



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

JEOTERMAL KAYNAKLARIN ELEKTRİK ÜRETİM (GÜÇ) POTANSİYELİNİN HACİMSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİNDE YENİ BİR UYGULAMA METODU

MELEK ALTIN
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

MUSTAFA ONUR
TULSA ÜNİVERSİTESİ

JEOTERMAL KAYNAKLARIN ELEKTRİK ÜRETİM (GÜÇ) POTANSİYELİNİN HACİMSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİNDE YENİ BİR UYGULAMA METODU

A New Application Method in Determining the Electricity Production (Power) Potential of Geothermal Resources by Volumetric Methods

Melek ALTIN
Mustafa ONUR

ÖZET

Jeotermal bir kaynağın keşfini takiben yapılması gereken en önemli iş, bu kaynağa ait yerinde depolanmış ısı kapasitesi, kuyu başında üretilebilir ısı ve elektrik üretim potansiyellerinin gerçekçi tahminlerini yapmaktır. Yatırım kararı vermede belirleyici olan bu parametreleri %100 kesinlikle tahmin etmek mümkün olmadığı için bu parametrelerin tahmininde, belirlenimsel (“deterministik”) yöntemler yerine, istatistiksel ve olasılıklı yöntemleri kullanmak tercih edilen bir yaklaşımdır. Sıkça Monte Karlo Simülasyon yöntemi (MKS) ve ona basit bir alternatif olan analitik belirsizlik yayılma (ABY) yöntemi, bu önemli karar verme parametrelerindeki belirsizliği sayısallaştıran P10 (kanıtlanmış), P50 (olası) ve P90 (olanaklı) üç önemli istatistiksel ölçütün hesaplanmasında kullanılmaktadır.

ABY yöntemi, bahsedilen karar verme parametrelerinin tahmininde MKS'ine, analitik tabanlı basit bir alternatif sunmuştur. Ancak, geçmişteki MKS ve ABY yöntemlerinin uygulamaları, ABD Jeolojik Tetkik Dairesi tarafından önerilmiş USGS ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nce geliştirilen MIT hacimsel yöntemi veya bu iki yöntemin karışımı melez yöntemler üzerinedir. İstatistiksel ve olasılık tabanlı USGS veya MIT yöntemlerinde, jeotermal kaynak terk sıcaklığı ve çevrim verimliliği, kullanılacak çevrim türbininin tipi göz önünde bulundurulmaksızın kullanıcılar tarafından genellikle keyfi olarak seçilmektedir. USGS ve MIT temelli olasılıklı yöntemlerinin bu şekilde keyfilik içeren kullanımı, jeotermal sahaların elektrik üretim potansiyeli için aşırı iyimser tahminlerin yapılmasına ve dolayısıyla da yatırımcıların yanlış yönlendirilmesine sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, hacimsel depolanmış ısı kavramı üzerine kurulu USGS ve MIT yöntemlerindeki yukarıda bahsedilen karar verme parametrelerindeki keyfilik ortadan kaldırarak ve dolayısıyla da jeotermal sahaların daha gerçekçi elektrik üretim potansiyelinin belirlenmesini olanaklı kılan, ABY yöntemi ile birlikte de kullanılabilen yeni bir uygulama yöntemi sunulmaktadır. Bu yeni uygulama yönteminde, jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak seçilecek temel güç (tek flaş buhar veya çift akışkanlı) santralının tipi dikkate alınarak ve termodinamiğin 2. yasası göz önünde bulundurularak, saha terk sıcaklıkları ve elektrik çevrim verimliliği belirlenmektedir. Metodun uygulaması ve sonuçları, tek flaş ve/veya çift akışkanlı santrallerle Türkiye'deki elektrik üretimine elverişli jeotermal sahalar için gösterilmekte, USGS ve MIT yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hacimsel yöntemlerle elektrik üretim potansiyeli tahmini, USGS, MIT, Garg & Combs yöntemleri, Olasılıklı ABY yöntemi, Yeni bir uygulama metodu.

ABSTRACT

After discovery of a geothermal reservoir, an important task is to estimate the decision-making quantities (or parameters) such as its stored heat in-place, recoverable heat at the wellhead, and power (or electricity) generation potential by use of a power station. Because it is impossible to estimate in situ stored heat of a geothermal reservoir and the amount of recoverable heat at the

wellhead with 100% certainty, it is desirable to use statistical and probabilistic methods instead of deterministic methods to estimate these decision-making parameters. Often the Monte Carlo Simulation method (MCSM) or analytic uncertainty propagation method (AUPM) is used to estimate the statistical measures such as P10 (proved), P50 (probable) and P90 (possible) that quantify uncertainty in these important decision-making parameters estimated by volumetric methods.

The AUPM is based on an analytical foundation and presents a simple alternative to the MCSM. However, in the past, both MCS and AUP methods are applied to the USGS method developed by the US Geological Survey, to the MIT method developed by Massachusetts Technology Institute, or to hybrid methods based on the USGS and MIT. Both USGS and MIT methods, when they are used for predicting power (or electricity) generation potential of a geothermal resource, are often used with arbitrarily chosen values of resource abandonment temperature and thermal conversion efficiency which do not take into account the type of power station. The USGS and MIT applications with arbitrarily chosen input parameters of the abandonment temperature and conversion efficiency often lead to too optimistic estimations of electricity production potential of geothermal fields and therefore can mislead the investors in this sector.

In this study we present a new application method which could also be used with the AUPM and removes the arbitrary usage of input parameters of abandonment resource temperature and conversion efficiency by accounting for the type of a basic power station appropriate for a geothermal system under consideration. The new method enables one to predict much more realistic estimates of the electricity production potential of geothermal fields. In this new approach, the basic power station (such as based on a single flash or binary cycle) to be used is chosen according to the resource temperature and field abandonment temperature and electricity conversion efficiency which are determined based on the 2nd law of thermodynamics. The application of the method is demonstrated for a few geothermal systems in Turkey, which are amenable to electricity production by use of single flash or binary cycle power stations, and the results obtained from the new method are compared with the results of USGS and MIT methods.

Keywords: Electricity production potential estimations by using volumetric methods, USGS, MIT, Garg & Combs methods, Probabilistic AUPM, a new application method.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, Türkiye’de jeotermal sahaların özelleştirmeye açılmasıyla birlikte, elektrik (güç) üretimi için “elverişli” jeotermal saha arama, değerlendirme ve mevcut olanların da geliştirilmesi için Türkiye jeotermal sektöründe yatırımlar önemli ölçüde artmakta ve hızlı bir büyüme görülmektedir. Örneğin, son on yılda, Türkiye’de jeotermal kurulu güç kapasitesi, yaklaşık 22 kat artarak 18 MWe’tan 400 MWe’a çıkmıştır. Son beş yıldaki artış ise 4 kat civarındadır [1], [2], [3]. Pekçok özel yatırımcı, devletin, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik alımı garantisi vermesi nedeniyle, elektrik üretimi için güç santralleri kurmak amacıyla genellikle MTA’nın daha önceden keşfettiği jeotermal sahaları değerlendirmektedir.

Bilindiği gibi, bir jeotermal sahanın elektrik üretimi için keşfi, değerlendirilmesi ve hatta geliştirilmesi aşamalarında, değer yaratacak ve/veya değer kaybını (riski) azaltacak kararlar vermek için, depolanmış ısı, üretilebilir ısı ve güç potansiyeliyle ilgili belirsizliği de hesaba katan tahminlere gereksinim duyulur. Bu amaç için, 1970’lerde ABD Jeolojik Tetkik Dairesi (USGS) tarafından hacimsel depolanmış ısı (veya “yerinde ısı”) yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır [4], [5], [6]. USGS hacimsel yöntemi olasılıklı Monte Carlo (MC) veya ona basit bir alternatif olan analitik belirsizlik yayılımı (ABY) yöntemi ile birlikte kullanılarak, bir jeotermal kaynağın kanıtlanmış (%90’dan daha büyük olasılıkla), olası (%50’dan daha büyük olasılıkla) ve olanaklı (%10’dan daha büyük olasılıkla) üretim potansiyel tahminleri yapılabilmektedir [7], [8].

USGS hacimsel yöntemi, jeotermal kaynakların depolanmış ısı veya hacimsel yünden değerlendirilmesinde basitliği nedeniyle oldukça caziptir. Ancak son yıllarda jeotermal kaynakların

önemli oranda gelişimiyle beraber geride kalan on yıllar boyunca edinilen deneyim, söz konusu yöntemin, ilk önerildiği şekliyle kullanımının gerçek güç potansiyellerini aşırı iyimser tahmin ettiğini göstermiştir. Sorunun çoğu, hesaplamalarda kullanılan üretim (veya kurtarım) faktörü, gerçekte üretilebilecek olan kaynak hacmi ve referans sıcaklık için keyfi olarak çoğu zaman düşük alınan ortam sıcaklığı (veya terk sıcaklığı) değerlerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, pek çok çalışmada USGS yönteminde, 15 °C referans sıcaklığı kullanılırken, kimi çalışmalarda 25 °C, kimisinde 35 °C, kimisinde de 100 °C alınmaktadır. Bu keyfi referans sıcaklık değerleri depolanmış ısı hesaplamaları için kullanılabilir olmakla beraber, kuyu başında üretilebilir ısı ve elektrik üretimi tahminleri için gerçekçi değildir.

