



Monte Carlo benzetimi ile Simav sahasının jeotermal kaynak potansiyelinin tahmini

Geothermal resource estimation of the Simav field using Monte Carlo simulation

Hüseyin KARAKUŞ^{1*}, Cafer ÖZKUL¹, Zeynal Abiddin ERGÜLER¹, Yaşar KİBİCİ¹, Gürsel YANIK¹

¹Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.

huseyin.karakus@dpu.edu.tr, cafer.ozkul@dpu.edu.tr, zeynal.erguler@dpu.edu.tr, yasar.kibici@dpu.edu.tr, gursel.yanik@dpu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.01.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 02.05.2016

doi: 10.5505/pajes.2016.90907

* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Batı Anadolu'daki yüksek sıcaklıklı jeotermal sahalardan biri olan Simav sahasının ısı kaynak potansiyeli Monte Carlo benzetimi yardımı ile hacimsel yöntem kullanılarak tahmin edilmiştir. Sahada, ana jeotermal rezervuarı, etkin tektonizma nedeniyle ikincil geçirimsizlik özelliği kazanan metamorfik kayalar oluşturmaktadır. İnceleme alanında en yüksek kuyu dibi sıcaklığı ise 162.4 °C ile Menderes Masifine ait bu metamorfik kayaları kesen 725 m derinlikteki EJ-1 kuyusunda ölçülmüştür. Hacimsel yöntemin uygulanması aşamasında jeotermal rezervuarı ile ilgili alan, kalınlık, sıcaklık vb. fiziksel parametrelerin değerleri olasılık yoğunluk dağılımları çerçevesinde Monte Carlo benzetimi ile belirlenmiştir. Bu amaç için her bir fiziksel parametre için belirlenen olasılık dağılımına uyacak şekilde rastgele değerler türeten bir Excel VB uygulaması oluşturulmuştur. Gözeneklilik için lognormal dağılım, rezervuar kalınlığı, alanı ve sıcaklığı için üçgen dağılım kullanılarak Simav jeotermal sahasının en olası ısı rezervuarı 1.3×10^{15} kJ olarak belirlenmiş olup, bu değere ulaşılabilme olasılığı %67 olarak hesaplanmıştır. Yine aynı benzetim sonucunda Simav jeotermal sahasının elektrik üretim potansiyeli %50 olasılık ile (ortalama) 26 MW iken en olası değer ise 19 MW olarak hesaplanmıştır. 19 MW'lık değer üretilebilme olasılığı ise %71 olarak belirlenmiştir. Kurulu gücü 19 MW olacak bir santrali besleyecek akışkan debisi ise 1204 ton/saat (334 L/s) olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Simav, Jeotermal, Monte Carlo benzetimi

Abstract

Accessible resource base of the Simav Geothermal field, one of the high temperature field in western Anatolia, was estimated using the volumetric method together with Monte Carlo simulation. The main geothermal reservoir in the field hosted in metamorphic rocks having secondary permeability enhanced due to intense tectonic activity. The highest bottom-hole temperature at the field was recorded as 162.4 °C in the EJ-1 having depth of 725 m penetrating metamorphic rocks of Menderes Massif. At the application stage of the volumetric method physical parameters, such as area thickness, temperature, etc., related to geothermal reservoir were determined by Monte Carlo simulation in the context of probability density distributions. For this purpose, an Excel VB application that generates random values corresponding to the probability distribution for each parameter was created. Using a lognormal distribution for porosity and triangular distributions for reservoir thickness, area and temperature, the most likely accessible resource base of the Simav Geothermal Field was calculated as 1.3×10^{15} kJ. The probability to achieve this value was calculated as 67%. The same simulation results the mean and the most likely electricity generation potential of Simav geothermal field as 26 MW and 19 MW, respectively. The probability of electrical generation capacity of 19 MW was calculated as 71%. Mass flow rate that should be supplied to the power plant of 19 MW was calculated as 1204 tones/hour (334 L/s).

Keywords: Simav, Geothermal, Monte Carlo simulation

1 Giriş

Ucuz, yenilenebilir ve farklı alanlarda kullanım olanakları sunması nedeniyle jeotermal enerjiye olan talep sürekli artış göstermektedir. Özellikle son yıllarda artan bu enerji talebi, yeni jeotermal sahalardan keşfi ile birlikte mevcut sahalardan geliştirilmesine yönelik çalışmaların da hız kazanmasına neden olmuştur. Jeotermal enerjinin doğrudan veya dolaylı kullanım alanlarına yönelik uygulamalarda karşılaşılan en önemli belirsizlik mevcut teknolojik olanaklara göre ulaşılabilir ısı rezervinin büyüklüğüdür.

Jeotermal sahalardan ısı potansiyeli genelde bu amaç için standart bir yöntem halini almış olan hacimsel yöntem ile belirlenmektedir. USGS tarafından geliştirilen hacimsel ısı değerlendirme yöntemi temel olarak, mevcut teknolojik yöntemler ile ulaşılabilir derinlikteki (~3 km) gözenekli ve geçirimsiz jeotermal rezervuarda depolanmış toplam ısı miktarından elde edilebilir ısı enerjinin tahmin edilmesine dayalıdır [1]-[4].

Özellikle Batı Anadolu'daki graben sistemlerinde olduğu gibi tektonizma ile koşut olarak gelişmiş jeotermal rezervuarlar

oldukça heterojen bir yapı sergilerler. Gerek gözeneklilik ve geçirimsizlik gibi jeohidrolojik parametreler, gerekse de rezervuar sıcaklığı ve kalınlığı gibi fiziksel parametreler konumsal olarak oldukça değişkenlik gösterir. Bu nedenle kesin değeri bilinmeyen bu tür parametrelerin belirli bir olasılık dağılımı çerçevesinde rastgele türetilmesine dayalı olan Monte Carlo benzetimi jeotermal rezervuarların ısı enerjilerinin tahmininde hacimsel yöntem ile birlikte geleneksel olarak kullanılmamıştır.

Bu çalışma, Batı Anadolu'daki graben sistemlerinde gelişmiş en önemli jeotermal sahalardan biri olan Simav sahasının erişilebilir ısı ve güç üretim potansiyelini konu almaktadır. Sahanın güç üretim potansiyeli mevcut kuyu boşalimleri dikkate alınarak daha önceden Arslan ve diğ. [5] ve Köse [6] tarafından irdelenmiştir. Arslan ve diğ. [5] Simav sahasının güç potansiyelini ortaya koymak için hazırladıkları iki farklı senaryoda EJ-1 ve EJ-3 kuyularından elde edilen akışkan ile beslenen binary ve kalina çevrim dizaynı santralleri ile 24360 ve 34734 MWh/yıl enerji üretilebileceği sonucuna varmışlardır. Köse [6] ise aynı kuyularından üretilen akışkan ile kurulu gücü 2.9 MWe olan binary çevrimli jeotermal elektrik

santrali ile 17020 MWh/yıl elektrik üretilebileceği sonucuna varmıştır.

