısıtıcı kaynak işlevi gören magma odasının MT çalışmaları ile

önerilen 6-7 km derinliğe ve birkaç bin yıl önceki etkinlikleri dikkate alınarak 800-1.000 °C arası bir sıcaklığa sahip olması durumunda ana koninin yakın çevresinde potansiyel sıcak gradyana (3.814 metrede) ulaşması teorik olarak mümkündür (400-600 °C). Ancak düzlük alanda yapılması planlanacak bir sondaj faaliyeti düşünüldüğünde, modelleme çalışmalarından örneğin Hasan Dağı güneybatısında bulunan Taşpınar bölgesinde (Şekil 1) 3.814 metrede 120 °C; 3.000 metrede 90 °C; 2.000 metrede 74 °C; 1.000 metrede 41 °C gibi sıcaklık değerlerine ulaşılacağı söylenebilir.

Çiftlik-Bozköy bölgesinde yürütülen jeotermal sondaj ve sonraki süreçte devam edecek üretim planlanması için bu bölgedeki ısıtıcı kaynağın derinliği, geometrisi ve sahip olduğu sıcaklık değeri önem arz edecektir. Her ne kadar Bilim vd. (2017) yaptıkları çalışmada çapı yaklaşık 50 km olan bir gömülü kaldera yapısı ile bölgenin termomekanik özelliklerini rapor etmiş olsalar da Hacıoğlu vd. (2023) bölge altındaki gömülü kalderanın yaklaşık 13 km genişliğinde olduğunu önermişlerdir (Şekil 9). Söz konusu ticari girişimin 4 km'ye yaklaşan sondajlardan elde edilen sıcaklık verileri dikkate alındığında, bu sıcaklık değerlerine ulaşmak için en az 7 km derinlikte 600-700 °C (Şekil 8a) ve/veya 8 km derinlikte 900-1.000 °C'ye sahip ısı kaynağı işlevinde olan magma odasına (magma odası çatısı) ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak daha derin koşullarda (9, 10 km ve fazlası) kabuk boyunca yerleşen magma odası söz konusu sıcaklıkları üretmeyeceği için magma odası derinliğinin en fazla 8 km olması gerektiğini ifade etmek mümkündür. Manyetotellürik çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile nümerik modelleme çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde, magma odasının en az 8 km derinlere ulaşan ve en sıcak bölgesini temsil eden merkez kısmının; kabuğun sıg kesimlerine doğru, yaklaşık 7 km derinlikte, nispeten soğumaya maruz kalmış ergiyik-katı faz geçiş zon ile temsil edilen magma odası çatı kısmının olduğu; 2-3 km derinliklerde ise katı

halde 200-300 °C sıcaklık değerlerinde ısıtılmış kayaçların var olduğu söylenebilir. 7-8 km derinlikte üst çatısı bulunan bir magma odası ve sondaj faaliyetlerinin yaklaşık 4 km'ye kadar yalnızca elastik özellik gösteren katı kayaçlarda yürütüldüğü göz önünde bulundurulduğunda söz konusu magma odasının, sil şeklinde, düşük kalınlık sergileyen (2-3 km), ancak kabuk boyunca yanal yayılan bir geometride olduğu iddia edilebilir.

Saha çalışmaları ve yayınlanan jeofizik ölçümlere dayanarak Bozkurt-Çiftlik bölgesinin oldukça büyük bir püskürüm merkezi olduğu söylenebilir. Karaoğlu vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre, çapı 8-8,5 km olan Nemrut Kalderası'nın en az 64 km³ hacminde piroklastik malzeme püskürttüğü dikkate alındığında, çapı 13 km'ye kadar ulaşan bir kaldera oluşumu için birkaç yüz km³'lük piroklastik malzemenin boşalmasına tekabül edebilir. Bu hacimdeki malzemenin Kuvaterner dönemi boyunca püskürümü, aynı zamanda magma odasının özellikle üst kesiminde önemli bir boşluk oluşumuna neden olabileceği düşünülebilir. Bu çalışmadaki magma odasının çatısına ilişkin 7-8 km olan derinlik hesabının, oldukça yüksek hacimde köpürmüş magma püskürümü de göz önüne alındığında, kaldera-oluşturan püskürümler sırasında magma odası çatı derinliğinin birkaç km daha yüzeye yakın (3-4 km) olabileceği iddia edilebilir.

