

HACİMSEL YÖNTEMLERLE TAHMİN EDİLEN DEPOLANMIŞ TERMAL ENERJİ VE ÜRETİLEBİLİR GÜÇTEKİ BELİRSİZLİĞİN TAYİN EDİLMESİ

Mustafa ONUR
Hülya SARAK
Ö. İnanç TÜREYEN

ÖZET

Jeotermal bir sahanın işletilmeye alınıp alınmayacağına karar verildiği sahadan üretimin pek olmadığı erken dönemde, rezervuarda depolanmış termal enerji ve üretilebilir gücün tahmin edilmesinde yaygın olarak hacimsel yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemde rezervuar ve terk etme sıcaklıkları, rezervuar çekim (drenaj) alanı, rezervuar kalınlığı, rezervuar gözenekliliği kayaç ve akışkana ait özgül ısı kapasiteleri gibi jeolojik, jeofiziksel ve Petro-fiziksel parametrelerin değerlerine gereksinim duyulmaktadır. Üretilebilir güç tahmini söz konusu olduğunda ise, bu verilere ek olarak üretilebilirlik oranı, yük faktörü ve dönüşüm verimliliği gibi diğer ek parametreler devreye girmektedir. Ancak sahadan üretim verilerinin yeterince olmadığı erken dönemde, bu parametrelere ait değerler büyük belirsizliklere sahiptir. Parametrelerdeki belirsizliklerin yapılan depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerine yansıtılması, sahanın ekonomik olarak işletilip işletilmeyeceğine dair sağlıklı bir kararın verilebilmesi ve riskin azaltılması bakımından kesinlikle gereklidir.

Bu çalışmada, kullanılan girdi parametrelerdeki belirsizliklerin hacimsel yöntemden tahmin edilen yerinde termal enerji ve üretilebilir güç üzerine yansıtılması Monte Carlo (kısaca "MC") ve Analitik Belirsizlik Yayılma (kısaca "ABY") yöntemleri ile detaylı olarak incelenmektedir. Girdi parametre dağılım tiplerinin, varsa girdi parametre çiftleri arasındaki korelasyonun ve girdi parametre değerlerinin ve sınırlarının seçilmesinde yaygın olarak yapılan kavramsal yanlılığın belirsizlik üzerine etkileri tartışılmaktadır. Bu çalışmada MC yöntemine alternatif olarak önerilen ve tanıştırılan ABY yöntemi hacimsel yöntemlerde kullanılan girdi parametreleri arasında (varsa) korelasyonu da göz önünde bulunduracak şekilde genel türetilmiştir. Çalışmanın en önemli sonuçları kısaca şöyle özetlenebilir: (i) Hacimsel yöntemde kullanılan girdi parametrelerine ait dağılımların tipi ne olursa olsun, hacimsel yöntemden hesaplanacak depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç dağılımları her zaman *log-normal* bir dağılımdır. (ii) Bu önemli sonuç ABY yönteminde kullanıldığında, ABY yönteminden tahmin edilen, termal enerji ve güçteki belirsizliğin karakterize edilmesi için gerekli olan istatistiksel ölçüler (veya markerler); P10, P50 ve P90, MC yönteminden elde edilenlerle aynıdır. Dolayısıyla, depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminindeki belirsizliğin tayin edilmesinde MC yazılımları kullanımı gerekli değildir. Onun yerine bu çalışmada geliştirilen basit ABY yöntemini kullanmak yeterlidir. (iii) Hacimsel yöntemde gerekli girdi parametreleri arasında (varsa) korelasyonun ihmal edilmesi, depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerinde belirsizliğin önemli ölçüde yanlış saptanmasına yol açabilir. (iv) Göz önünde bulundurulmuş bir sahada her bir kuyu (veya herhangi bir ülkedeki her bir jeotermal saha) için hesaplanmış P10, P50 ve P90 değerlerinin basit toplama işlemi ile elde edilen değerleri, o saha (veya ülke) toplamı için depolanmış ve üretilebilir güce ait P10, P50 ve P90 değerlerini temsil etmemektedir. (v) İstatistiksel toplama işlemiyle saha veya ülke geneli için hesaplanan P10 değeri (bu değer sahanın işletilip işletilmeyeceğine karar verirken bakılması gereken en önemli istatistiksel ölçüdür ve depolanmış ısı ve üretilebilir gücün %90 olasılıkla alacağı en küçük değeri temsil eder) basit toplama işlemiyle elde edilen değerden her zaman daha büyüktür. Çalışmada sunulan, yöntemlerin işleyişi ve doğruluğu hakkında bilgi verebilmek için yapay ve saha verileri ile uygulamalar gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Depolanmış termal enerji, belirsizlik.