Ayrıca, herhangi bir kuyunun mevcut olmadığı erken arama ve erken değerlendirme aşamalarında, kurtarım faktörünün kuyularda uygun geçirgenlik bulunamaması nedeniyle sıfır olma olasılığı bulunmasına rağmen, USGS yönteminde, 15 °C'lik bir referans sıcaklık ve bununla beraber, sıfırdan farklı bir üretim faktörü sıklıkla kullanılmaktadır. Ortam sıcaklığı gibi düşük bir referans sıcaklığın ve sıfırdan farklı bir üretim faktörü değerinin kullanımının, üretilebilir ısı için aşırı iyimser tahminler ürettiği literatürde rapor edilmiştir [9], [10], [11], [12].

Son yapılan çalışmalar, referans sıcaklığın, üretilebilir ısıyla ilgili gerçekçi tahminlerini elde etmek için, tekli flaş (single-flash) ve çiftli akışkan (binary) gibi belirli güç çevrimlerinin göz önüne alınarak seçilmesi gerektiğini göstermektedir [11]. Bu yaklaşım, güç dönüşümünde kullanılabilen güç çevrimi için, mevcut iş ve dönüşüm verimliliğinin uygun olarak hesaplanmasını sağlamaktadır [11].

Bu çalışmada, güç potansiyelinin gerçekçi tahminlerinin yapılabilmesi için, olasılıklı ABY yöntemleriyle birlikte USGS hacimsel yönteminin uygun kullanımı, güç dönüşümü için kullanılabilen tek flaşlı ve çift akışkanlı temel jeotermal çevrim santralleri göz önüne alınarak gösterilmektedir.

2. KAYNAK DEĞERLENDİRME

Olası elektrik üretimi veya doğrudan kullanım için belirlenmiş bir jeotermal sahanın kaynak değerlendirmesinde ilk adım yeraltında depolanmış ısının, q_R (kiloJoule \equiv kJ), tahmin edilmesidir. Depolanmış ısı aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$q_R = AH(\rho c_p)_R (T_R - T^r) \quad (\text{kJ}) \quad (1)$$

(1) eşitliğinde A (m^2) rezervuar alanı, H (m) rezervuar kalınlığı, T_R (°C) rezervuar (veya kaynak) sıcaklığı, T^r (°C) referans sıcaklık ve $(\rho c_p)_R$ ($\text{kJ}/\text{m}^3\text{-}^\circ\text{C}$) ise akışkan-doyurulmuş kayaç sisteminin hacimsel izobarik özgül ısı kapasitesini temsil etmektedir. Bu çalışmada tek-faz sıvı su sistemi göz önünde bulundurulduğundan, $(\rho c_p)_R$ aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$(\rho c_p)_R = \phi \rho_l c_{pl} + (1 - \phi) \rho_s c_{ps} \quad (\text{kJ}/\text{m}^3\text{-}^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Denklem 2'de ϕ [kesir] gözeneklilik, ρ_l ve ρ_s [kg/m^3], sırasıyla, sıvı su ve katı kayaç matrisinin yoğunluklarını temsil eder. c_{pl} ve c_{ps} ($\text{kJ}/\text{kg}\text{-}^\circ\text{C}$) ise, sırasıyla, sıvı su ve katı kayaç matrisinin izobarik özgül ısı kapasiteleridir.

Jeolojik yapıdaki karmaşıklık, matris ve çatlak sistemi geçirgenliklerindeki farklılıklar, kuyu iç sınır koşulları ile rezervuar dış sınır koşullarındaki ideal olmayan durumlar nedeniyle, depolanmış ısı q_R 'nin ancak R_g kesri kadarı kuyu başında üretilebilir. Burada R_g termal (ısı) üretim faktörü olarak isimlendirilir ve kuyu başında üretilecek ısı q_{WH} (kJ)'in depolanmış ısı q_R 'a oranı olarak tanımlanır [13]:

$$R_g = \frac{q_{WH}}{q_R} \quad (\text{kesir}) \quad (3)$$

Denklem 1 ve 2'yi kullanarak kuyu başında üretilecek ısı için aşağıdaki denklem türetilebilir:

$$q_{WH} = R_g q_R = R_g AH(\rho c_p)_R (T_R - T^r) \quad (\text{kJ}) \quad (4)$$

Elektrik üretimi tahmininde bundan sonraki adım, teorik olarak kuyu başında üretilecek ısıdan elde edilebilecek maksimum mevcut işi hesaplamaktır [14]. İdeal olarak [ters çevrilmezlik kaynaklarını, sürtünme kayıplarını ve türbülans (ters akım) etkilerini ihmal ettiğimiz koşullarda] alışıldık hacimsel USGS yöntemi için mevcut iş aşağıdaki denklem ile verilir [11]:

$$W_A = m[h - h_{ex} - T_{exK}(s - s_{ex})] \quad (\text{kJ}) \quad (5)$$

Burada h (kJ/kg) ve s (kJ/kg-K), sırasıyla, su buharı veya hidrokarbon buharının türbin giriş koşullarındaki özgül entalpi ve entropisini temsil etmektedir. T_{exK} , Kelvin cinsinden mutlak giriş sıcaklığını, h_{ex} ve s_{ex} sıvı su veya sıvı hidrokarbon fazının entalpi ve entropisini temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, türbine girecek kütle m (kg)'nin kullanılacak güç çevirime bağlı olduğu ve kuyu başında üretilecek kütle miktarı olarak ele alınamayacağıdır. Kuyu başında üretilecek kütle miktarı m_w aşağıdaki denklem ile verilebilir:

$$m_w = q_{wH} / (h_w - h^r) \quad (\text{kg}) \quad (6)$$

Burada h_w kuyu başında üretilen sıvı suyun ortalama sıcaklık değerindeki entalpisidir, ki bu ortalama sıcaklık değeri kuyu içindeki entalpi kayıpları nedeniyle genelde rezervuar sıcaklığından farklıdır; h^r ise sıvı akışkanın referans sıcaklık değerindeki entalpisidir.

Bir sonraki alt bölümde tartışılacağı gibi, alışıldık USGS hacimsel yönteminde Denklem 5'teki m Denklem 6 ile verilen m_w ile, h ise $h_w(T_R)$ ile değiştirilir ve $T_{exK} = T_{aK}$, olarak alınır. Burada T_{aK} Kelvin cinsinden mutlak ortam sıcaklığıdır; $T_{aK} = 288.15$ K [6].

DiPippo (2008)'nin, [14], çalışmasını temel alarak Garg & Combs (2011, 2015), [10],[11], gerçek güç çevirimleri için Denklem 5'teki m , h ve s 'nin türbin giriş koşullarında hesaplanması gerektiğini ve de en uygun mutlak çıkış sıcaklığının kondenser sıcaklığı olduğunu belirtmektedirler. Tek flaşlı ve çiftli akışkan çevirimleri için mevcut işin (W_A) hesaplanabileceği formüller Garg&Combs (2015), [11] tarafından sunulmuştur. Bir sonraki alt bölümde bu denklemler verilmektedir.

Gerçek güç çevrimlerinin hiçbirinde, mevcut iş, tersinmezlik ve çeşitli kayıplar nedeniyle tümüyle elektriğe dönüştürülemez. Bu nedenle, mevcut işin ancak η_c kesri kadarlık oranı elektrik üretimine çevrilebilir (bkz., [11], [12], [13], [15], [16], [17]). Dolayısıyla, jeotermal kaynaktan üretilebilir enerji E_r (kJ) aşağıdaki denklemle verilir:

$$E_r = \eta_c W_A \quad (\text{kJ}) \quad (7)$$

Elektrik üretim potansiyeli tahmininde son adım, Denklem 7 ile verilen üretilebilir enerjinin yük faktörü L_F (kesir), planlanan proje süresi t_p (saniye) ve birim çevirme faktörü 10^3 (kW/MW) bölünmesi ile güç veya elektrik üretim potansiyeli PW_c (MWe)'yi elde etmektir:

$$PW_c = \frac{E_r}{10^3 L_F t_p} = \frac{\eta_c W_A}{10^3 L_F t_p} \quad (\text{MWe}) \quad (8)$$

Daha öncede değinildiği gibi, bu çalışmada, sadece tek-faz sıvı-su sistemleri göz önünde bulundurulmaktadır. Tek-faz buhar jeotermal sistemleri dünyada azdır; Türkiye'de mevcut değildir [15], [18], [19]. Tek-faz buhar ve iki-fazlı jeotermal sistemlerle ilgilenen okuyucular Sanyal & Samiento (2005)'nin, [15], çalışmasına bakabilirler.