Literatürde yer alan bu bilgilerden farklı olarak, bu çalışmada öncelikle günümüzün teknolojik olanakları gözetilerek Simav jeotermal sahasında sondaj kuyuları ile ulaşılabilecek derinlikteki (~3000 m) rezervuarda depolanmış toplam ısı tahmin edilmiştir.

Büyük Menderes Grabeni içinde yer alan Kızıldere ve Germencik sahaları Simav sahası ile benzer özellikler taşır. Rezervuar kayalarını Simav Sahası ile benzer şekilde Menderes Metamorfiteri'nin oluşturduğu bu sahalarda derin sondaj kuyuları açılmış, Kızıldere sahasında 1984 yılından, Germencik sahasından ise 2009 yılından itibaren elektrik üretimi yapılmaktadır. Kızıldere sahasındaki kuyu derinlikleri 2872 m, kuyu dibi sıcaklık ise 245 °C'ye kadar ulaşmaktadır [7]. Germencik sahasında ise kuyu derinlikleri 2400 m'ye, kuyu dibi sıcaklığı 239 °C'ye kadar ulaşmaktadır [8].

Simav Sahası'nda günümüze kadar açılmış üretim kuyularının derinlikleri (65-725 m) Batı Anadolu'daki yüksek sıcaklıklı sahalardakine göre oldukça sığdır. Bu nedenle, derin sondaj kuyuları ile sahada ulaşılabilecek rezervuar sıcaklığı jeotermometrik verilere, rezervuarın alansal yayılımı ise sahada yapılmış rezistivite çalışmaları yardımı ile belirlenmiştir. Simav sahasının rezervuar sıcaklık koşulları ve fiziksel boyutuna ilişkin bu veriler eşliğinde sahada ulaşılabilecek ısı rezervi ve buna bağlı olarak elektrik üretim potansiyeli Monte-Carlo benzetimi kullanılarak hacimsel yöntem ile tahmin edilmiştir. Mevcut bu verilere ve koşullara göre sahasının ısı ve güç üretim potansiyeli sırası ile 1.3×10^{14} kJ ve 19 MW olarak hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan yöntem ve verilerin elde edilme şekli aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

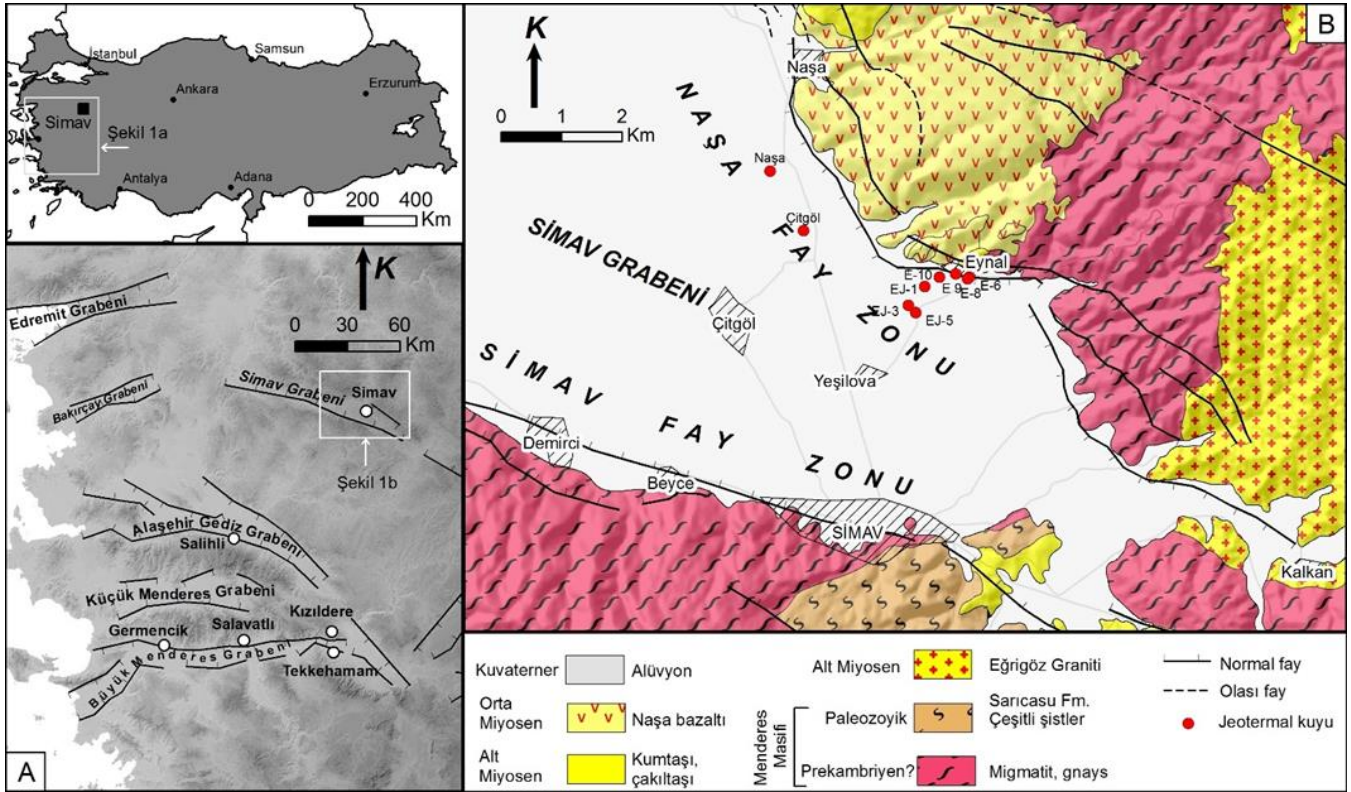
2 Jeolojik özellikler

Simav jeotermal sahası Akşehir-Simav Fay Sistemi denetiminde gelişmiş Simav Grabeni içinde yer almaktadır (Şekil 1a). Batı Anadolu'daki etkin genişlemeli tektonik rejimin tipik yapılarından biri olan Simav Grabeni'nin güney kenarı kuzeye eğimli Simav fayı tarafından sınırlandırılmıştır. Grabenin kuzey kenarı ise Simav jeotermal sahasının da gelişimini sağlayan Naşa Fay Zonu tarafından sınırlandırılmıştır (Şekil 1b). Genişliği 5 km'yi bulan Naşa Fay zonu, KB-GD yönünde birbirine paralel uzanan ve Simav Fayı'na antitetik bir dizi normal faydan oluşmaktadır.