ABSTRACT

Volumetric method is commonly used in order to estimate the thermal energy stored in the reservoir and the producible power in the area determined as developable or non-developable during the earlier period when generation is not much. Geophysical and Petro-physical parameters such as reservoir and discharge temperatures, reservoir drainage area, reservoir thickness, porosity of the reservoir, specific heat capacities of rocks and liquids, etc. while carrying out this method. While estimating the producible power; additional parameters such as producible power ratio, load factor and transformation efficiency, etc. are added to these data. However, in the earlier period when the data of generation from the area is not efficient, these parameters are significantly uncertain. It is certainly necessary to reflect the uncertainty of the parameters to the stored thermal energy and producible power estimations in order to decide whether the area can be developed efficiently and so as to decrease the risk factor.

By means of Monte Carlo ("MC" in short) and Analytical Uncertainty Diffusion (shortly "AUD") methods, this study in-detail analyzes the reflection of the uncertainties of the input parameters used on the thermal energy and the producible power where estimated by means of volumetric method. The effects of conceptual bias commonly carried out while determining the distribution types of the input parameters, the correlation of the input parameter couples, if any, and the values of parameters and the borders on uncertainty is discussed. AUD method recommended and discussed in this study as an alternative of MC method is generally derived while considering the correlation among the input parameters (if any) used in volumetric methods. The most significant results of the study can be summarized as following: (I) The stored thermal energy and producible power distribution to be calculated by means of the volumetric method are always *log-normal* distribution regardless of the input parameters used in the volumetric method. (ii) When using this important result in AUD method, the statistical measurements (or markers) required while characterizing the uncertainty of the estimated thermal energy and power by means of AUD method, P10, P50 and P90, are same as that of derived from MC method. Therefore, MC software is not necessarily used in order to determine the uncertainty of the stored thermal energy and the producible power estimation. Instead, using AUD method shall be sufficient. (iii) Underestimating the correlation among the input parameters (if any) required in volumetric methods may cause a significantly wrong detection of the uncertainty of the stored thermal energy and the producible power estimation. (iv) The values gathered by simply aggregating the P10, P50 and P90 values calculated for any well (or a geothermal area in any country) taken into consideration do not represent the P10, P50 and P90 values of the stored or producible power of that area (or country). (v) P10 value (this value is the most important statistical measurement to be considered while determining that an area can be developed or not and it represents the minimum value of the stored temperature and producible power by 90% probability) calculated by means of aggregation for an area or a country is always greater than the value gathered by means of simple aggregation. In order to provide information about the process and accuracy of the methods used in the study, applications are shown with artificial and area data.

Key Words: Storeal thermal energy, uncertainty

1. GİRİŞ

Belirsizlik, herhangi bir yeraltı enerji (petrol, gaz veya jeotermal) sistemine ait petrol, gaz veya termal enerji (ısı) rezervi hesaplamalarının doğasında vardır ve kaçınılmazdır. Dolayısıyla, bu sistemler için rezerv tahminleri yaparken, belirsizliklerin dikkate alınması ve de istatistiksel olarak doğru bir şekilde tanımlanması, saha geliştirme kararlarının doğru bir şekilde alınması ve yatırım risklerinin azaltılması bakımından son derece gereklidir.