Denklem 8 elektrik üretimi için güç potansiyeli tahmininin temelini oluşturur. Bir sonraki alt bölümde, kaynak sıcaklığına bağlı olarak göz önünde bulundurulabilecek temel güç çevrim sistemlerine uygun olarak, Denklem 8'de kullanılacak mevcut iş, referans sıcaklığı ve çevrim verimliliği formülleri verilecektir.

2.1. Temel Güç Çevrim Sistemleri

Tek veya çift flaşlı buhar çevrimli güç santralleri 180 °C ve üstü sıcaklığa sahip jeotermal sistemler için daha uygundur. Çift akışkanlı güç çevrimleri ise, kaynak sıcaklığı 200 °C' den düşük, 57 °C' den yüksek kaynak sıcaklığına sahip jeotermal sistemler için uygundur [20].

Tek (veya çift) flaşlı sistemlerde, gelen akışkan seperatör sıcaklığında ayrıştırılır ve ayrışan sıvı akışkan rezervuara enjekte edilirken, ayrıştırılan buhar güç üretmek için türbine gönderilir. Çift akışkanlı sistemlerde, ikincil akışkan (izobütan, pentan, vb.) sıvı jeotermal akışkan tarafından ısıtılarak

enerji üretilir. Isısı alınan sıvı jeotermal akışkan rezervuara enjekte edilir. Jeotermal akışkan ortam sıcaklığı (T_a) dan veya kondenser sıcaklığı (T_c)' ndan daha yüksek bir sıcaklıkta rezervuara enjekte edilir [10], [11], [14], [16].

2.1.1. Referans Sıcaklık T^r

Denklem 4'de kullanılacak referans sıcaklığı T^r 'nin değeri Denklem 8'den elde edilecek güç tahminini önemli ölçüde etkilediğinden, uygun olarak seçilmesi önemlidir. Alışıldık USGS hacimsel yönteminin ilk uygulamalarında, T^r için ya ortam sıcaklığı $15\text{ }^\circ\text{C}$ ya da kondenser sıcaklığı yaklaşık $40\text{ }^\circ\text{C}$ kullanılırdı. Daha önce de değinildiği gibi, mutlak $0\text{ }^\circ\text{C}$ değerini de içeren T^r 'nin herhangi bir değeri depolanmış ısı q_R 'nin hesaplanmasında kullanılabilir. Çünkü depolanmış ısı q_R sahanın belli bir referans sıcaklığına göre potansiyelini değerlendirmede veya kıyaslamada kullanılabilir.

Ancak, Denklem 4'den hesaplanacak üretilebilir ısı q_{WH} 'in değeri seçilen T^r değeri ile sınırlı olacaktır. Bu nedenle Garg& Combs (2015), [11,] ve Grant (2015), [12], referans sıcaklık değerinin seçiminde "terk sıcaklığı" kavramını önermişlerdir. Terk sıcaklığı, jeotermal sistemin mevcut teknoloji ile üretilemeyeceği en düşük sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, terk sıcaklığı göz önünde bulundurulacak güç çevrim sistemine bağlı olacaktır.

Tek flaşlı çevrimler için, terk sıcaklığı için alınabilecek en düşük sıcaklık değeri seperatör basıncındaki (p_{sep}) suyun kaynama veya doyma sıcaklığıdır (T_{sep}). Dolayısıyla, tek flaşlı bir çevrim sistemi için Denklem 1 ve 4'te referans sıcaklığını seperatör sıcaklığı olarak almak, yani $T^r = T_{sep}$, en uygun seçenek olacaktır.

Çift akışkanlı bir çevrim sistemi seçildiğinde ise, terk sıcaklığı, sıkışma noktası sıcaklığı (pinch-point temperature), T_p , olarak alınabilir. Bu sıcaklık değeri, ısı değiştiricisinde birincil (jeotermal) akışkan ile ikincil akışkan arasındaki en düşük sıcaklık farkı (ΔT) ile ikincil akışkanın yoğuşma sıcaklığı (bubble-point temperature, T_b) arasındaki farkın olduğu yer olarak alınır; yani, $T_p = T_b + \Delta T$ [10], [11], [21]. Dolayısıyla, çift akışkanlı çevrim sistemleri için, Denklem 1 ve 4'te referans sıcaklığı sıkışma noktası sıcaklığı olarak, yani $T^r = T_p$, alınması en doğru yaklaşım olmaktadır [11].

Farz edelim ki $230\text{ }^\circ\text{C}$ kaynak sıcaklığına sahip tek-faz sıvı su jeotermal rezervuar mevcuttur ve seperatör basıncı 4 bar olan tek flaşlı güç çevrim santrali elektrik üretimi için kullanılacaktır. 4 bar seperatör basıncında, doyma/kaynama (veya seperatör sıcaklığı $T_{sep} = 143.608\text{ }^\circ\text{C}$ dir. Bu örnek Türkiye'deki Kızıldere jeotermal sistemi ve Kızıldere-I tek flaşlı buhar çevrim santraline benzerdir. Eğer USGS yönteminde referans sıcaklığı $T^r = 15\text{ }^\circ\text{C}$ olarak hesap yaparsak, kuyu başında üretilecek ısı miktarı q_{WH} (kJ) Denklem 4'ten aşağıdaki gibi bulunur:

$$q_{WH,USGS} = 215 R_g AH (\rho c_p)_R \quad (\text{kJ}) \quad (9)$$

Buna karşın, referans sıcaklığını söz konusu tek flaşlı çevrim için verilen seperatör sıcaklığı olan $143.608\text{ }^\circ\text{C}$ alırsak, yani $T^r = 143.608\text{ }^\circ\text{C}$, Denklem 4'den kuyu başında üretilecek ısı miktarı aşağıdaki denklem ile verilir:

$$q_{WH,FLASH} = 86.392 R_g AH (\rho c_p)_R \quad (\text{kJ}) \quad (10)$$

Denklem 9 ve 10'dan hesaplanacak q_{WH} değerleri birbirinden yaklaşık 2,5 kat farklı olacaktır. Görüleceği gibi, çevrim sistemini göz ardı ederek referans sıcaklığını ortam sıcaklığı $15\text{ }^\circ\text{C}$ olarak alan USGS yöntemi (Denklem 9), kuyu başında aşırı iyimser üretilebilir ısı tahmini ve dolayısıyla Denklem 8'den aşırı iyimser elektrik üretim potansiyeli tahmini yapılmasına neden olacaktır.

2.1.2. Mevcut İş Formülleri

Güç üretimi hesaplamasında gerekli olan, tek flaşlı ve çift akışkanlı çevrim sistemleri için mevcut iş (W_A) formülleri Garg&Combs (2011, 2015), [10], [11], tarafından verilmektedir. Bu formülleri vermeden önce, kıyaslamalarda kullanılacağı için alışıldık USGS metodunda kullanılan mevcut iş denklemini vermek yerinde olacaktır [6]:

$$W_{A,USGS} = R_g AH (\rho c_p)_R (T_R - T^r) \left[1 - T_{rk} \frac{(S_R - S^r)}{(h_R - h^r)} \right] \quad (\text{kJ}) \quad (11)$$

Burada h_R ve s_R , sırasıyla, rezervuar sıcaklığında hesaplanan sıvı suyun entalpisi ve entropisidir. h^f ve s^f ise, sırasıyla, sıvı suyun referans sıcaklık T^f de hesaplanan özgül entalpi ve entropisidir. T_{rk} , Kelvin cinsinden mutlak çıkış/terk sıcaklığıdır. USGS metodunda, T^f ortam sıcaklığı olarak ve sıklıkla $15\text{ }^\circ\text{C}$, yani, $T^f = 15\text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınır ve dolayısıyla $T_{rk} = 288.15\text{ K}$ dir.

Tek flaşlı güç santrali için, mevcut iş formülü ($W_{A,FLASH}$) aşağıdaki denklemle verilir [11]:

$$W_{A,FLASH} = \frac{R_g AH(\rho c_p)_R (T_R - T_{sep})}{h_{gl}(T_{sep})} \quad (\text{kJ}) \quad (12)$$
$$\left\{ h_{stm}(T_{sep}) - h_w(T_c) - T_{ck} [s_{stm}(T_{sep}) - s_w(T_c)] \right\}$$

Denklem 12'de $h_{gl}(T_{sep})$ buharlaşma ısısını (veya entalpisini), h_{stm} ve s_{stm} , seperatör sıcaklığında buharın entalpi ve entropisini göstermektedir. T_c , kondenser sıcaklığını, h_w ve s_w ise, sıvı suyun kondenser sıcaklığındaki entalpi ve entropisidir. T_{ck} Kelvin cinsinden mutlak kondenser sıcaklığıdır. Denklem 12'de sıvı su ve buhar özellikleri, doygunluk eğrisi boyunca hesaplanır. Bunun için "International Association for the Properties of Water and Steam" tarafından verilen denklemler kullanılabilir [22].