EXTENDED SUMMARY

The Cappadocia Volcanic Region (CVR) has recently garnered attention for its geothermal energy potential. The presence of buried caldera structures and plutons embedded in the active crust signifies the primary heat sources in the region. Numerous geophysical studies have been conducted concerning the potential eruption centres of ignimbrites that extend across extensive plains within the CVR region, some of which

reach several hundred meters in height (e.g., Pasquare et al., 1988; Le Pennec et al., 1994; Toprak, 1998; Froger et al., 1998; Koşaroğlu et al., 2016; Bilim et al., 2017; Aydemir et al., 2019). Thanks to some research on buried caldera structures in the region, these collapse structures have been identified, especially in the central and western parts of the CVR. Pasquare et al. (1988) proposed the Melendiz stratovolcano and the Çiftlik region as potential eruption centres for the ignimbrites predominantly exposed in the western part of the KVP. Bilim et al. (2017) posited that the region encompassing Aksaray-Nevşehir-Niğde-Yeşilhisar, with a diameter exceeding 50 km, exhibits characteristics of a depression or caldera (Figure 1). Additionally, researchers have documented the geothermal gradient of the region to be in the range of 50-68 °C/km, with heat flux values ranging from 2.3 to 2.7 Wm⁻¹ K⁻¹, and radiogenic heat flux production values spanning from 0.45 to 0.70 W m⁻³. Şener et al. (2023) conducted geothermometer temperature calculations in the Cappadocia region, yielding various temperature values for areas proximate to the study location. Chalcedony geothermometer estimations reported temperatures ranging from 54 to 126 °C in Nevşehir, 48 to 159 °C in Aksaray, and 73 to 159 °C in Niğde. Quartz geothermometer calculations indicated temperature values spanning from 85 to 173 °C in Nevşehir, 79 to 180 °C in Aksaray, and 102 to 180 °C in Niğde.

In a statement on the website of the commercial enterprise in question (URL1, 2023), it was reported that (i) Turkey's hottest well was discovered by drilling to a depth of 3,814 meters in 2016 under the Bozköy licence. This well, boasting a bottom temperature of 295 °C was confirmed to have the capacity for steam production (Figure 1). The second well, drilled in the same field in 2021 to a depth of 3,957 meters, recorded a bottom temperature of 341 °C, establishing both wells as the ones with the highest bottom temperatures in Turkey.

In this study, I investigate whether the heat source lies in Hasandağı volcano or if there is an undisclosed heat source beneath this region. To accomplish this, I conducted heat transfer analyses in solid lithologies employing the licenced Comsol Multiphysics 6.1 programme (Tabatabaian, 2014).

During the late Cenozoic, the convergence of the Eurasian, African, and Arabian plates culminated in collisions that significantly influenced the regional geological landscape. The Central Anatolian plateau responded to these orogenic events with extensive tectonic deformations, rapid crustal uplift, and a surge in high-volume volcanic activity. Over the past 10 million years, the Central Anatolian Plateau has undergone an elevation of approximately 1 km, resulting in its present topography (Cosentino et al., 2011; Yildirim et al., 2011; Schildgen et al., 2012).

Keçikalesi volcano, situated to the southwest of Hasandağı, represents one of the earliest volcanic activities in the western part of the KVP (Figure 1 and 2). Besang et al. (1977) dated these volcanic products to have erupted between 13.7 ± 0.3 Ma and 12.4 ± 0.6 Ma.

The Çiftlik-Bozköy region displays an elliptical morphology, with 6-6.5 km in diameter. A substantial pyroclastic unit underlies the alluvial material derived from volcanic sources, reaching several tens of meters in thickness at its apex. Intermediate volcanic rocks are predominantly found within this ignimbritic cover, extending from the vicinity of Bozköy and Çardak to the Yeşilköy ridges (Figure 1 and 2).