Özet kısmında değinildiği gibi, jeotermal bir sahanın işletilmeye alınıp alınmayacağına karar verileceği erken dönemde, rezervuarda depolanmış termal enerji ve üretilebilir gücün tahmin edilmesinde yaygın olarak hacimsel yöntem kullanılmaktadır [1]. Ancak sahadan üretim verilerinin yeterince olmadığı erken dönemde, hacimsel yöntemde gerekli girdi parametrelerine ait değerler büyük belirsizliklere

sahiptir. Parametrelerdeki belirsizliklerin yapılan depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerine yansıtılması, sahanın ekonomik olarak işletilip işletilmeyeceğine dair sağlıklı bir kararın verilebilmesi ve riskin azaltılması bakımından kesinlikle gereklidir.

Geçmişte, hem ulusal hem de uluslararası jeotermal literatüründe [2-6], araştırmacılar hacimsel yöntemle tahmin edilen depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç miktarlarındaki belirsizliğin tayininde Monte Carlo (MC) yöntemlerini kullanmışlardır. Ancak bu çalışmalardan, hiçbirinde hacimsel yöntemlerden tahmin edilecek depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç miktarlarındaki belirsizliğin tayini hakkında derinlemesine bir araştırma sunulmamıştır. Örneğin, hacimsel yöntemde gerekli parametreler için seçilen dağılım tiplerinin, sonuçta hesaplanacak depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç dağılımını nasıl etkileyeceği belirtilmemiştir. Ayrıca, kuyu (veya saha) bazında bireysel olarak belirlenen ortalama, değişirlik (varyans) ve diğer üç istatistiksel ölçü; P10, P50 ve P90, değerlerinden saha (veya ülkeye) ait toplam değerlerin doğru olarak nasıl hesaplanması gerektiği üzerinde hiç durulmamıştır. Söz konusu çalışmalarda sadece göz önünde bulundurulmuş sahalarda için MC yöntemi kullanılarak depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminleri ile bu tahminlerdeki belirsizlikler rapor edilmiştir.

Hiç kuşku yoktur ki, bir önceki paragrafta zikredilen çalışmalarda kullanılan MC yöntemi belirsizliğin tahmininde kullanılan en genel yaklaşımdır. Ancak, bu çalışmada gösterildiği gibi, daha önce Sarak vd. [7] tarafından geliştirilen ve önerilen Analitik Belirsizlik Yayılma (ABY) yöntemi, depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerinin hacimsel yöntem kullanılarak yapılacağı durumlarda, belirsizliğin karakterize edilmesinde (ortalama, değişirlik, P10, P50 ve P90) MC yöntemine gereksim kalmadan kullanılabilir. Bunun temel nedeni, yine Sarak vd. [7] gösterildiği gibi, herhangi bir oluşuk (zon), kuyu veya saha için hacimsel yöntemle tahmin edilecek depolanmış ısı ve üretilebilir güçteki belirsizlik, istatistik ve olasılığın temel teoremi olan “Merkezi Sınır Teoremine” göre (bkz. örneğin, Barlow [8]) – hacimsel yöntemde gerekli parametreler için hangi dağılım tipi seçilmiş olursa olsun – log-normal dağılım ile tanımlıdır. Ayrıca, Sarak vd. [7], bu teoremin sonucu ABY yöntemi ile birleştirildiğine, ABY yönteminin sonuçlarının MC sonuçları ile pratik anlamda aynı olacağını göstermektedir. Dolayısıyla, basitliği nedeniyle ABY yöntemi, hacimsel yöntemden hesaplanan depolanmış termal enerji ve üretilebilir güçteki belirsizliğin saptanmasında MC yöntemine bir alternatif oluşturmakta, MC yöntemine gerek kalmadan belirsizlik ABY yöntemi ile doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada amacımız şunlardır: (i) Farklı girdi parametre dağılım tiplerinin, girdi parametreleri arası korelasyonun ve hacimsel yöntemde gerekli parametrelerin sınır değerlerinin seçilmesinde kavramsal yanlılığın (bkz Capen [9,10] ve Welsh vd. [11]), hacimsel yöntemle hesaplanan depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerindeki belirsizliği nasıl etkilediğini detaylı araştırmak; (ii) ABY yöntemi ile okuyucuları tanıştırmak. Çünkü bu yöntem, MC yöntemini uygulayan ticari yazılım programları satın almayı gerektirmeden, hacimsel yöntemlerden hesaplanacak termal enerji ve güç tahminlerindeki belirsizliği saptamada yeterince doğrulukla sonuçlar verir; (iii) Oluşuk, kuyu veya saha bazında hesaplanmış termal enerji ve üretilebilir güce ait belirsizliğin tanımlanmasında gerekli olan üç önemli istatistiksel markerin; P10, P50 ve P90 değerlerinin basitçe toplanmasından elde edilecek ilgili değerlerin, kuyu, saha veya ülke bazında termal enerji ve üretilebilir güce ait P10, P50 ve P90 değerlerini temsil etmeyeceğini ve bunu yanlış olduğunu – ki bu yaygın olarak yapılan bir yanlılıktır – okuyucuların dikkatine sunmaktır.