Çift akışkanlı güç çevrim santrali için, mevcut iş aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır [11]:

$$W_{A,BINARY} = \frac{R_g AH(\rho c_p)_R (T_R - T_p)}{h_{sfgl}(T_b)} \quad (\text{kJ}) \quad (13)$$
$$\left\{ \begin{array}{l} h_{sfgl}(T_b) - h_{sfl}(T_c) - T_{ck} [s_{sfg}(T_b) - s_{sfl}(T_c)] \\ - V_{sf}(T_c, p_{sfb}) [p_{in} - p_{sfb}(T_c)] \end{array} \right\}$$

Burada $h_{sfgl}(T_b)$, ikincil akışkanın kaynama noktası sıcaklığı T_b 'deki buharlaşma entalpisini göstermektedir. V_{sf} (m^3/kg), ikincil akışkanın kondenser sıcaklığı ve kaynama noktası basıncındaki özgül hacmini temsil etmektedir. p_{in} , türbin giriş basıncıdır. Alt indisler g ve l, gaz ve sıvı özelliklerini belirtir. Türbin giriş basıncı verildiğinde, ikincil akışkanın kaynama noktası sıcaklığını da içeren Denklem 13'teki tüm diğer özellikleri NIST tabloları yardımıyla hesaplanabilir [23].

Örnek oluşturması amacıyla, iki farklı kaynak sıcaklığına ($170\text{ }^\circ\text{C}$ and $230\text{ }^\circ\text{C}$) sahip iki jeotermal sistem düşünelim. Bu kaynak sıcaklıkları sırasıyla, Türkiye'deki Salavatlı ve Kızıldere jeotermal sahalarına benzerdir [24]. Salavatlı-Aydın'daki güç santrali (Dora-I olarak adlandırılan) ikincil akışkanı pentan olan çift akışkanlı bir çevrim sistemidir. Kızıldere'deki güç santrali ise, tek flaşlı (Kızıldere-I olarak adlandırılan) bir çevrim sistemidir. Denklem 12 ve 13'ten bu iki kaynak için hesaplanan mevcut iş değerleri Denklem 11 ile verilen USGS mevcut iş formülünden 15 ve $40\text{ }^\circ\text{C}$ referans sıcaklık değerleri için hesaplanan değerlerle kıyaslamalı olarak Tablo 1'de verilmektedir. Tablo 1'de verilen normalleştirilmiş iş değerleri mevcut işin $R_g AH(\rho c_p)_R$ ile bölünmesi ile elde edilmiştir, yani,

$$(W_A)_n = W_A / R_g AH(\rho c_p)_R.$$

Tablo 1'de Kızıldere sahası benzer örneği (Kaynak sıcaklığı $230\text{ }^\circ\text{C}$) için verilen değer, üretilen jeotermal akışkanın 4 bar mutlak basınçta seperatörde ayrıştırıldığı ve dolayısıyla seperatör sıcaklığının $143.608\text{ }^\circ\text{C}$ olduğu varsayılmıştır. Ayrıca türbin giriş basıncının seperatör basıncına eşit olduğu ve kondenser sıcaklığının $40\text{ }^\circ\text{C}$ olduğu kabul edilmiştir. Kaynak sıcaklığı $170\text{ }^\circ\text{C}$ olan Salavatlı-Aydın sahası benzer örneği için, çiftli akışkan sisteminde ikincil akışkanın pentan olduğu ve ısı alınıp jeotermal sıvı akışkanın rezervuara enjekte edildiği kabul edilmiştir. Türbin giriş basıncı 7.5 bara (mutlak) alınmıştır. İkincil akışkan pentanın doygunluk sıcaklığı (T_b) bu basınçta $110.81\text{ }^\circ\text{C}$ dir. $5\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık farkı kabul edilerek, çift akışkanlı bu çevrim için sıkışma noktası sıcaklığı $T_p = 115.81\text{ }^\circ\text{C}$ alınmıştır. Bu değerler temel alındığında, jeotermal sıvı suyun terk sıcaklığı $80\text{ }^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmaktadır. Bu örnek için de kondenser sıcaklığı $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Tablo 1'den görüldüğü gibi, USGS metodu mevcut iş yükünü, belirli çevrim sistemlerini temel alan yaklaşımdan hesaplanarlardan yaklaşık 2-3 kat daha fazla tahmin etmektedir.

Tablo 1. Normalleştirilmiş mevcut iş $(W_A)_n$ değerleri; USGS metodundan kaynak sıcaklığı ve referans sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan değerlerin tek flaşlı ve çift akışkanlı güç çevrim sistemleri için hesaplanan değerler ile kıyaslanması.

Kaynak sıcaklığı T_R (°C)	Referans sıcaklık T^r (°C)	Normalleştirilmiş mevcut iş $(W_A)_n$ (°C)		
		$(W_{A,USGS})_n$	$(W_{A,FLASH})_n$	$(W_{A,BINARY})_n$
170	15	31.30	-	-
	40	23.58	-	13.64
230	15	55.6	-	-
	40	43.64	23.91	-

2.1.3. Çevrim Verimliliği η_c

Güç tahmininde kullanılan bir diğer parametre kullanım veya çevrim faktörü/verimliliği olarak adlandırılan η_c 'dir (bkz. Denklem 8). Çevrim faktörü, verilen belirli bir çevrim santrali için, üretilen gerçek elektrik enerjisinin mevcut işe oranıdır [10], [11], [14].

Garg and Combs (2015), [11], tarafından da belirtildiği gibi modern türbo-jeneratörler oldukça verimlidir. Kuru türbin verimlilikleri yaklaşık %85 civarındadır [14], [16]. Bununla beraber, jeotermal türbinler, genellikle "ıslak" (iki-fazlı) bölgede çalışırlar ve nemin varlığı verimliliklerini düşürür. Örneğin, %1 nemlilik oranı, verimliliği %1 oranında azaltmaktadır [11]. Flaşlı çevrim sistemlerinde, yoğunlaşmayan gazların varlığı verimliliklerini önemli ölçüde azaltır. Soğutma sistemlerinden dolayı parasitik yük çevrim verimliliğini ayrıca azaltır. Tüm bu etkiler nedeniyle, Garg & Combs (2015), [11], Denklem 12 ve Denklem 13 iş yükü hesaplamasında kullanıldığında, Denklem 8'de tek flaşlı ve çift akışkanlı temel güç çevrim sistemleri için $\eta_c = 0.7$ ile 0.8 arasında bir değer kullanılmasını önermektedirler. Eğer orijinal şekli ile USGS metodu kullanılacak ise (yani Denklem 11'den mevcut iş yükü hesaplandığında ve referans sıcaklık $T^r = 15$ °C alındığında), belki Denklem 8'de $\eta_c = 0.4$ (bu değerden daha büyük alınmamak kaydıyla) alınabileceği Garg & Combs (2015), [11], tarafından belirtilmektedir.

2.2. Isıl Kurtarım/Üretim Faktörü R_g

Isıl (termal) kurtarım veya üretim faktörü R_g (kesir) Denklem 8'den elde edilecek güç tahminini etkileyen bir diğer önemli parametredir. Genelde tahminlerde en büyük belirsizliği içeren parametredir. Hem teorik hem de hidrotermal sistemlere ait saha verilerinden hareketle, Williams (2014), [17], çatlaklı sistemlerden güç tahminlerinde R_g için 0.08 ile 0.2 arası, rezervuar kayacın tortul tabakalardan oluştuğu jeotermal sistemler için ise 0.1 ile 0.25 arası değerlerin dikkate alınmasını önermektedir.

Olasılıklı yöntemlerle Denklem 8'de güç tahminleri yapılırken, R_g için göz önünde bulundurulmuş dağılımlarda genellikle sıfırdan farklı bir alt sınır değer kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, geçirgenliği ölçümlerle (kuyu testi, kuyu-log verileri ile) kanıtlanmış sistemler için gerçekçidir. Buna karşın, Garg & Combs (2015), [11], ve Grant (2015), [12], tarafından da belirtildiği gibi, jeotermal kuyu sondajları ve testleri öncesindeki erken arama ve erken saha geliştirme dönemlerinde (geçirgenliğin kanıtlanmamış olduğu durumlarda), bu yaklaşım aşırı iyimser elektrik üretim potansiyeli tahminlerinin yapılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla böyle durumlarda aşırı iyimser tahminlerin yapılmasını önlemek için, R_g alt sınır değerinin "sıfır" alınması en doğru yaklaşım olmaktadır. İzleyen alt bölümde bir örnek uygulama ile R_g alt sınır değerinin sıfır veya sıfırdan farklı seçilmesi durumunda güç tahminleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