Yöredeki istifin temelinde Prekambriyen yaşlı Menderes Masifinin çekirdek serisine ait gnays ve migmatitler yer almaktadır (Şekil 1b). Menderes Masifi'nin çekirdeğini oluşturan bölgedeki bu kayalar, Prekambriyen'de çökelmiş, pelitik çökellerin Hersiniyen öncesi bir metamorfizma ile migmatitleşme ürünleridir [9]. Temelde yer alan gnaysların yaşı benzer bir şekilde Paleozoyik öncesi olarak kabul edilmiştir [10]. İstifin üstüne doğru masifin örtü serisini oluşturan Paleozoyik yaşlı şistlerden oluşan Sarıcasu Formasyonu gelir [9].

Grabenin doğu kısmı Eğrigöz Plütonu'na ait granitik kayalar ile sınırlandırılmıştır. Radyometrik analizlere göre plütona ait bu granitik kayaların yaşı Alt Miyosen olarak belirlenmiştir [11]-[13].

Çalışma alanı içindeki en genç volkanik ürünler Simav jeotermal sahasını sınırlayan fay zonunda gözlenmekte olan yoğun gaz boşluklu Orta Miyosen yaşlı [14] Naşa bazaltlarıdır.



Şekil 1: Simav jeotermal sahasının konumu. a) Batı Anadolu Graben sistemlerinde gelişmiş önemli jeotermal sahalardan oluşan bir harita. b) Simav jeotermal sahası ve yakın dolayının jeoloji haritası [9],[10].

Graben tabanında ise en altta çakıltası düzeyi ile kumtaşı seviyesi, üste doğru kıltaşı ve marndan oluşan Taşbaşı Formasyonu yer alır. Yaklaşık 200 m kalınlık veren birime Alt-Orta Miyosen yaşı verilmiştir [9]. Kuvaterner yaşlı alüvyal çökeltileri, graben kenarlarını sınırlayan faylara paralel dizilim gösteren birikinti konisi ve yamaç molozu şeklinde bir görünüm sunarlar. Simav ovasında yaklaşık 100 km²'lik bir alanı kaplayan alüvyon birimlerin kalınlığı DSİ tarafından yapılmış olan sondajlara göre genelde 40-175 m arasında değişim gösterir.

Simav sahasının kavramsal hidrotermal modeli Şekil 2'de sunulmuştur. Sahada jeotermal sistemin oluşumun sağlayan kırıkların çoğunluğu Naşa Fay Zonu olarak adlandırılan ve Simav fayına antitetik olan eğim atımlı faylardır. Bu faylar Simav fayına paralel uzanımlı olup genellikle KB-GD, BKB-DGD ve D-B doğrultuludur. Simav ve Naşa faylarına bağlı gerçekleşen tektonik etkinlikler yöredeki graben morfolojinin ortaya çıkmasında önemli rol oynamıştır. Alanda ana rezervuar kayalar Naşa Fay zonunda kırıklı-çatlaklı bir yapı kazanmış olan Menderes Metamorfittleri'nin migmatit, gnays ve şist seviyeleridir. Daha üst seviyede bulunan Naşa Bazaltı ise ikincil rezervuarları oluşturmaktadır. Simav sahasında taban sıcaklıkları 162.4 °C'ye ulaşan üretim kuyuları bulunmaktadır (Tablo 1). Çoğunlukla MTA tarafından açılan bu kuyularının derinlikleri 65 m ile 725 m arasında değişmekte olup, bu kuyulardan üretilen akışkan başta konut ısıtımıcılığı olmak üzere seracılık ve balneoloji gibi amaçlar için kullanılmaktadır.

Tablo 1: Simav jeotermal alanında açılmış kuyulara ait bilgiler [15],[16].

| Kuyu No | Tarih | Derinlik (m) | Sıcaklık (°C)* | Debi (L/s) |
|---------|-------|--------------|----------------|------------|
| E-1 | 1985 | 65.80 | 142.5 | 14 |
| E-2 | 1985 | 149.50 | 158 | 55 |
| E-3 | 1985 | 150 | 149 | 50 |
| E-6 | 1994 | 169.6 | 157 | 60 |
| E-8 | 1997 | 205 | 161 | 80 |
| EJ-1 | 1990 | 725.20 | 162.4 | 72 |
| EJ-2 | 1990 | 958 | 157.47 | 1 |
| EJ-3 | 2006 | 424 | 151 | 50 |

3 Yöntem

Hacimsel yöntemle göre, su egemen bir rezervuarda depolanmış ısı enerjisi veya ulaşılabilir ısı rezervi aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir.