2. HACİMSEL YÖNTEM

Bilindiği gibi [1,7], hacimsel yöntem kullanıldığında depolanmış termal enerji veya ısı miktarı aşağıda denklemden hesaplanır:

$$H_t = \left[(1 - \phi) c_s \rho_s + \phi c_w \rho_w \right] Ah (T - T_r). \quad (1)$$

Denklem 1’de yer alan parametreler ve birimleri aşağıda tanımlanmaktadır:

A	rezervuar alanı, m^2
c_s	kayaç katı kısmının özgül ısı kapasitesi, $kJ/(kg \text{ } ^\circ C)$
c_w	sıcak suyun özgül ısı kapasitesi, $kJ/(kg \text{ } ^\circ C)$
h	net rezervuar kalınlığı, m
H_t	kayaç katı kısmı ve suda depolanmış yerinde termal enerji veya ısı miktarı, kJ
T	rezervuar ortalama sıcaklığı, $^\circ C$
T_r	referans veya terk sıcaklığı, $^\circ C$
ϕ	gözeneklilik, kesir
ρ_s	kayaç katı kısmının yoğunluğu, kg/m^3
ρ_w	sıcak suyun yoğunluğu, kg/m^3

Denklem 1'den hareketle, jeotermal sahadan yapılacak üretilebilir gücü [3,5,7] ise, aşağıdaki denklemlerden hesaplayabiliriz:

$$PW = \frac{H_t R_F Y}{10^3 L_F t_p} \quad (2)$$

Denklem 2'de yer alan parametreler ve birimleri aşağıda tanımlanmaktadır:

L_F	yük faktörü, kesir
PW	üretilebilir güç, MW
R_F	üretim veya kurtarım faktörü, kesir
Y	dönüşüm verimliliği, kesir
t_p	Proje süresi, saniye

Denklem 2'de yük faktörü L_F , bir yıl temel alınarak doğrudan ısıtma veya elektrik üretimi amaçlı sahanın hangi oranda operasyonda kullanılacağını belirler. Dönüşüm verimliliği Y , jeotermal akışkandan ikinci devre akışkana hangi oranda verimlilikle ısı transferi olacağını belirler. Proje süresi t_p ise, kaç yıl süre ile projenin gerçekleştirileceğini belirler.

Denklem 1 ve 2'den hesaplanacak depolanmış ısı ve üretilebilir güçteki belirsizlik, Denklem 1 ve 2'nin sağ tarafında yer alan (girdi) parametrelerindeki belirsizliklerden, yani bu parametrelere ait yeterince bilgiye sahip olmamızdan, kaynaklanır. Bu nedenle, bu parametrelerdeki belirsizliği hesaplanacak depolanmış ısı ve üretilebilir güce yansıtılmak gerekir.