3. OLASILIKLI TAHMİN

Daha öncede değinildiği gibi, hacimsel yöntem ile depolanmış ısı (Denklem 1) ve elektrik üretim potansiyeli (Denklem 8) tahminleri, genellikle keşif ve saha geliştirmesinin erken dönemlerinde yapılır. Bu tahminler, jeolojik, jeofizik ve petrofizik verilerin bilinmesini gerekli kılar. Bu veriler arasında, kayaç sıcaklığı, rezervuar alanı, rezervuar kalınlığı, gözeneklilik, özgül izobarik kayaç ve akışkan ısı kapasiteleri yer alır. Güç tahmininde bu verilere ek olarak ısı kurtarım faktörü ve çevrim verimliliği faktörü değerleri de gerekli olur. Ancak bu veriler, tahminlerin yapılacağı saha keşif ve erken saha geliştirme dönemlerinde önemli belirsizliklere sahiptirler. Bu nedenle, yapılacak depolanmış ısı ve güç tahminleri üzerine bu belirsizlikleri yansıtmak ve bu tahminler üzerindeki belirsizlikleri sayısallaştırmak, karar vericiler açısından son derece önemlidir. Bu amaç için, Monte Karlo (MK) veya ona basit bir alternatif olan Analitik Belirsizlik Yayılma (ABY) gibi olasılıklı yöntemler kullanılır [7], [8]. Bu yöntemlerle, depolanmış ısı ve gücün kanıtlanmış (%90'dan daha büyük olasılıkla), olası (%50'dan daha büyük olasılıkla) ve olanaklı (%10'dan daha büyük olasılıkla) üretim potansiyel tahminleri yapılabilmektedir. MK yöntemine ait detaylar Kalos & Whitlock (2008)'ta [25], ABY yöntemine ait detaylar ise Onur vd. (2009, 2010)'de [7], [8], bulunabilir. Bu çalışmada, basitliği nedeniyle ABY olasılıklı tahmin yöntemi kullanılacaktır.

Tablo 2'de, depolanmış ısı ve elektrik üretim potansiyeli tahminlerinin yapılmasında gerekli girdi parametreleri verilmektedir. Garg & Combs (2015), [11], tarafından önerildiği gibi, bu parametreleri iki grup altında toplamak mümkündür. Tablo 2'de Grup II altında listelenen parametreler, genelde değerleri bir jeotermal sistemden ötekine önemli ölçüde değişiklik göstermeyen ve dolayısıyla da olasılıklı yöntemler kullanıldığında sabit olarak ele alınabilecek parametrelerdir. Bu grup altındaki parametreler, doymuş sistemin hacimsel izobarik ısı kapasitesi, santral yük faktörü, santral veya proje yaşam süresi ve seçilecek santral türüne bağlı olarak mevcut mühendislik verileriyle belirlenebilecek referans sıcaklık ve santral çevrim verimliliği faktörüdür.

Tablo 2'de Grup I altında listelenen parametreler ise, en fazla belirsizliğe sahip olanlardır ve her biri için bir istatistiksel dağılımın tanımlanması, depolanmış ve elektrik üretimi potansiyeli tahminlerindeki belirsizliği sayısallaştırmak için gereklidir.

Tablo 2. USGS hacimsel yöntemi ile depolanmış ısı ve güç potansiyeli tahminleri için gerekli girdi parametreleri listesi.

Grup I girdi parametreleri
Rezervuar alanı, A [m^2]
Rezervuar kalınlığı, H [m]
Rezervuar sıcaklığı, T_R [$^{\circ}C$]
Isıl kurtarım/üretim faktörü, R_g [kesir]
Grup II girdi parametreleri
Referans sıcaklık, T^r [$^{\circ}C$]
Çevrim verimliliği, η_c [kesir]
Hacimsel ısı kapasitesi, $(\rho c_p)_R$ [$kJ/m^3 \cdot ^{\circ}C$]
Santral yük faktörü, L_F [kesir]
Santral veya proje yaşam süresi, t_p [saniye]

Şüphesiz, Tablo 2'de listelenen girdi parametreleri için, özellikle de Grup I parametreleri için, eldeki veriler sınırlı veya mevcut değil ise, bu parametrelere ait olasılık yoğunluk fonksiyonlarını gerçekçi olarak belirlemek zor olacaktır.

Ayrıca belirtmek gerekir ki, belirsizliğin olasılıklı yöntemlerle sayısallaştırılması tümüyle özeldir. Bunun da temel nedeni, girdi parametrelerine ait değerlerin seçiminin, eldeki mevcut veriye - ki genelde veri yetersizdir ve bu girdi parametrelerinin değerleri hakkında nesnel bir sonuca ulaşmaya engel teşkil eder - ve yorumcunun tecrübesine bağlı olmasıdır. Welsh vd. (2007), [26], tarafından da belirtildiği gibi, iki farklı yorumcunun tecrübelerine bağlı olarak aynı girdi parametreleri için iki farklı olasılık yoğunluk fonksiyonu seçmesi kuvvetle olasıdır. Bu nedenle de, tüm yorumcular aynı tecrübe ve veriye sahip olmadığı ve de aynı yol ile belirsizliği sayısallaştırmadığı sürece, depolanmış ısı ve üretilebilir güç için doğru ve tek bir olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi de olası değildir.

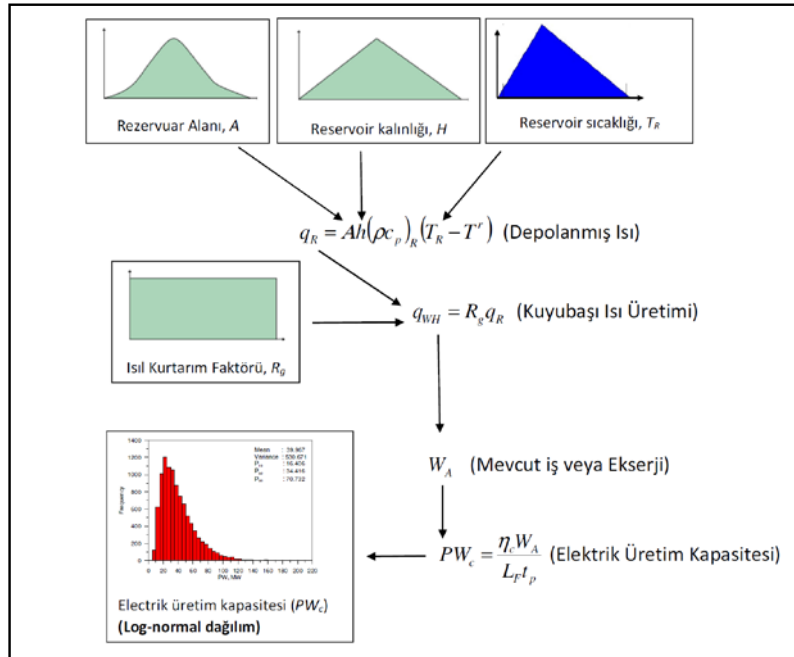
Bir önceki paragrafta yapılan tartışmaya bağlı olarak, girdi parametreleri için belirli tipte bir olasılık yoğunluk fonksiyonu (düzgün, normal, log-normal veya üçgensel, vd.) kullanımının tercih edilmesinde ısrarcı olmak için bir neden olmadığı söylemek yanlış olmaz. Çünkü Onur vd. (2009, 2010), [7], [8], tarafından gösterildiği gibi, Denklem 1 ve 8'deki girdi parametreleri için hangi tip olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılırsa kullanılsın, q_R ve PW_c 'nin sonuçta elde edilecek olasılık yoğunluk fonksiyonu, Merkezi Sınır Teoremine göre, log-normal olmaktadır.

Şekil 1'de tek-faz sıvı-su sistemleri için depolanmış ısı ve elektrik üretim potansiyelinin olasılıklı yöntem ile tahmin metodolojisine ait şema gösterilmektedir.

4. ÖRNEK UYGULAMA

Örnek uygulama için Germencik sahası göz önünde bulundurulmaktadır. Germencik jeotermal sahası, Büyük Menderes Grabeni'nin batısında yer alan, 1968 de MTA tarafından keşfedilmiş, tek-faz sıvı-su jeotermal sahasıdır. Sahada gözlemlenmiş kaynak sıcaklıkları 191 ile 232 °C arasında değişmektedir [27], [28], [29].

Bu saha için girdi verilerinin büyük çoğunluğu Başel (2010)'in, [19], doktora tezinden alınmıştır. Başel bu saha için maksimum 7 km² lik bir rezervuar alan bilgisi vermiştir. Başel (2010), [19], bu rezervuar alanı bilgisini sahaya ait 2010 öncesi rezistivite ölçümleri ve jeolojik kesitlerden belirlediğini belirtmektedir. Ancak bu değer, son yıllarda bu saha için, Unverdi & Cerci (2013), [28], tarafından verilen 36 km² ve Tureyen vd. (2014), [29], tarafından rapor edilen 50 km² rezervuar veya lisans alanı bilgilerinden oldukça küçüktür. 2009 yılında, bu sahayı işleten firma, 6 üretim ve 7 enjeksiyon kuyusunun bağlı olduğu, kurulu gücü 47.4 MWe olan çift flaşlı bir santrali elektrik üretimi için devreye almıştır [28].



Şekil 1. Tek-faz sıvı-su sistemleri için depolanmış ısı ve elektrik üretim potansiyelinin hacimsel olasılıklı yöntem ile tahmin metodolojisine ait şema.