Magnetotelluric (MT) measurements conducted by Tank and Kardeş (2020) covered 27 locations in the southern areas of Hasandağı, Keçiboyduran, and Melendiz mountains. Their findings suggest the presence of a potential magma chamber with a depth of 4-6 km and a width of roughly the same magnitude, in two-dimensional profiles extending approximately 45 km southwest

of Hasandağı towards the Niğde plain. Hacıoğlu et al. (2023) have identified a buried caldera with a depth of 3 km and a diameter of up to 12 kilometers, following MT studies conducted in 60 locations, including the Çiftlik region north of Melendiz Mountain. However, researchers reported that have yet to find definitive evidence of a magma chamber in this area (Hacıoğlu et al., 2023).

In this study, I explore the analytical connection between the data regarding the magma chamber and heat source and the temperature values derived from deep well measurements conducted by the aforementioned commercial enterprise.

In the three-dimensional “heat transfer” simulation, temperature distributions for magma chambers with varying temperatures (0, 200, 400, 600, 800, 1,000 °C) beneath Hasandağı volcano are observed throughout the heterogeneous crust (Figure 3). In scenarios where the magma chamber temperature is inactive (0 °C), only temperature distributions related to the thermal gradient are observed in the environment. It is essential to note that the temperature at a depth of 30 km remains at 765 °C (Figure 3a). When the magma chamber temperature was set to 200 °C, a modest increase in temperature was observed in the magma chamber and its immediate surroundings (Figure 3b). With a temperature application of 400 °C, the magma chamber’s temperature rises to 134 °C within a radius of approximately 1 km (Figure 3c). In the 600 °C scenario, temperature values around 96 °C are notable in the borehole and its vicinity (Figure 3d). Applying an 800 °C temperature to the magma chamber results in temperature values reaching up to 200 °C within a lateral radius of 3-4 km from the chamber (Figure 3e). In the 1,000 °C scenario, temperature values around 128 °C were observed in and around the drilling area (Figure 3f).

Temperature distributions were analysed on vertical sections spaced at 10-km intervals (Figure 5). In all sections, temperature distributions range from lower temperatures (minimum 10 °C, indicated in blue) to higher temperatures (maximum 715 °C, indicated in yellow). In all scenarios, the highest temperature values were concentrated around the magma chamber (Figure 5). For the 1,000 °C magma chamber scenario, temperature values classified as high (600-700 °C) extend no more than 1 km laterally from the chamber (Figure 5).

A horizontal section was created to assess the temperature distributions within the crust at a depth of 3,814 meter, which corresponds to one of the maximum drilling depths (Figure 6). The temperature distributions were examined for magma chambers with various temperatures at this depth (Figure 6). When a 0 °C magma chamber scenario is considered, only thermal gradient values at this depth are observed, resulting in a temperature of 59 °C in the drilling area (Figure 6a). For a 200 °C scenario, the magma chamber and its surroundings reach a temperature of 127 °C, while the drilling area records 90 °C (Figure 6b). Increasing the magma chamber temperature to 400 °C results in a temperature distribution of approximately 94 °C within the chamber and its surroundings, and 243 °C in the drilling area (Figure 6c). When the magma chamber temperature is set to 600 °C, the temperature rises to 395 °C within a 1-km radius of the chamber and drops to 73 °C around the drilling area (Figure 6d). In the case of an 800 °C magma chamber, the drilling area records a temperature of 82 °C (Figure 6e), and a 1,000 °C magma chamber scenario results in a temperature of 78 °C in the drilling area and its surroundings (Figure 6f).

To provide a comprehensive view of the temperature distribution, 10 parallel profiles, spaced 6 km apart, were examined on a horizontal section at a drilling depth of 3814 m (Figure 7a). Various temperature scenarios ranging

from 0-1,000 °C were simulated within the magma chamber. Across all profiles, the average temperature remains around 100 °C. However, directly above the magma chamber with a 1,000 °C application, the highest recorded temperature reached 600 °C (Figure 7a). For a more detailed analysis of temperature distribution within the drilling area, local temperature distributions were examined along Profile 1 (Figure 7b). The average temperature along this section is approximately 45 °C, with a maximum temperature of 57 °C calculated because of the 1,000 °C magma chamber scenario (Figure 7b).