Bir sonraki bölümde, belirsizliğin nasıl ve hangi yöntemlerle sayısallaştırılabileceğine girmeden önce, belirsizliğin sayısallaştırılmasının tümüyle öznel olduğunu belirtmek gerekir. Bununla temel nedeni, girdi parametrelerine ait değerlerin seçiminin, eldeki mevcut veriye – ki genelde veri yetersizdir ve bu girdi parametrelerin değerleri hakkında nesnel bir sonuca ulaşmaya engel teşkil eder – ve yorumcunun tecrübesine bağımlı olmasıdır. Welsh vd. [11] tarafından da belirtildiği gibi, iki farklı yorumcunun tecrübelerine bağlı olarak aynı girdi parametreleri için iki farklı olasılık yoğunluk fonksiyonunu 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 fonksiyonun belirlenmesi olası değildir.

Bir önceki paragrafta yapılan tartışmaya bağlı olarak, girdi parametreleri için belirli bir tip olasılık yoğunluk fonksiyonu (uniform, normal, log-normal veya üçgensel, vd.) kullanımının tercih edilmesinde ısrarcı olmak için de bir sebep olmadığı söylemek yanlış olmaz. Çünkü izleyen bölümde gösterileceği gibi, Denklem 1 ve 2'deki girdi parametreleri için hangi tip olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılırsa kullanılsın, H_t ve PW 'nin sonuçta elde edilecek olasılık yoğunluk fonksiyonun tipi, Merkezi Sınır Teoremine (kısaca "MST") göre log-normal olmaktadır.

Denklem 1 yardımıyla hesaplanacak H_t için olasılık yoğunluk fonksiyonu (kısaca dağılımını) oluştururken, H_t 'nin toplam sekiz adet girdi rastlantısal değişkeninin – bunlar sırasıyla, A , h , ϕ , c_s , c_w , ρ_s , ρ_w ve $(T-T_r)$ dir – fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır. Denklem 2 yardımıyla PW için dağılımı oluştururken ise, PW 'nin toplam on bir adet girdi rastlantısal değişkeninin – bunlar sırasıyla, H_t için

göz önünde bulunduran sekiz girdi parametresine ek olarak R_F , L_F ve Y dir – fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır. Uygulamalarımızda, terk veya referans sıcaklığı T_r 'yi sabit bir değer olarak, yani bu değer belirsizlik içermediğini kabul etmekteyiz. Ancak Denklem 1'de, $T-T_r$ 'yi, rezervuar sıcaklığı T 'yi rastlantısal değişken olarak ele aldığımızdan, rastlantısal değişken olarak ele almaktayız. Eğer T 'nin ortalaması ve varyansı, sırasıyla μ_T ve σ_T^2 ise, $T-T_r$ değişkeninin, ortalaması ve varyansının, sırasıyla $\mu_T - T_r$ ve σ_T^2 , olacağını göstermek zor değildir. Ayrıca, tüm uygulamalarımızda, Denklem 2'de proje süresi t_p 'de belirsizlik olmadığı kabul edilerek sabit bir değer olarak ele alınmaktadır.

Son olarak, Denklem 1 ve 2'deki girdi parametre çiftlerinin bazıları arasında istatistiksel bir korelasyonun olabileceğini belirtmek istiyoruz. Örneğin, akışkan yoğunluğu ile ρ_w ile rezervuar sıcaklığı T arasında negatif bir korelasyon, kayaç katı kısmı özgül ısısı ile yoğunluğu arasında negatif bir korelasyon ve kayaç katı kısmı özgül ısısı ile rezervuar sıcaklığı arasında pozitif bir korelasyon olasıdır. Ayrıca, Murtha [12] tarafından belirtildiği gibi, çökeltme ortamlarında rezervuar alanı A ile rezervuar kalınlığı h arasında da pozitif bir korelasyon olasıdır. Tüm bu bilgilerle vurgulamak istediğimiz, girdi parametreleri arasında varsa korelasyonu hesaplamalarda yok varsaymanın, H_t ve PW üzerindeki belirsizliği yanlış karakterize etmemize yol açabileceğidir. Eğer eldeki veriler, girdi parametre çiftleri arasında korelasyon olduğunu gösteriyor ise, belirlen korelasyonları, belirsizliğin sayısallaştırılması işlemine dahil etmemiz gereklidir.