Unverdi & Cerci (2013), [28], ve Tureyen vd. (2014), [29], tarafından rapor edilen 36 ve 50 km² alan bilgileri, büyük olasılıkla yeni ruhsat alanları ve yeni keşiflerle belirlenmiş saha içindeki alanları kapsamaktadır. Çünkü sahayı işleten firma sahanın yakın gelecekteki elektrik üretim kapasitesini kademeli olarak 232.3 MWe çıkarmayı planlamıştır [30].

Daha öncede değinildiği gibi, hacimsel yöntem ile depolanmış ısı (Denklem 1) ve elektrik üretim kapasitesi (Denklem 8) tahminleri, genellikle keşif ve saha geliştirmesinin erken dönemlerinde yapılır. Germencik sahası bu aşamaları geçmiş bir saha olarak değerlendirilebilir olmakla beraber, bu sahanın örnek uygulama için seçilmesinin temel nedeni, 2011’de sahanın geliştirilmeye başlanması öncesi, bu sahayla ilgi oldukça fazla sayıda yayınlanmış verinin literatürde mevcut olmasıdır. Dolayısıyla, bu sahanın elektrik üretim potansiyelini bu çalışmada göz önünde bulundurulmuş çeşitli hacimsel yöntemlerle hesaplayabilir, rapor edilen kurulu güç ve elde edilen gerçek elektrik üretim verileri ile kıyaslayabiliriz. Bu sayede, hangi hacimsel yöntemin elektrik üretim potansiyeli için daha gerçekçi sonuçlar tahmin ettiğini belirleyebiliriz.

Daha öncede belirtildiği gibi, burada sunulan örnek uygulama hacimsel yöntemde kullanılacak Germencik sahası ile ilgili girdi verilerinin önemli bir kısmı Başel’in, [19], tezinden alınmıştır. Başel (2010), [19], tezinde Germencik sahası elektrik üretim potansiyelini USGS ve MIT (2006) metodolojilerinin “karışımından” oluşan bir tür melez bir yöntem kullanarak tahmin etmiştir. Yaptığı tahminde Başel (2010) referans sıcaklığı $T^r = 100\text{ °C}$ ve “çevrim verimliliğini” (çevrim ısıl verimliliği olarak isimlendirilmekte ve η_{th} ile gösterilmektedir, MIT 2006, [31]) $\eta_{th} = 0.18$ olarak almıştır. Belirtmek gerekirse, Başel’in, tahmininde kullandığı referans sıcaklığı “keyfi” seçilmiş bir değerdir ve belirli bir çevrim sistemi göz önünde bulundurmamaktadır. Başel’in elektrik üretim potansiyeli tahmini için kullandığı denklem aşağıda verilmektedir:

$$PW_{c,MIT} = \frac{\eta_{th} R_g AH(\rho c_p)_R (T_R - T^r)}{10^3 L_F t_p} \quad (\text{MWe}) \quad (14)$$

Burada kaydedilmesi gereken bir diğer önemli nokta da, Germencik’te 47.4 MWe kurulu güce sahip olan santralin çift flaşlı bir çevrim sistemi oluşudur. Hacimsel yöntemler genelde keşif aşamasında ve erken saha geliştirme evrelerinde kullanıldığından, bu evrelerde diğer girdi parametrelerindeki, örneğin ısıl kurtarım faktöründeki, rezervuar kalınlığı gibi, belirsizlikler çok daha büyüktür. Bu nedenle, çift veya üç flaşlı, ikili çift akışkanlı, flaş artı çift akışkanlı gibi karmaşık çevrim sistemlerinin hacimsel yöntemlerle elektrik üretim potansiyeli tahminlerinde dikkate alınması gerekli değildir. Bununla beraber, örneğin çift flaşlı sistemler için hacimsel yöntemle elektrik üretim potansiyeli tahmininde, düşük basınçlı buhar (Low-Pressure-Steam - LPS) sisteminden kaynaklanacak ek iş yükü hesaplanarak Denklem 13’e eklenebilir veya Denklem 13’den hesaplanan iş yükü kullanıldığında çevrim verimliliği için %80 ile %90 arasında bir değer kullanılabilir. Çünkü çift flaşlı sistemler, tek flaşlı sistemlere göre %10 ile %20 arasında daha fazla elektrik üretimi sağlarlar. Burada verilen Germencik sahası örnek uygulaması için bu son yaklaşım kullanılmıştır ve Germencik santrali çevrim verimliliği için, Unverdi & Cerci (2013), [28], tarafından belirlenen %87.4 değeri kullanılmıştır. Yani Denklem 8’de tek flaşlı çevrim için geçerli olan iş yükü (Denklem 13) çift flaşlı çevrimdeki yüksek basınçlı buhar (High-Pressure-Steam - HPS) sistemi için uygulanmış ve çevrim faktörü $\eta_c = 0.874$ alınmıştır.

Germencik çift flaşlı çevrim sisteminde, üretilen jeotermal akışkan yüksek basınçlı buhar (HPS) sisteminde 5.972 bar mutlak basınçta ayrılarak türbine girer [28]. Yüksek-basınçlı seperatör ve türbin girişi arasındaki basınç kayıplarını ihmal edersek, seperatör ayrıştırma sıcaklığını 158.644 °C ve türbin giriş basıncını da seperatör basıncına eşit alabiliriz. Kondenser sıcaklığı ise 40 °C dir [28].

Germencik sahası elektrik üretim potansiyeli tahminleri için altı farklı durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu altı farklı durum için girdi parametrelerine ait değerler ve dağılımları Tablo 3’te verilmektedir. İlk 5 Durum için rezervuar alanı, rezervuar kalınlığı, kaynak sıcaklığı ve hacimsel ısı potansiyeli değeri Başel’in doktora tezinde, [19], verilen Tablo E-7’den alınmıştır. Maksimum sıcaklık olarak, Başel’in verdiği 235 °C yerine, bu çalışmada sahada kaydedilmiş en yüksek sıcaklık değeri olan 232 °C alınmıştır. Durum 1-5 farklı parametre dağılımlarının etkisini incelemek ve farklı hacimsel yöntemlerden (alıldık USGS, Garg & Combs, USGS-MIT melez hacimsel yöntemlerinden) hesaplanan elektrik üretim potansiyelinin kıyaslanması amacıyla tasarlanmıştır.

Örneğin, Durum 1, 2 ve 3 için elektrik üretimi tahminleri, Denklem 8’de Garg & Combs (2015), [11], tarafından tek flaşlı sistem için türetilmiş ve Denklem 12 ile verilen iş yükü formülü kullanılarak ve çevrim verimlilik faktörü %87.4 alınarak hesaplanmıştır. Durum 4 için elektrik üretim tahmini, alıldık USGS hacimsel metodolojisi kullanılarak ([13], [17]), yani Denklem 8’de Denklem 11 ile verilen iş yükü formülü, referans sıcaklık 15 °C ortam sıcaklığı ve çevrim verimliliği %40 alınarak hesaplanmıştır.

Durum 5 için elektrik üretim potansiyeli tahmini, Başel tarafından girdi parametreleri için verilen veriler kullanılarak, Denklem 15'ten (Denklem 15'te $T^r = 100$ °C ve $\eta_{th} = 0.18$ alınarak) hesaplanmıştır. Durum 6'da ise, Garg & Combs (2015), [11], hacimsel yöntemi kullanılarak ve rezervuar alanı için Unverdi & Cerci (2013), [28], ve Türeyen vd. (2014), [29], tarafından verilen 36 ve 50 km² (daha büyük) rezervuar alanı değerleri kullanılarak elektrik üretim potansiyeli tahmini yapılmıştır. Bu durum için de Durum 3'te olduğu gibi ısı kurtarım faktörü için göz önünde bulundurulmuş üniform (veya sürekli tek düze) dağılımın alt sınır değeri "sıfır" alınmıştır. Bunda amaç, Durum 3 de olduğu gibi, üretim faktörünün alt sınır değerinin sıfır alınmasının elektrik üretim potansiyeli tahminini hem ne ölçüde etkilediğini incelemek hem de saha geliştirme amaçlı açılacak kuyuların bazılarında geçirgenliğe rastlanmaması olasılığını dikkate almaktır.

Durum 2'nin Durum 1'den farkı, kaynak sıcaklığı, rezervuar alanı ve ısı kurtarım faktörü için farklı dağılımların kullanılmasıdır. Buradaki amaç, girdi parametreleri için seçilen farklı dağılımların, elektrik üretim tahmini istatistiksel ölçülerini (P10, P50 ve P90 değerlerini) ne ölçüde etkilediklerini araştırmaktır. Durum 1 ve Durum 2'de aynı girdi parametresi için seçilen farklı dağılımlarda, girdi parametresi aritmetik ortalama değerleri birbirlerine eşit olarak ele alınmıştır. Durum 3'ün Durum 1'den farkı, sadece, ısı kurtarım faktörü dağılımında alt sınır değerinin "sıfır" olarak alınmasıdır. Bunda amaç üretim faktörünün alt sınır değerinin "sıfır" alınmasının elektrik üretim potansiyeli tahminini ne ölçüde etkilediğini incelemektir. Max ve Min değerleri ile tanımlanan girdi parametreleri için üniform dağılım kullanılmıştır. Min, Mode, Max değerleri ile tanımlanmış girdi parametreleri için ise üçgen dağılım kullanılmıştır. Tek değer olarak tanımlanan girdi parametreleri ise, sabit (yani %100 olasılıkla biliniyor) olarak ele alınmıştır.