A series of simulations were conducted by applying temperatures ranging from 0 to 1,000 °C at 100 °C intervals to magma chambers with identical geometry but varying depths (7, 8, 9, and 10 km) at a depth of 3814 m (Figure 8). When temperatures between 0-1,000 °C were applied to the magma chamber located 7 km below the drilling area, the highest temperature recorded was 600 °C (Figure 8a). In the case of an 8 km deep magma chamber, a maximum temperature of 360 °C was observed at a depth of 3,814 m (Figure 8b). The highest temperature, reaching 210 °C, was observed at a depth of 9 km (Figure 8c). For the magma chamber located 10 km below the surface, the average temperature was approximately 70 °C, with the highest temperature estimated to be approximately 150 °C (Figure 8d).

This study aimed to address two fundamental questions: first, the impact of the magma chamber detected using magnetotelluric (MT) data beneath Hasandağı volcano on heat transfer and thermal gradients; and second, the determination of the temperature and depth of the heat source required to explain the temperature values observed in Turkey's deepest boreholes, which were conducted by 3S Kale Energy Company. Through numerical modeling, this study has yielded valuable insights into the thermal properties of a heat source.

Magnetotelluric data have demonstrated the presence of Hasandağı volcano's magma chamber, not just beneath its central cone but extending along its crust, notably towards the southeast (Figure 9; Tank and Karas, 2020). In contrast, under the Çiftlik-Bozköy region, very low resistivity values were detected at depths of 2-4 km, precisely beneath the centre of the depression area, suggesting a caldera structure. However, it is important to highlight that data regarding the magma chamber in this region were not presented in the findings by Hacıoğlu et al. (2023). However, it is evident that the outcomes derived from numerical modeling studies, assuming the presence of a magma chamber beneath this region (Dornadula et al., in press), do not align with recent magnetotelluric results (Hacıoğlu et al., 2023). Furthermore, considering deep drilling activities reaching a depth of approximately 4 km in this region, if there were a magma chamber 5 km below, it would be anticipated to approach the roof of the magma chamber, which is characterized by lithological features displaying viscoelasticity. Consequently, it is necessary to reassess the numerical modeling results (Dornadula et al., in press), which were conducted assuming a magma chamber at a depth of 5 km beneath the Şahinkalesi (Çiftlik-Bozköy) volcanic region, given the current magnetotelluric studies indicating the absence of a magma chamber.

Even under the conditions of an active magma chamber at its highest temperature, i.e., 1000 °C beneath Hasandağı volcano, the crust at a depth of 3,814 m in the Çiftlik-Bozköy region registers an increase of approximately 78 °C. Considering the temperature measurements, which recorded 295 °C at 3814 m and 341 °C at 3,957 m from the boreholes in question, it is improbable for the heat source beneath Hasandağı volcano to account for the high geothermal gradient observed in the Çiftlik-Bozköy region.

Assuming that the magma chamber is situated at a depth of 6-7 km, as suggested by

MT studies, and maintains temperatures between 800 and 1,000 °C, it is theoretically feasible that it may induce a high geothermal gradient (3,814 m) in close proximity to the main cone. Such an elevation might reach temperatures approximately 400-600 °C. However, in the context of planned drilling activities on the plain, modeling studies indicate that, for instance, the Taşpınar region located southwest of Hasandağı volcano would reach temperatures of approximately 120 °C at 3814 m (Figure 1), 90 °C at 3,000 m, 74 °C at 2,000 m, and around 41 °C at 1,000 m.