$$Q_T = Q_R + Q_W \quad (1)$$

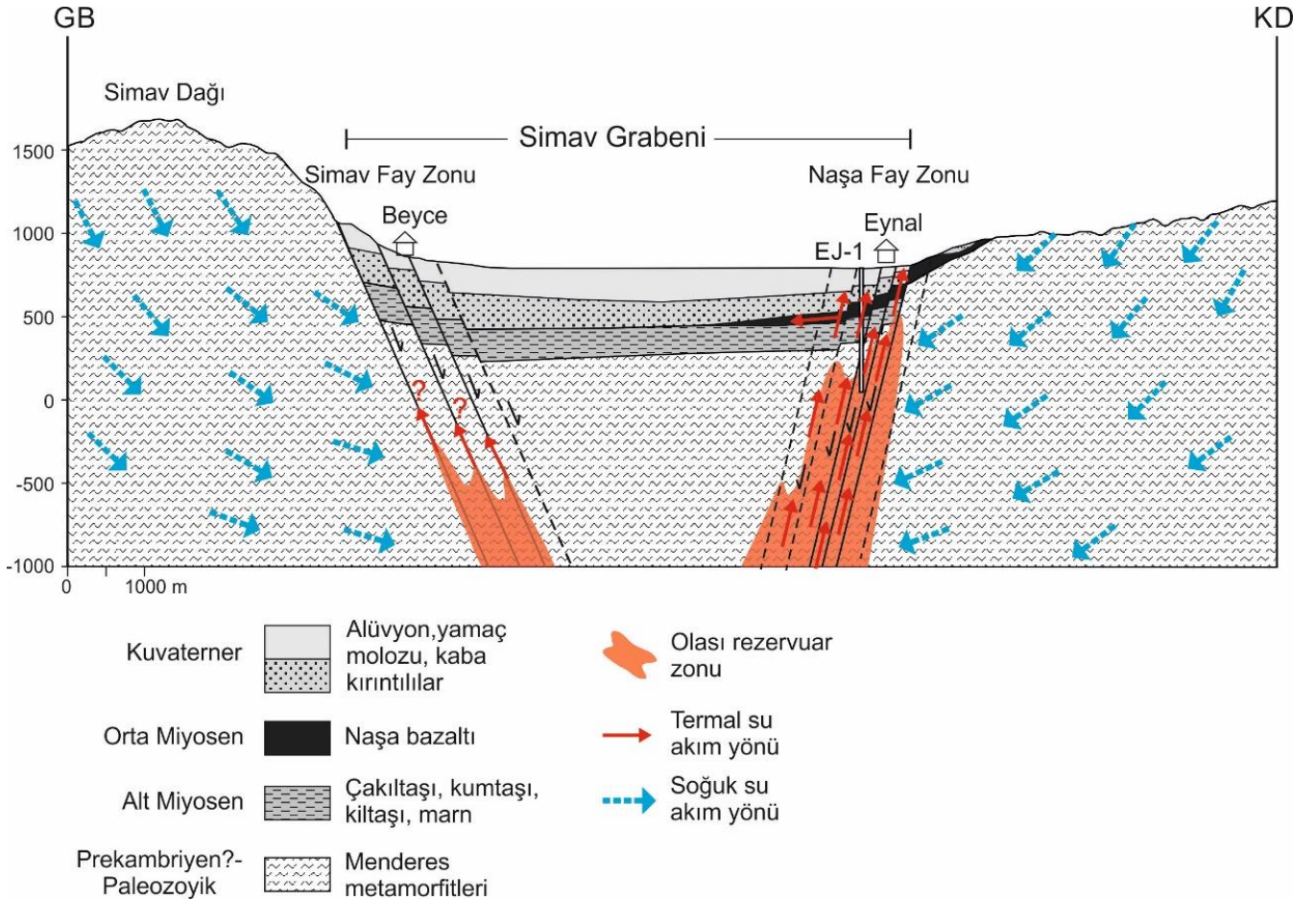
$$Q_R = A \cdot h \cdot [\rho_R \cdot C_R \cdot (1 - \theta) \cdot (T - T_0)] \quad (2)$$

ve

$$Q_W = A \cdot h \cdot [\rho_W \cdot C_W \cdot \theta \cdot (T - T_0)] \quad (3)$$

olmak üzere;

$$Q_T = A \cdot h \cdot (T - T_0) \cdot [\rho_R \cdot C_R \cdot (1 - \theta) + \rho_W \cdot C_W \cdot \theta] \quad (4)$$



Şekil 2: Simav jeotermal sahasının kavramsal hidrotermal modeli.

Burada:

- Q_T : Rezervuardaki toplam ısı miktarı kJ,
 Q_R : Rezervuarın katı kısmındaki ısı miktarı kJ,
 Q_W : Rezervuarın boşlukları arasındaki akışkanın depolanmış ısı miktarı kJ,
 A : Rezervuar alanı m²,
 h : Rezervuar kalınlığı, m
 C_R : Rezervuar kayacın katı kısmının özgül ısı kapasitesi, kJ/(kg °C),
 C_W : Rezervuar kayacın boşluklarında bulunan suyun özgül ısı kapasitesi, kJ/(kg °C),
 ρ_R : Kayaç katı kısmının yoğunluğu kg/m³,
 ρ_W : Sıcak suyun yoğunluğu kg/m³,
 θ : Rezervuar kayacın ortalama gözenekliliği,
 T : Rezervuar ortalama sıcaklığı °C,
 T_0 : Çevre sıcaklığı (yıllık ortalama sıcaklık) °C'dir.

Pratik olarak rezervuarda depolanmış toplam ısı enerjisinin sadece belirli bir oranı faydalı enerji olarak doğrudan (konut, sera ısıtma vb.) veya dolaylı (elektrik üretimi) yöntemler ile kullanılabilir. Kurtarım veya süpürülme faktörü olarak adlandırılan bu oran (R_f), rezervuar gözenekliliğine bağlı olarak değişkenlik göstermekte, çoğu zaman 0 ile 0.5 arasında değişmektedir [4]. Daha güncel verilere göre jeotermal enerji üretimi gerçekleştirilen kırıklı-çatlaklı rezervuarlarda R_f 0.1'e yakın olmakla birlikte 0.05 ile 0.2 arasında değişmektedir [17]-[19]. Lawless [20] ise kurtarım faktörünü rezervuar gözenekliliğinin 2.5 katı olarak önermektedir. Dolayısıyla kurtarım faktörü ve kuyubasında elde edilecek enerji (Q_{WH}) arasında:

$$Q_{WH} = R_f \cdot Q_T \quad (5)$$

$$m_{WH} = Q_{WH} / (h_{WH} - h_0) \quad (6)$$

eşitlikleri bulunmaktadır. Yukarıda verilen 6 nolu eşitlikteki m_{WH} terimi kuyu başında üretilecek kütle olup, h_{WH} üretilen akışkanın entalpisi, h_0 ise çevre sıcaklığındaki akışkanın entalpisi.

Yukarıdaki tüm eşitlikler rezervuar içinde depolanmış toplam enerji ile birlikte kuyu başında elde edilecek enerji miktarını ifade ederler. Bu ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde edebilmek için kurulacak jeotermal enerji santrali (JES)'nin kurulu gücü, elektrik enerjisine dönüşüm verimi dikkate alınarak aşağıdaki formülasyon ile belirlenmektedir.

$$P_W = \frac{Q_T \cdot R_f \cdot C_e}{1000 \cdot P_f \cdot t} \quad (7)$$

Burada:

- P_W : Kurulu güç MWe,
 C_e : Elektrik enerjisine dönüşüm verimi oran,
 P_f : Yük faktörü oran,
 t : Santralin ekonomik ömrü, saniye'dir.