Tablo 3. Germencik sahası elektrik üretim potansiyeli tahmininde göz önünde bulundurulmuş altı farklı durum için girdi parametrelerine ait değerler ve dağılımları.

Girdi Parametresi	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6
A [km ²]	Min: 3 Mode: 4.5 Max: 7	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Min: 25 Mode: 30 Max: 50
H [m]	Min: 750 Mode: 1500 Max: 2000	Min: 750 Max: 2000	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı
T _R [°C]	Min: 205 Mode: 220 Max: 232	Min: 205 Max: 232	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Min: 205 Mode: 220 Max: 235	Durum 1 ile aynı
(ρc_p) _R [kJ/m ³ .°C]	2479.5	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Min: 2055 Mode: 2513 Max: 2853	Durum 1 ile aynı
R _g [fraction]	Min: 0.08 Max: 0.2	Min: 0.08 Mode: 0.14 Max: 0.2	Min: 0 Max: 0.2	Durum 1 ile aynı	Min: 0.07 Mode: 0.14 Max: 0.2	Durum 3 ile aynı
T _{sep} [°C]	158.644	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	N/A	N/A	Durum 1 ile aynı
T _c [°C]	40	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	N/A	N/A	Durum 1 ile aynı
T _a [°C]	N/A	N/A	N/A	15	100	N/A
η_c or η_{th} [fraction]	0.874	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	0.4	0.18	Durum 1 ile aynı
t _p [years]	30	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Min: 20 Mode: 25 Max: 30	Durum 1 ile aynı
L _r [fraction]	0.95	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Durum 1 ile aynı	Min: 0.8 Mode: 0.9 Max: 1	Durum 1 ile aynı

Tablo 4'te, Tablo 3'te verilen 6 farklı durum için olasılıklı ABY yönteminden hesaplanmış, P10 ($\geq 90\%$ olasılıklı), P50 ($\geq 50\%$ olasılıklı) ve P90 ($\geq 10\%$ olasılıklı) elektrik üretim potansiyeli değerleri Mega-Watt cinsinden verilmektedir.

Tablo 4. Germencik jeotermal sahası için tahmin edilen Mega-Watt potansiyel ve istatistiksel persentil (veya olasılık) değerleri.

MWe için Persentil Potansiyel (veya %olasılık \geq)	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6
P10 (%90 \geq)	27	18	12.5	32	54	90
P50 (%50 \geq)	44	44	31	51	85	225
P90 (%10 \geq)	63	76	55	73	121.5	400

Durum 1 ve 2 için hesaplanan değerlerin kıyaslamasında, girdi parametrelerinin aritmetik ortalama değerleri birbirine eşit olarak alındığında, seçilen dağılım ne olursa olsun P50 değerinin değişmediği, ancak P10 ve P90 değerlerinin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Durum 1 ve Durum 3 için elde edilen sonuçların kıyaslamasından, üretim faktörü dağılımı için alt sınırı değerinin sıfır olarak alınmasının P10, P50 ve P90 değerlerinin, özellikle de P10 değerinin, daha küçük tahmin edilmesine neden olduğu anlaşılmaktadır ki bu da beklenen bir sonuçtur.

Durum 1, 4 ve 5 için verilen sonuçların kıyaslamasından, keyfi referans sıcaklık ve çevrim verimliliği kullanan alışıldık USGS ve USGS-MIT melez hacimsel yöntemlerden hesaplanan P10, P50 ve P90 değerlerinin, Garg & Combs (2015) hacimsel yönteminden hesaplananlara göre, en az 1.5 kat daha yüksek olduğu görülmektedir.

Durum 1 ve 6'ya ait sonuçların kıyaslamasından, rezervuar alanının yaklaşık 7-kat artırılmasının, P10 değerini 3-kat, P50 değerini 5-kat, P90 değerini ise 6-kat arttırdığı görülmektedir.

Germencik 47.4 MWe kurulu güce sahip santralin 2012 ve 2013 yıllarına ait yayınlanmış gerçek elektrik üretim verilerinden güç üretiminin, sırasıyla 35.5 MWe ve 36.5 MWe olduğu anlaşılmaktadır [32]. Bu değerler, kurulu güç değerinden yaklaşık %24 daha azdır. Durum 1 ve 4 için elde edilen P10 (%90 olasılıklı) değerler 2012 ve 2013 yılları için gerçekleşen güç üretimi verilerinden yaklaşık %20 daha azdır. Durum 5'den elde edilen P10 değeri ise, gerçek üretilen güç değerlerinden yaklaşık %35 daha fazladır. Durum 1 (Garg & Combs yöntemi) için P50 (44 MWe) değerinin ise, Durum 4 (USGS yöntemi) ve Durum 5 (USGS-MIT melez yöntemi) için elde edilen P50 (sırasıyla, 51 MWe ve 85 MWe) değerlerinden, Germencik santrali kurulu gücüne daha yakın olduğu görülmektedir.

Son olarak kaydedilmesi gereken bir nokta da, Garg & Combs, [11], yönteminde rezervuar alanı diğer durumlara göre 7 kat daha büyük alınan Durum 6 için tahmin edilen P50 (%50 olasılıklı) elektrik üretim kapasitesi değerinin 225 MWe olduğudur. Bu değer, sahayı işleten firmanın yeni ruhsat alanları ve yeni açtığı kuyularla ulaşmayı hedeflediği 232.3 MWe kurulu güç değerine oldukça yakındır. Nasıl hesaplandığına dair ayrıntı ve kullanılan bazı girdi parametrelerine ait bilgiler (rezervuar alanı ve kurtarım faktörü gibi) verilmemekle beraber, Türeyen vd. (2014), [29], sahanın olası potansiyelinin 200 MWe olduğunu belirtmektedirler ki bu değer, bu çalışmada Durum 6 için 225 MWe olarak elde edilen P50 (50% olasılıklı) değere yakındır.

SONUÇLAR

USGS yöntemi genellikle, keşif ve erken saha geliştirme evrelerinde, jeotermal bir sahanın güç potansiyeli hakkında kabaca bir fikir edinmek için uygulanır. Olasılıklı yöntemlerle birleştirildiğinde jeotermal bir kaynağın elektrik üretme potansiyelini, girdi parametrelerindeki belirsizlikleri de dikkate alarak, tahmin etmede önemli bir araçtır.

Elektrik üretimine aday bir jeotermal sahanın elektrik üretme potansiyelinin gerçekçi ve güvenilir tahminlerinin yapılması için Garg & Combs (2015), [11], tek flaşlı ve çift akışkanlı sistemler için yeni USGS hacimsel yöntem formülleri geliştirmişlerdir. Bu formüller belirli bir çevrim santrali seçildiğinde, seçilen santrale uygun mevcut iş veya ekserjisinin hesaplanması ve ona uygun referans sıcaklığın (T^f) ve çevrim verimliliğinin (η_c) seçilmesi esasına dayanır. Bu denklemler bu çalışmada tanıtılmış ve Türkiye'deki bazı jeotermal sahalar için, ABY yöntemi ile uygulamaları gösterilmiştir ve kullanımının faydalı olduğu görülmüştür.

Elektrik üretim potansiyelinin gerçekçi tahminlerinin yapılabilmesi için çalışmadan elde edilen özgün sonuçlar şöyle özetlenebilir:

Alışıldık USGS yöntemi Garg & Combs, [11], tarafından önerildiği gibi değiştirilmelidir. Kaynak sıcaklığına uygun olarak seçilecek belirli bir çevrim ($180\text{ }^\circ\text{C}$ den yüksek sıcaklığa sahip sistemler için tek-flaşlı ve bu sıcaklıktan düşük sıcaklıklara sahip ancak $57\text{ }^\circ\text{C}$ den büyük jeotermal kaynaklar için çift akışkanlı) santraline uygun referans sıcaklık ve ona uygun çevrim verimliliği faktörü değerleri USGS hacimsel yönteminde kullanılmalıdır.

Derin sondaj ve kuyu testleri öncesinde, olası rezervuar geçirgenliği olmayan veya üretkenliği olmayan kuyuları da dikkate almak üzere, ısı kurtarım faktörü (R_g) için seçilecek dağılımda alt sınır değer olarak sıfırdan farklı bir değer yerine "sıfır" kullanılması önerilmektedir.