The depth, geometry, and temperature characteristics of the heat source in this region have vital implications for geothermal drilling in the Çiftlik-Bozköy region and future production planning. While Bilim et al. (2017) reported a buried caldera structure with an approximate diameter of 50 km, Hacıoğlu et al. (2023) proposed a caldera stretching up to 13 km wide (Figure 9). Considering the temperature data obtained from drillings close to 4 km of the commercial enterprise, it is essential to have a heat source with temperatures of 600-700 °C at a depth of 7 km (Figure 8a) and/or 900-1,000 °C at a depth of 8 km to explain these temperature values. This would require the presence of a magma chamber, specifically the magma chamber's roof. Yet, in deeper conditions (9, 10 km, or more), it is plausible to deduce that the magma chamber's depth must be no more than 8 km, as magma chambers located along the crust cannot generate the observed temperature values. When I take into account the results from magnetotelluric studies and numerical modeling, I can infer that the central section of the magma chamber, located at a depth of at least 8 km and representing the hottest region, coexists with the shallower parts of the crust at around 7 km depth. This upper section of the magma chamber, which corresponds to the phase transition zone between molten and solid states, has undergone relatively cooling and gives rise to temperatures between 200 and 300 °C within solid rock at depths of 2-3 km. Taking

into account the presence of a magma chamber with an upper roof situated at a depth of 7-8 km and the drilling activities conducted in solid rocks exhibiting only elastic properties up to a depth of approximately 4 km, it can be asserted that the magma chamber in question possesses a sill-shaped geometry. This geometry is characterised by low thickness (2-3 km) but extends laterally throughout the shallow crustal setting.

Based on field studies and published geophysical measurements, the Bozkurt-Çifilik region has been identified as a substantial eruption centre. Karaoğlu et al. (2005) proposed that the Nemrut Caldera, with a diameter of 8–8.5 km, expelled at least 64 km³ of pyroclastic material. The formation of a caldera with a diameter of up to 13 km implies the discharge of several hundred km³ of pyroclastic material. The eruption of such a volume during the Quaternary period could have led to the creation of a significant void, particularly in the upper part of the magma chamber. Considering the depth estimate of 7–8 km for the magma chamber roof in this study and the eruption of extensive volumes of frothy magma, it can be argued that the depth of the magma chamber roof during caldera-forming eruptions may be a few km closer to the surface (3–4 km).

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi tarafından desteklenen projelerle gerçekleştirilmiştir (Proje Numaraları: 201815A203, 202015D10, 201715A215, 201715031, FCD-2023-2795, FHD-2023-2784, FYL-2022-2482). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi BAP Birimine teşekkür ederim. Bu makale, editörlüğünü Oğuz GÖĞÜŞ'ün yaptığı "Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı" için hazırlanmış olup, kendisine teşekkürlerimi sunarım. Dergi Editörü Erdiç YİĞİTBAŞ, hakemlikleriyle makaleye değerli katkılar sunan Alper BABA ve Emin Uğur ULUGERGERLİ'ye içtenlikle teşekkür ederim.

ORCID

Özgür Karaoğlu  <https://orcid.org/0000-0003-2627-4686>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Atabey, E. (1989). *1/100.000 ölçekli açınısama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H19 (K33) Paftası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Aydar, E. (1992). *Etude Volcano-Structurale et Magmatologique du Strato-Volcan Hasan Dagi (Anatolie Central-Turquie)*, [Yayınlanmamış Doktora Tezi]. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Aydar, E. & Gourgaud, A. (1998). The geology of Mount Hasan stratovolcano, central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 129–152.
- Aydemir, A., Bilim, F., Kosaroglu, S. & Buyuksarac, A. (2019). Thermal structure of the Cappadocia region, Turkey: a review with geophysical methods. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 1, 243–254. <https://doi.org/10.1007/s42990-019-00011-7>
- Besang, C., Eckhardt, F. J., Harre, W., Kreuzer, H. & Muller, P. (1977). Radiometrische Altersbestimmungen an Neogenen Eruptivgesteinen der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, 25, 3–36.
- Bilim, F., Kosaroglu, S., Aydemir A. & Buyuksarac, A. (2017). Thermal investigation in the Cappadocia Region, Central Anatolia-Turkey, analyzing the Curie Point Depth, Geothermal Gradient and Heat Flow maps from the aeromagnetic data. *Pure and Applied Geophysics*, 147, 4445–4458.
- Caricchi, L., Annen, C., Blundy, J., Simpson, G. & Pinel, V. (2014). Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy. *Nature Geoscience*, 7(2), 126–130. <https://doi.org/10.1038/ngeo2041>
- Chestler, S.R. & Grosfils, E.B. (2013). Using numerical modeling to explore the origin of intrusion patterns on Fernandina volcano, Galapagos Islands, Ecuador. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4565–4569.