Dönüşüm verimi rezervuardan elde edilebilecek termal enerjinin, elektrik enerjisine dönüşüm verimini ifade etmektedir. Dönüşüm verimi santral tipi (tek veya çift buharlaştırıcı, binary), yoğunlaşmayan gaz içeriği, akışkan kimyası, parazitik yük, akışkan sıcaklığı ve ortam koşulları gibi oldukça fazla parametreye bağlıdır. DiPippo [21] kaynak sıcaklığı 100 °C-140 °C arasında değişen binary çevrim santralleri için dönüşüm veriminin kaynak sıcaklığı ve çevre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlar.

$$C_e = 0.58 \cdot (T - T_0) / (T + T_0) \quad (8)$$

Zarrouk ve Moon [22] ise dünyada mevcut JES'lerin dönüşüm verimleri ortalamasının %12 civarında olduğunu, binary çevrim santrallerinin dönüşüm verimleri için kaynak sıcaklığına bağlı olan aşağıdaki fonksiyonu önermektedir.

$$C_e = 6.9681 \cdot \ln(T) - 29.713 \quad (9)$$

Yukarıdaki iki eşitlik arasındaki rezervuar sıcaklık koşulları bağlı değişen dönüşüm verimleri arasında 2 ile 3 kate varan farklar bulunmaktadır. Lawless [20] yine rezervuar sıcaklığına bağlı olarak dönüşüm verimi için aşağıdaki görgül eşitliği önermektedir.

$$C_e = (0.0484 \cdot T^{\circ C} - 0.5096) / 100 \quad (10)$$

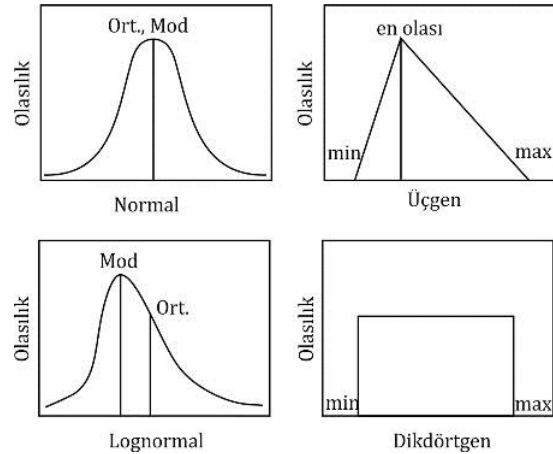
Santral yük faktörü (P_f), santralin operasyonda olacağı sürenin toplam süre içindeki oranıdır. Bu değer genelde santralin bakım-onarım vb. nedenlerden dolayı devre dışında kalacağı sürenin bir yıllık süreye oranı olarak kabul edilmekte ve genelde %90 ile %97 arasında değişmektedir.

Santralin ekonomik ömrü yatırım maliyeti ve yatırımın geri dönüş oranına bağlı olmakla birlikte genelde 25-30 yıl olarak kabul edilmektedir.

3.1 Monte Carlo benzetimi

Jeotermal sahaların ulaşılabilir ısı rezervi ile bu rezervden elde edilebilir güç değerlerinin öngörülmesini sağlayan 4 ve 7 No.lu eşitlikler içindeki parametrelerin her biri birtakım belirsizlikler içerir. Örneğin heterojen yapısı nedeniyle tekdüze bir gözeneklilik değerinin jeotermal rezervuarın tüm hacmini temsil etmesi mümkün değildir. Benzer şekilde rezervuarın içindeki sıcaklık dağılımı, alanı ve kalınlığı değişken olup, bu sayısal değerlerin konumsal dağılımını sınırlı sayıda sondaj verisinden elde etmek çoğu zaman mümkün değildir.

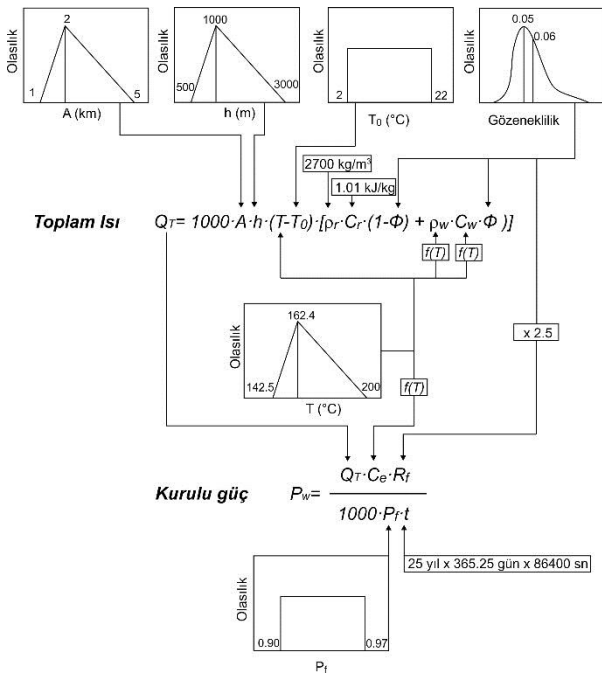
Girdileri belirsizlik içeren fonksiyonların türeteceği değerin, belirli bir olasılık dağılımı çerçevesinde rastgele üretilen sayılardan faydalanılarak elde edilmesini sağlayan Monte Carlo benzetimi, jeotermal sistemlerin ekserji analizlerinde en temel istatistiksel benzetim modeli olarak uygulanır. Değeri kesin bilinmeyen parametrelerin rastgele türetilmesi için kullanılan en yaygın istatistiksel dağılım fonksiyonları tekdüze (üniform) dağılım, üçgen dağılımı, normal dağılım ve lognormal dağılım fonksiyonlarıdır (Şekil 3).



Şekil 3: Monte Carlo benzetiminde kullanılan yaygın dağılım fonksiyonları.

Normal ve üçgenel dağılımlar rezervuar sıcaklığı, kalınlığı ve alanı gibi gerçek verinin sınırlı olduğu koşullarda uygundur. Ortam sıcaklığı (genelde yıllık ortalama sıcaklık) gibi bir değerin belirli bir sınır içinde eşit frekans ile dağıldığı durumlarda ise dikdörtgenel (üniform) dağılım tercih edilmektedir. Rezervuar kayacın gözeneklilik değeri ise daha çok lognormal dağılıma uyum sağlamaktadır [23]-[25].

Eşitlik 4 ve 7'deki her bir terimin bağlı olduğu parametrelere rastgele değerlerin olasılık dağılımları çerçevesinde atanması iterasyon (tekerrür) ile mümkündür. Bu amaç için Microsoft Excel Visual Basic uygulaması yardımı ile Monte Carlo benzetiminde kullanılacak her bir parametre için ayrı ayrı tanımlanan olasılık dağılımlarına uyan 100000'er adet rastgele değer türetilmiştir. Uygulanan Monte Carlo benzetiminin evreleri şematik olarak Şekil 4'te, benzetim için kullanılan parametrelere ait değerler ve bu değerlerin rastgele türetildiği olasılık dağılımları ise Tablo 2'de sunulmaktadır.



Şekil 4: Simav jeotermal sahasının hacimsel yöntemle dayalı elektrik üretim potansiyelinin tahmini için uygulanan Monte Carlo benzetiminin aşamaları.