Grant (2015), [12], tarafından da çok iyi ifade edildiği gibi, çalışmada göz önünde bulundurulmuş hacimsel yöntemlerin herhangi bir olasılıklı yöntemle (MK veya ABY gibi) kullanılması, aşırı iyimser ya da kötümser tahminlerin yapılmasını engellemektedir. Eğer girdi parametreleri için seçilen değerler aşırı derecede büyük veya küçük ise, bu girdi parametreleri kullanılarak tahmin edilen elektrik üretim potansiyeli de aşırı büyük veya küçük olacaktır. Girdi parametrelerine farklı dağılımlar atamak, yapılacak tahminin aşırı büyük veya küçük olmasını önlemez. Girdi parametreleri ön yargılı bir şekilde büyük ya da küçük seçilirse, tahmin edilen elektrik üretim potansiyeli de ön yargılı olacaktır. Bu nedenle aşağıdaki özgül önermeleri yapmayı uygun bulmaktayız:

Hacimsel yöntemde kullanılacak büyük belirsizlikler içeren girdi parametreleri (rezervuar alanı, kalınlığı, sıcaklığı gibi) için seçilecek dağılım ve dağılım parametreleri mümkün olduğunca saha verileri kullanılarak oluşturulmalıdır.

Elektrik üretim potansiyelinin daha gerçekçi tahminlerinin yapılması için kuyu sondajı ve kuyu testi verileri ile desteklenmiş sayısal simülasyon modellemesi gereklidir ve sahadan gelen veriler zenginleştikçe tahminler güncellenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Satman, A., 2015. Türkiye'de enerji ve jeotermal yeri, 12. Ulusal HVAC&R Kongresi (TESKON 2015) ve Teskon+SODEX Sergisi, İzmir, Turkey, s. 3-15.
- [2] Mertoglu, O, Simsek, S., and Basarir, N., 2015. Geothermal country update report of Turkey (2010-2015), In: Proceedings of World Geothermal Congress 2015, 19-25 April, Melbourne, Australia, 9 p.
- [3] Aksoy, N., 2015. Jeotermal sahalarda üretim. 25. İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Seminer ve Sergisi Bildiriler Kitapçığı, İstanbul, Türkiye, s. 240-246.
- [4] Nathenson, M., Muffler, L.J.P., 1975. Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas: In: White, D.E., Williams, D.L. (Eds.), Assessment of Geothermal Resources of the United States—1975, 726. U.S Geological Survey Circular, 160p.

- [5] Muffler, L.P.J., and Cataldi, R., 1977. Methods for regional assessment of geothermal resources. U.S. Geological Survey Open-File Report 77-870, 78p.
- [6] Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti, M., Muffler, L.J.P., 1979. Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures $\geq 90^{\circ}\text{C}$, In: Muffler, L.J.P. (Ed.), Assessment of Geothermal Resources of the United States—1978, 790. U.S Geological Survey Circular, 170p.
- [7] Onur M., Sarak, H., Tureyen, O.İ., 2009. Hacimsel yöntemlerle tahmin edilen depolanmış termal enerji ve üretilebilir güçteki belirsizliğin tayin edilmesi, 9. Ulusal HVAC&R Kongresi ve Sergisi (TESKON 2009), İzmir, Turkey, s. 213-233.
- [8] Onur M., Sarak, H., Tureyen, O.İ., 2010. Probabilistic resource estimation of stored heat and recoverable thermal energy for geothermal systems by volumetric methods, In: Proceedings of World Geothermal Congress 2010, 25-29 April, Bali, Indonesia, 12 p.
- [9] Garg, S.K., Combs, J., 2010. Appropriate use of USGS volumetric “Heat in Place” method and Monte Carlo Calculations. In: Proceedings of 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 7p.
- [10] Garg, S.K., Combs, J., 2011. A reexamination of USGS volumetric “heat in place” method. In: Proceedings 35th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 5p.
- [11] Garg, S.K., and Combs, J., 2015. A reformulation of USGS volumetric “heat-in-place” resource estimation method, Geothermics, Vol. 55, pp. 150-158.
- [12] Grant, M., 2015. Resource assessment, a review, with reference to the Australian code, In: Proceedings of World Geothermal Congress 2015, 19-25 April, Melbourne, Australia, 6 p.
- [13] Muffler, L.P.J, 1979. Assessment of geothermal resources of the United States-1978: U.S. Geological Survey Circular 790, 163p.
- [14] DiPippo, R., 2008. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, 493p.
- [15] Sanyal, S.K., Sarmiento, Z., 2005. Booking geothermal energy reserves. Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 29, pp 467-474.
- [16] Zarrouk, S., Moon, H., 2014. Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review. Geothermics, Vol. 51, pp 142–153.
- [17] Williams, C., 2014. Evaluating the volume method in the assessment of identified geothermal resources. Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 38, pp 967–974.
- [18] Kaya, E., Zarrouk, S.J., O’Sullivan, M.J., 2011. Reinjection in geothermal fields: a review of worldwide experience, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 47–68.
- [19] Başel, E.D.K., 2010. Investigation of Turkey’s geothermal Potential, PhD Dissertation (in Turkish), Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology, Istanbul, Turkey, 310 p.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_electricity
- [21] Coşkun, A., Bolattürk, A., Kanoğlu, M., 2011. Jeotermal bir kaynak için güç çeviriminin termodinamik ve ekonomik analizleri, 10. Ulusal HVAC&R Kongresi (TESKON 2011) ve Teskon+SODEX Sergisi, Izmir, Turkey, s. 131-143.
- [22] IAPWS (1996), Release on the IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substances for general and scientific use, International Association for the properties of water and steam; <http://www.iapws.org>.
- [23] NIST, 2010. Thermophysical properties of fluid systems, The National Institute of Standards and Tech., <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- [24] Aksoy, N., 2014. Power generation from geothermal resources in Turkey, Renewable Energy, Vol. 68, pp. 595–601.
- [25] Kalos, M.V., Whitlock, P.A., 2008. Monte Carlo Methods, 2nd revised and enlarged edition, Willey-Blackwell, 2008, 203p.
- [26] Welsh, M.B., Begg, S.H., Bratvold, R.B., 2007. Modeling the Economic Impact of Cognitive Biases on Oil and Gas Decisions. In: 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 7p.
- [27] Filiz, S., Tarcan G., Gemici, U. 2000. Geochemistry of the Germencik Geothermal Field, Turkey, In: Proceedings of World Geothermal Congress 2000, 28 May-30 June, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 1115-1120.
- [28] Unverdi, M., Cerci, Y., 2013. Performance analysis of Germencik Geothermal Power Plant. Energy, Vol. 52, pp 192–200.



- [29] Tureyen, O.I., Sarak, H., Gulgor, A., Erkan, B., Satman, A., 2014. A study on the production and reservoir performance of the Germencik Geothermal Field. In: Proceedings of 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 8p.
- [30] <https://www.gurisholding.com/>
- [31] MIT, 2006. The future of geothermal energy – Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology; available at <http://geo-energy.org>.
- [32] <http://www.enerjiatlası.com/jeotermal/germencik-jeotermal-santrali.html>

ÖZGEÇMİŞ

Melek ALTIN

1979 yılı İstanbul doğumludur. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 2006-2013 yılları arasında Thrace Basin Natural Gas Corporation ve Transatlantic Petroleum şirketlerinde, doğalgaz arama ve üretim departmanlarında, sahada ve ofiste jeolojik-jeofizik-petrofizik yorum sistemleriyle çalışmış wildcat potansiyel sahaların belirlenmesi, statik yapısal, petrofizik rezervuar modelleme ve rezerv belirlemeye yönelik projelerde çalışmıştır. 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2017 yılı itibariyle "Probability Based Volumetric 'Heat In-Place' Methods for Predicting Power (Electricity) Generation Potential of Liquid-Dominated Geothermal Systems" adlı yüksek lisans tez çalışmasını bitirme aşamasındadır. Ağustos 2016'dan bu yana The Oil and Gas Year şirketinde "Map Research Coordinator" olarak görev yapmaktadır.

Mustafa ONUR

Tulsa Üniversitesi McDougall Petrol Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi ve bölüm başkanı olarak görev yapan Mustafa Onur 1960 yılı Diyarbakır doğumludur. Uzmanlık ve araştırma alanları arasında kuyu basınç testleri tasarımı, modellemesi ve analizi, rezervuar tanımlaması ve sayısal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. ITU, Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi, Malezya'daki Universiti Teknologi Petronas üniversitelerinde öğretim üyesi olarak görev yapmış olan Prof. Dr. Onur, Lisans derecesini 1982'de ODTU'den, Master derecesini 1985'te, Doktora derecesini 1989'da ABD Tulsa Üniversitesi'nden aldı. Tüm dereceleri Petrol Mühendisliği alanındadır. 2004' te Society of Petroleum Engineers (SPE)' den "Outstanding Technical Editor", 2010' da "Formation Evaluation", 2015'te "Distinguished Member" ödülleri alan ve TMMOB' nin Onur Kurulu üyesi olan Dr. Onur bugüne kadar uluslararası ve ulusal toplam 60 adet makale ile 150'nin üzerinde bildiri yayınlamıştır. Google Scholar' a göre, bugüne kadar yayınlarına aldığı atıf sayısı 1000'e yakındır; son beş yılda aldığı atıf sayısı 420'dir, h-indeksi ise 16' dır.