3. BELİRSİZLİĞİN SAYISALLAŞTIRILMASI

Bu bölümde, girdi parametrelerindeki belirsizliğin yayılımı sonucunda H_t ve PW 'da oluşacak belirsizliği sayısallaştırılmasında kullanılan MC ve ABY yöntemleri kısaca tanıtılacaktır. MC yöntemine ait detaylar Kalos [13]'ta, ABY yöntemine ait detaylar ise, Coleman ve Steele [14], Zeybek vd. [15] ve Sarak vd. [7]'de bulunabilir.

Bu metotlara ait detaylı bilgileri sunmadan önce, istatistik ve olasılığın temel teoremlerinden bir olan MST üzerinde durmak istiyoruz. MST'ne göre, her biri sonlu ortalama ve varyansa sahip birbirinden bağımsız olan yeterince fazla sayıda rastlantısal değişkenin toplamı normal bir dağılıma yakınsar. Bu sonuç girdi rastlantısal değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarının tipinden bağımsızdır. Dolayısıyla bu teoremin bir sonucu olarak, girdi rastlantısal değişkenlerinin – tipi ne olursa olsun – bölüm ve çarpımdan oluşan rastlantısal fonksiyonların – ki Denklem 1 ve 2 ile tanımlanan yerinde depolanmış ısı ve üretilebilir güç fonksiyonları bu tür fonksiyonlara örnek teşkil eder – olasılık yoğunluk fonksiyonu (veya histogramı) log-normal olacaktır. Bu sonucu matematiksel olarak göstermek için, Denklem 1 ve 2'nin her iki tarafının doğal logaritmasını almak yeterli olacaktır. O halde, Denklem 1 ve 2'nin doğal logaritması alınması sonucunda, sırasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\ln H_t = \ln \left[(1-\phi)c_s\rho_s + \phi c_w\rho_w \right] + \ln A + \ln h + \ln (T - T_r), \quad (3)$$

ve

$$\ln PW = \ln H_t + \ln R_F + \ln Y - \ln L_F - \ln (10^3 t_p). \quad (4)$$

Denklem 3 ve 4, açıkça göstermektedir ki, $\ln H_t$ ve $\ln PW$, tüm bağımsız rastlantısal değişkenlerin, tipleri ne olursa olsun, doğal logaritmalarının toplamı şeklinde yazılabilir. Dolayısıyla da, MST'ye göre $\ln H_t$ ve $\ln PW$ 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonları normal dağılıma yakınsar. $\ln H_t$ ve $\ln PW$, normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip olduğuna göre, H_t ve PW log-normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip olacaktır. MST'nin sonucu, birbirinden istatistiksel olarak bağımsız girdi rastlantısal değişkenleri için geçerli olmakla beraber, ileride verilecek bir uygulamada gösterileceği gibi, girdi rastlantısal değişkenleri arasında korelasyon olduğu durumlarda da, H_t ve PW log-normal dağılıma yakınsamaktadır.