Tablo 2: Monte Carlo benzetiminin girdi parametreleri (koyu değerler benzetim sonucu elde edilen değerlerdir).

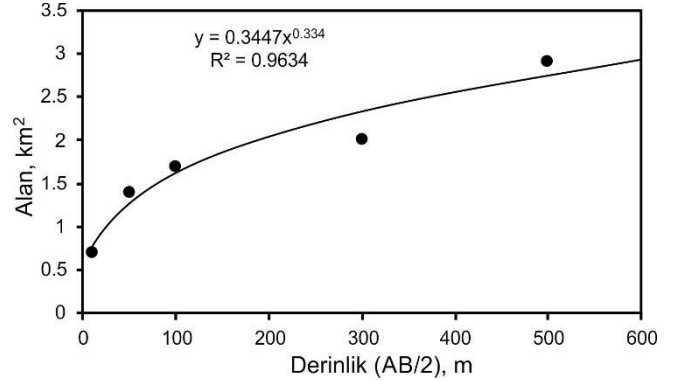
| | Simge | Birim | En olası | Min. | Maks. | Ort. | Std. Sap. | Olasılık dağılımı |
|---------------------|----------------|-------------------|-------------|-------|-------|--------------|-----------|-------------------|
| Rezervuar Alanı | A | km ² | 2 | 1 | 5 | | | Üçgen |
| Rezervuar kalınlığı | h | m | 1000 | 500 | 3000 | | | Üçgen |
| Gözeneklilik | θ | | | | | 0.06 | 0.01 | lognormal |
| Kurtarım faktörü | R _f | | 0.15 | | | | | f(θ) |
| Kayaç yoğunluğu | ρ _R | kg/m ³ | | | | 2700 | | sabit |
| Kayaç özgül ısısı | C _R | kJ/kg °C | | | | 1.01 | | sabit |
| Sıcaklık | T | °C | 162.4 | 142.5 | 200 | | | Üçgen |
| Çevre sıcaklığı | T ₀ | °C | | 2 | 22 | 12 | | Dikdörtgen |
| Akışkan yoğunluğu | ρ _W | kg/m ³ | | | | 890 | | f(T) |
| Akışkan özgül ısısı | C _W | kJ/kg °C | | | | 4.390 | | f(T) |
| Dönüşüm verimi | C _e | | | | | 0.080 | | f(T) |
| Santral ömrü | t | yıl | | | | 25 | | sabit |
| Yük faktörü | P _f | | | 0.9 | 0.97 | | | Dikdörtgen |

Benzetim sürecinde en önemli belirsizlik, Simav Jeotermal sahasındaki rezervuara ait gözeneklilik değerinin kuyu tamamlama ve test raporları ile literatürde yer almamasıdır. Bu nedenle rezervuar kayaç ve egemen tektonik rejim benzerliği dikkate alınarak Kızıldere sahası için önerilen ortalama %6'lık [26],[27] gözeneklilik değerinin Simav jeotermal rezervuarını da temsil ettiği varsayılmıştır.

Rezervuarın alansal büyüklüğü Önder ve diğ. [28] tarafından sahada yapılmış olan jeofizik resistivite çalışmasında jeotermal akışkanın varlığını yansıtan 10 ohm.m eşresistivite eğrisinin graben düzlüğünde kapladığı alanlarından itibaren tahmin edilmiştir. Şekil 5 jeofizik resistivite çalışmasında AB/2 derinliğine karşı 10 ohm.m eşresistivite eğrilerinin graben düzlüğünde kapladığı alanları göstermektedir. Elde edilen regresyon eşitliği ile 3 km derinlikteki rezervuar alanının 5 km² olarak hesaplanmıştır.

Aynı regresyon eşitliği yardımı ile rezervuar minimum alanı 1 km² olarak elde edilmiştir. Rezervuarın en olası alanı ise 2 km² olarak öngörülmüştür.

Mevcut teknoloji ve Batı Anadolu'da çoğunlukla 1000-3000 m arasında değişen sondaj kuyu derinlikleri temel alınarak, rezervuar kalınlığı en fazla 3000 m olarak kabul edilmiştir. Simav sahasındaki verimli kuyuların derinlikleri 150 m ile 725 m arasında değişmekte olup bu nedenle minimum rezervuar kalınlığı 500 m olarak alınmış, en olası kalınlık ise 1000 m kabul edilmiştir.



Şekil 5: Jeotermal anomali olarak kabul edilen 10 ohm.m'lik eşresistivite eğrilerinin graben düzlüğünde kapladığı alanlar (resistivite eğrileri Önder ve diğ. [28]'den alınmıştır)

En yüksek rezervuar sıcaklığı Gemici ve Tarcan [29] ve Karakuş [30] tarafından silis jeotermometre eşitlikleri ile tahmin edilen 200 °C'lik değer alınmıştır. En düşük sıcaklık ise Tablo 1'de sunulan ve alandaki en düşük kuyu taban sıcaklığı olan 142.5 °C'lik taban sıcaklığı kabul edilmiştir. En olası sıcaklık değeri için ise alandaki kuyu taban sıcaklığı en yüksek olan EJ-1 kuyusunda 162.4 °C'lik taban sıcaklığı alınmıştır.

Ortam sıcaklığı ise Simav Meteoroloji İstasyonunda kaydedilen uzun yıllar aylık ortalama değerler temel alınarak yıllık ortalama sıcaklık 12 °C olacak şekilde en düşük 2 °C ve en yüksek 22 °C arasındaki değerler dikdörtgen dağılım ile rastgele türetilmiştir.

Kurtarım faktörü (R_f), bir fonksiyon olarak gözenekliliğin 2.5 katı, dönüşüm verimi (C_e) ise 10 No.lu eşitlik ile rezervuar sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

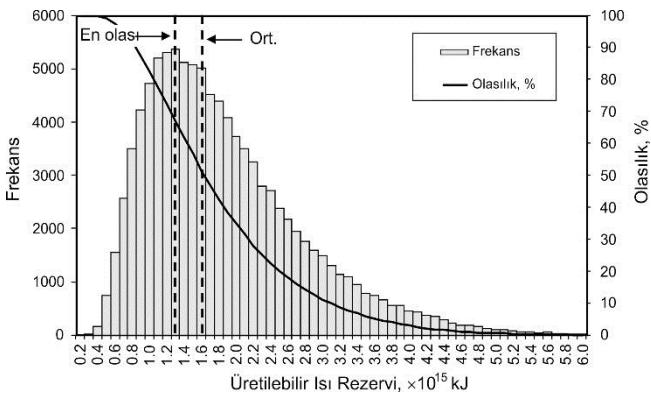
Kayaç yoğunluğu ve özgül ısı parametrelerine temelde yer alan Menderes Metamorfiteri'nin gnays ve migmatit litolojileri dikkate alınarak granitik gnayslar için önerilen sırası ile 2700 kg/m³ ve 1.01 kJ/kg °C [31] sabit değerler atanmıştır.