- Cosentino, D., Schildgen, T.F., Cipollari, P., Faranda, C., Gliozzi, E., Hudáčková, N., Lucifora, S. & Strecker, M.R. (2011). Late Miocene surface uplift of the southern margin of the Central Anatolian Plateau, Central Taurides, Turkey. *Bulletin of Geological Society of America*, 124(1–2), 133–145.
- de Silva, S. L. & Gregg, P. M. (2014). Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 282, 77–91.
- Deniel, C., Aydar, E. & Gourgaud, A. (1998). The Hasan Dağı stratovolcano (Central Anatolia, 780 Turkey): Evolution from calc-alkaline to alkaline magmatism in a collision Zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87, 275–302.
- Dornadula, C., Singh, M., & Baba, A (basımda/in press). Sahinkalesi Massif, a Resurgent Dome and Super-Hot Egs Province: Hasandag Stratovolcanic Province, Central Anatolia. Available at SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4388412>
- Eldursi, K., Branquet, Y., Guillou-Frottier, L. & Marcoux, E. (2009). Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions: Heat-transfer and fluid-circulation controlled mineralization patterns. *Earth Planetary Science Letters*, 288(1–2), 70–83.
- Ercan, T., Tokel, S., Can, B., Fişekçi, A., Fujitani, T., Notsu, K., Selvi, Y., Olmez, M., Matsuda, J.I., Ui, T., Yıldırım, T. & Akbaşlı, A. (1990). Hasan Dağı-Karacadağ Orta Anadolu dolaylarındaki Senozoyik yaşlı volkanizmanın kökeni ve evrimi. *Jeomorfoloji Dergisi*, 18, 39–54.
- Froger, J. L., Lenat, J. F., Chrowicz, J., Le Pennec, J. L., Bourdier, J. L., Kose, O., Zimitoğlu, O., Gündoğdu, N. M. & Gaugaud, A. (1998). Hidden calderas evidenced by multisource geophysical data; example of Cappadocian Calderas, Central Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185, 99–128.
- Gelman, S. E., Gutiérrez, F. J. & Bachmann, O. (2013). On the longevity of large upper crustal silicic magma reservoirs. *Geology*, 41(7), 759–762.
- Gerbault, M., Cappa, F. & Hassani, R. (2012). Elasto-plastic and hydromechanical models of failure around an infinitely long magma chamber. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3), Article Q03009. <https://doi.org/10.1029/2011GC003917>
- Gudmundsson, A. (2012). Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237, 19–41.
- Hacıoğlu, Ö., Başokur, A. T., Meqbel, N., Arslan, H. İ. & Efeçinar, T. (2023). Magnetotellurics unveils a hidden caldera complex beneath the Cappadocia Volcanic Province, Central Anatolia, Türkiye. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 442, Article 107877. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107877>
- Jaeger, J. C. (1959). Temperatures outside a cooling intrusive sheet. *American Journal of Science*, 257(1), 44–54.
- Jaupart, C., Mareschal, J.C., Guillou-Frottier, L. & Davaille, A. (1998). Heat flow and thickness of the lithosphere in the Canadian Shield. *Journal of Geophysical Research* 103(B7), 15269–15286.
- Karakas, O., Degruyter, W., Bachmann, O. & Dufek, J. (2017). Lifetime and size of shallow magma bodies controlled by crustal-scale magmatism. *Nature Geoscience*, 10(6), 446–450. <https://doi.org/10.1038/ngeo2959>
- Karaoğlu, Ö. (2021). A numerical approach to verify the reservoir temperature of the Afyon geothermal fields, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(4), 536–550. <https://doi.org/10.3906/yer-2101-21>
- Karaoğlu, Ö., Özdemir, Y., Tolluoğlu, A., Karabiyikoğlu, M., Köse, O. & Froger, J. L. (2005). Stratigraphy of the volcanic products around Nemrut Caldera: implications for reconstruction of the caldera formation. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14(2), 123–143.