Akışkanın yoğunluğu ve özgül ısı ise sıcaklığın bir fonksiyonu olarak IAPWS-1995 formülasyonları [32] ile hesaplanmıştır.

Yük faktörü (P_f) 0.90 ile 0.97 arasında değişecek şekilde dikdörtgen dağılım ile belirlenmiştir. Santralin ekonomik ömrü (t) 25 yıl olarak kabul edilmiştir.

3.2 Benzetim sonuçları

Microsoft Excel VB uygulaması ile Eşitlik 4 ve 7'de yer alan terimler için Tablo 2 ve Şekil 3'te sunulan olasılık dağılımları çerçevesinde 100000'ner adet rastgele değişken türetilmiştir. Elde edilen bu rastgele değişkenlere dayalı olarak Monte Carlo benzetimi sonucunda Simav jeotermal sahası için hesaplanan ulaşılabilir ısı potansiyeli ile sahadan elde edilebilir güç potansiyel değerleri gruplandırılarak histogram grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 6 ve Şekil 7). Grup değerleri küçükten büyüğe doğru dizilerek sıklık değerleri belirlenmiştir. Ardından her gruba ait sıklık değeri veri sayısına (100000 adet) bölünerek olasılık değeri hesaplanmıştır. Düzenlenen gruplara ait birikimli olasılık dağılım eğrileri oluşturularak Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulan histogram grafiklerine eklenmiştir.

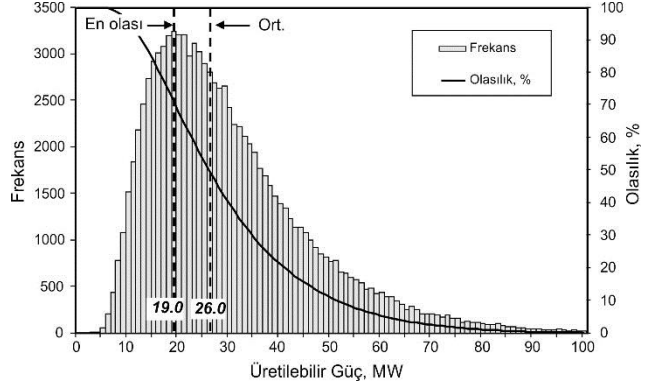


Şekil 6: Simav jeotermal sahasının Monte Carlo benzetimi ile edilen ulaşılabilir ısı rezervinin histogramı ve olasılık dağılımı.

Hacimsel yöntemle göre Simav jeotermal sahasının ulaşılabilir ısı rezervi (4 No.lu eşitlik) ortalama 1.6×10^{15} kJ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Bununla birlikte en olası (en yüksek

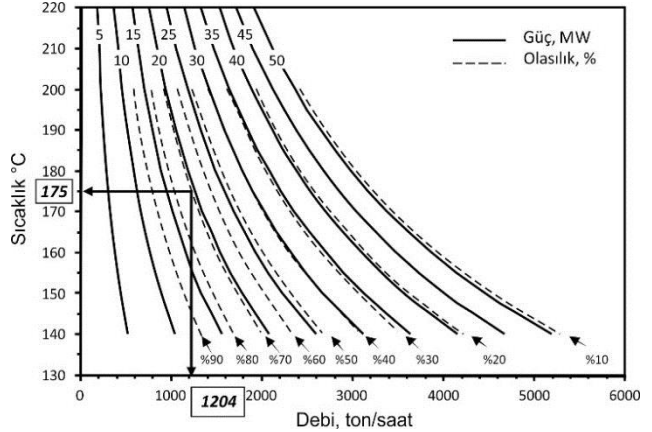
sıklık değeri) ısı rezervi 1.3×10^{15} kJ olarak belirlenmiş olup, bu değere ulaşılabilir olasılığı ise %67 olarak hesaplanmıştır.

Benzetim sonucunda Simav jeotermal sahasının elektrik üretim potansiyeli (7 No.lu eşitlik) %50 olasılık ile (ortalama) 26 MW iken en olası değer ise 19 MW olarak hesaplanmıştır (Şekil 7). 19 MW'lık değer üretilebilir olasılığı ise %71 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7: Simav jeotermal sahasının Monte Carlo benzetimi ile edilen tahmini santral kapasitesinin histogramı ve olasılık dağılımı.

Monte Carlo benzetimi sonucunda rezervuar ortalama sıcaklığı 175 °C olarak belirlenmiştir. Yük faktörü ortalama 0.95 olarak alındığında Eşitlik 6 yardımı ile %71 olasılıkla kurulu gücü 19 MW olan bir santrali besleyecek akışkan debisi 1204 ton/saat (334 L/s) olarak hesaplanmıştır (Şekil 8). Simav sahasında mevcut sıcak su kuyularının toplam debileri (Tablo 1) 382 L/s civarında olup, 19 MW'lık bir jeotermal santrali besleyecek yeterliliktedir.



Şekil 8: Simav jeotermal sahasında üretilebilir güç değerinin olasılık dağılımı ile bu gücün elde edilmesi için gereken sıcaklık ve debi ilişkisi.

4 Tartışma ve öneriler

Mevcut veriler ışığında Simav jeotermal sahasının ısı ve güç üretim potansiyeli sırası ile 1.3×10^{14} kJ ve 19 MW olarak belirlenmiştir. Sahada açılmış üretim kuyuları Batı Anadolu'da benzer Kızıldere, Germencik ve Salihli sahalarına görece oldukça sığ derinliktedir. Simav sahasında en yüksek kuyu dibi sıcaklığı 162.4 °C olmakla birlikte, jeotermometrik yöntemler ile yapılan hesaplamalara göre rezervuar sıcaklığının 200 °C'ye kadar ulaşması mümkün görülmektedir. Nitekim Simav

sahasının yaklaşık 30 km GB'nda Akşehir-Simav Fay Zonu içinde bulunan Üçbaş sahasında 2010 yılında açılan 2500 m derinlikteki sondaj kuyusu ile 181 °C'lık kuyu dibi sıcaklığına rastlanılmıştır. Benzer şekilde Alaşehir-Gediz Grabeni içinde yer alan Alaşehir sahasında 2011 yılında açılan 2750 m derinliğe sahip bir jeotermal kuyuda 287 °C sıcaklığa ulaşılmıştır [33]. Bu nedenle Simav sahasında derin kuyuların açılması durumunda bu sıcaklık koşullarına ulaşılması olanaklı görülmektedir.