- Karaoğlu, Ö., Browning, J., Bazargan, M., & Gudmundsson, A. (2016). Numerical modelling of triple-junction tectonics at Karlıova, Eastern Turkey, with implications for regional magma transport. *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 157-170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.037>
- Kosaroglu, S., Buyuksarac, A. & Aydemir, A. (2016). Modeling of shallow structures in the Cappadocia region using gravity and aeromagnetic anomalies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.005>
- Kuzucuoğlu, C., Pastre, J.F., Black, S., Ercan, T., Fontugne, M., Guillou, Hatté, C., Karabıyıköğlü, M., Orth, P. & Türkecan, A. (1998). Identification and dating of tephra layers from Quaternary sedimentary sequences of Inner Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 153–172.
- Le Corvec, N., Menand, T. & Lindsay, J. (2013). Interaction of ascending magma with pre-existing crustal fractures in monogenetic basaltic volcanism: an experimental approach. *Journal of Geophysical Research*, 118(3), 968–984. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50142>
- Le Pennec, J. L., Bourdier, J. L., Froger, J. L., Temel, A., Camus, G. & Gourgaud, A. (1994). Neogene ignimbrites of the Nevşehir plateau (Central Turkey): stratigraphy distribution and source constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 59–67.
- Nabelek, P. I., Hofmeister, A. M. & Whittington, A. G. (2012). The influence of temperature dependent thermal diffusivity on the conductive cooling rates of plutons and temperature- time paths in contact aureoles. *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.009>
- Okubo, Y., Graf, R. J., Hansen, R. O., Ogawa, K. & Tsu, H. (1985). Cruie Point Depths of the Island of Kyushu and Surrounding Areas, Japan. *Geophysics*, 50, 481–494.
- Pasquare, G., Poli, S., Vezzoli, L. & Zanchi, A. (1988). Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 146, 217–230.
- Rodriguez, C., Geyer, A., Castro, A. & Villasenor, A. (2015). Natural equivalents of thermal gradient experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.021>
- Rozimant, K., Buyuksarac, A. & Bektas, O. (2009). Interpretation of magnetic anomalies and estimation of depth of magnetic crust in Slovakia. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 471–484.
- Schildgen, T. F., Cosentino, D., Bookhagen, B., Niedermann, S., Yildirim, C., Echtler, H., Wittmann, H. & Strecker, M. R. (2012). Multi-phased uplift of the southern margin of the Central Anatolian plateau, Turkey: a record of tectonic and upper mantle processes, *Earth and Planetary Science Letters* 317–318, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.003>
- Şener M. F., Baba, A., Uzelli, T., Akkuş, İ. & Mertoğlu, O. (2022). *Türkiye Jeotermal Kaynaklar Strateji Raporu*. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1-149 (in Turkish).
- Şener, M. F., Öztürk, M. Z. & Baba, A. (2023). A review of the geothermal system evolution and distribution in the Central Anatolian Crystalline Complex (Türkiye). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(6), 703-720. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1870>
- Tabatabaian, M. (2014). *COMSOL for Engineers*. Mercury Learning and Information, Boston, USA.
- Tank, S. B. & Karaş, M. (2020). Unraveling the electrical conductivity structure to decipher the hydrothermal system beneath the Mt. Hasan composite volcano and its vicinity, SW Cappadocia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, Article 107048. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107048>
- Toprak, V. (1998). Vent distribution and its relation to regional tectonics, Cappadocian volcanics, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 55–67.

Yildirim, C., Schildgen, T.F., Echtler, H., Melnick, D. & Strecker, M.R. (2011). Late Neogene and active orogenic uplift in the Central Pontides associated with the North Anatolian Fault: implications for the northern margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. *Tectonics*, 30(5). <https://doi.org/10.1029/2010TC002756>

URL 1: <https://3skaleenerji.com.tr/biz-kimiz/>: Eylül 2023.