Hacimsel yöntem ile yapılan ısı potansiyel hesabında Simav jeotermal rezervuarının boyutu rezistivite ölçümlerine göre kestirilmiştir. Sahadaki rezervuarın boyutunun daha iyi anlaşılmasını sağlamak için daha geniş alanları kapsayan MT veya CSAMT gibi ölçümlerin de bu alanda gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Sahada konut ısıtmacılığı, sera ısıtmacılığı ve balneolojik uygulamalar olması nedeniyle termal akışkandan optimum fayda elde edilmesine yönelik entegre kullanımın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektrik üretimi için kullanılacak akışkan santral çıkışından ardından ısı merkezine ve/veya sera ısıtmacılığında kullanıldıktan sonra reenjeksiyon kuyuları ile rezervuara tekrar basılması rezervuarın beslenimi ve çevre açısından da önem taşımaktadır.

5 Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 112Y140 No.lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar sağladığı katkıdan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

6 Kaynaklar

- [1] Nathenson M. "Physical Factors Determining the Fraction of Stored Energy Recoverable from Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas". U.S. Geological Survey, Reston, USA, Open-File Report 75, 525, 1975.
- [2] White DE, Williams DL. "Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975". US. Geological Survey, Reston, USA, Circular 726, 1975.
- [3] Muffler LPJ, Cataldi R. "Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources". *Geothermics*, 7, 53-89, 1978.
- [4] Muffler LPJ. "Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978". U.S. Geological Survey, Reston, USA, Circular 790, 1979.
- [5] Arslan O, Köse R, Alakuş B, Özgür MA. "Simav jeotermal sahasının güç üretim potansiyelinin irdelenmesi". *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12, 57-66, 2006.
- [6] Köse R. "Geothermal energy potential for power generation in Turkey: A case study in Simav, Kutahya". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 497-511, 2007.
- [7] Tut Haklıdır F, Sengun R, Haizlip JR. "The geochemistry of the deep reservoir wells in Kizildere (Denizli City) geothermal field (Turkey)". *World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- [8] Dagistan H, Kara I, Peker B, Celmen O, Karadağlar M. "Geothermal explorations and investigations by MTA in Turkey". *World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- [9] Akdeniz N, Konak N. "Simav-Emet-Dursunbey-Demirci yörelerinin jeolojisi". MTA Derleme Raporu, Ankara, Türkiye, 6547, 1979.
- [10] Konak N. "Simav dolayının jeolojisi ve metamorfik kayaçlarının evrimi". *İstanbul Yerbilimleri*, 3(1-2), 313-337, 1982.
- [11] Bingöl E, Delaloye M, Ataman G. "Granitic intrusions in western anatolia, a contribution to the geodynamic study of this area". *Eclogae Geologicae Helveticae*, 75(2), 437-446, 1982.
- [12] Işık V, Tekeli O, Seyitoglu G. "The ⁴⁰Ar/³⁹Ar Age of extensional ductile deformation and granitoid intrusions in the northern Menderes core complex: Implications for the initiation of extensional tectonics in Western Turkey". *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(4), 555-566, 2004.
- [13] Ring U, Collins AS. "U-Pb SIMS dating of syn-kinematic granites: Timing of core-complex formation in the northern Anatolide belt of Western Turkey". *Journal of the Geological Society (London)*, 162, 289-298, 2005.
- [14] Ercan T, Satır M, Sevin D, Türkekcan A. "Batı Anadolu'daki tersiyer ve kuvaterner yaşlı volkanik kayaçlarda yeni yapılan radyometrik yaş ölçümlerinin yorumu". *MTA Dergisi*, 119, 103-112, 1996.
- [15] MTA. "Türkiye Jeotermal Kaynaklar Envanteri". MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 849, 2005.
- [16] Mollahüseyinoğlu Ö, Onat A, Onar İF, Okuyan C. "Gönen ve Simav jeotermal ısıtma sistemlerinin karşılaştırılması". *VII Ulusal Tesilat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, TESKON*, İzmir, Türkiye, 23-26 Kasım 2005.
- [17] Lovekin J. "Geothermal inventory". *Bulletin Geothermal Resources Council*, 33(6), 242-244, 2004.
- [18] Williams CF. "Development of revised techniques for assessing geothermal resources". *29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, USA, 26-28 January 2004.
- [19] Williams CF. "Updated methods for estimating recovery factors for geothermal resources". *32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, USA, 22-24 January 2007.
- [20] Lawless J. "Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting". The Australian Geothermal Reporting Code Committee (AGRCC), Unley, Australia, 82, 2010.
- [21] DiPippo R. "Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants". *Geothermics*, 36(3), 276-285, 2007.
- [22] Zarrouk SJ, Moon H. "Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review". *Geothermics*, 51, 142-153, 2014.
- [23] Cronquist C. "Estimation and classification of reserves of crude oil, natural gas, and condensate". Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, 416, 2001.
- [24] Arps JJ, Roberts TG. "Economics of drilling for cretaceous oil on east flank of denverjulesberg basin". *AAPG Bulletin*, 42, 2549-2566, 1958.
- [25] Kaufman GM. 1963. *Statistical Decision and Related Techniques in Oil Exploration*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1963.
- [26] Serpen U, Satman A. "Reassessment of the Kizildere geothermal reservoir". *World Geothermal Congress 2000*, Kyushu- Tohoku, Japan, 28 May-10 June 2000.
- [27] Yeltekin K, Parlaktuna M, Akın S. "Modeling of Kizildere Geothermal Reservoir, Turkey". *27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, USA, 28-30 January 2002.

- [28] Önder İ, Özen N, Hökelekli E. "Rejyonel Jeoelektrik Haritalar Projesi Kütahya-Emet-Hisarcık-Simav Sahaları Rezistivite Etüdü". MTA Raporu, Ankara, Türkiye, 7130, 1981.
- [29] Gemici Ü, Tarcan G. "Hydrogeochemistry of the Simav geothermal field, Western Anatolia, Turkey". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(3-4), 215-233, 2002.
- [30] Karakuş H. "Helium and carbon isotope composition of gas discharges in the simav geothermal field, Turkey: Implications for the heat source". *Geothermics*, 57, 213-223, 2015.
- [31] Robertson EC. "Thermal properties of rocks". USGS Open File Report 88-441, Reston, USA, 106, 1988.
- [32] Wagner W, Pruß A. "The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use". *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31(2), 387-535, 2002.
- [33] Baba A, Sözbilir H. "Source of arsenic based on geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in Western Turkey". *Chemical Geology*, 334, 364-377, 2012.