Son olarak, H_t ve PW 'daki belirsizliği sayısal olarak karakterize ederken kullanacağımız istatistiksel ölçütleri vermek istiyoruz. Bu karakterizasyon için, Capen [10]'nin petrol rezervlerindeki belirsizliği karakterize etmek için önerdiği uzlaşımı benimsediğimizi belirtmek istiyoruz. Onun önerdiği uzlaşımına göre, P10'nu kanıtlanmış, P50'yi olası ve P90'nı olanaklı olarak tanımlanmaktadır. Burada P10, P50 ve P90, sırasıyla, birikimli dağılım fonksiyonunun 10., 50. ve 90. yüzdeleri değerlerine karşılık gelen değerleri temsil etmektedir. Bu istatistiksel ölçülerden P10, yatırım kararların verilmesinde en çok dikkate alınan değerdir ve depolanmış ısı ve üretilebilir gücün %90 olasılıkla alacağı en küçük değeri temsil eder.

3.1. Monte Carlo (MC) Yöntemi

MC yönteminde, her bir girdi değişkeni için önceden tipleri belirlenmiş dağılımların istatistiksel olarak örneklenir. Bu örneklerin Denklem 1 ve 2'de kullanılmasıyla, depolanmış ısı ve üretilebilir gücün oluşturduğu olasılık yoğunluk fonksiyonu ve bu fonksiyonun istatistiksel ölçüleri belirlenir. MC yönteminden elde edilen çıktı, girdi rastlantısal değişkenlerinin oluşturduğu fonksiyona (Denklem 1 veya 2'ye) ait histogramdır (matematiksel olarak olasılık yoğunluk fonksiyonudur). Bu histogram elde edildikten sonra, bu histograma ait istatistiksel ölçüleri; ortalama, varyans, P10, P50 ve P90 değerleri, kolayca bilinen formüllerden hesaplanır. MC yöntemi, göz önünde bulundurulmuş fonksiyon, girdi rastlantısal değişkenlerine göre ister doğrusal olsun ister olmasın, kullanılacak en genel örneklem ve belirsizliği sayısallaştırma yöntemidir. Çalışmada verilen MC yöntemi uygulamaları, ticari @RISK yazılımı [16] kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Analitik Belirsizlik Yayılma (ABY) Yöntemi

ABY yöntemi, girdi rastlantısal değişkenlerinin fonksiyonu olarak ifade edilen rastlantısal fonksiyonlarının ortalama ve varyansını tahmin etmede MC yöntemine alternatif, basit bir yaklaşım sunmaktadır. Bildiride göz önünde bulundurulmuş problemde, ABY yöntemi Denklemler 1 ve 2 ile tanımlanan H_t ve PW fonksiyonlarının veya Denklemler 3 ve 4 ile tanımlanan $\ln H_t$ ve $\ln PW$ rastlantısal fonksiyonlarına uygulanabilir.

Yöntemin kullanımı, MC yönteminin tersine, girdi rastlantısal değişkenlerinin dağılım tipinin belirlenmesini gerektirmemektedir. Bir başka deyişle, girdi değişkenlerinin dağılım tipinden bağımsızdır. Sadece her bir girdi rastlantısal değişkeni için ortalama ve varyans (veya standart sapma) ile varsa girdi rastlantısal değişken çiftleri arasındaki eşdeğerlik (veya kovaryans) değerlerinin bilinmesi yeterli olmaktadır [7,8,14,15].

ABY yöntemi, girdi rastlantısal değişkenlerinin doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilen rastlantısal fonksiyonları için ortalama ve varyans için kesin sonuçlar, doğrusal olmayan durumlarda ise, yaklaşık sonuçlar verir. Yöntem, rastlantısal fonksiyonun (H_t , PW , $\ln H_t$ veya $\ln PW$ 'nin) girdi rastlantısal değişkenlerinin ortalama değerleri civarında ve fonksiyonun girdi rastlantısal değişkenlerine göre birinci türevine kadar Taylor serisi açılımını kullanır.

Bildiride ilgilendiğimiz H_t (Denklem 1) ve PW (Denklem 2), aslında girdi rastlantısal değişkenlerine göre doğrusal olmayan rastlantısal fonksiyonlara örnek teşkil eder. Sarak vd. [7], ABY yöntemini üç farklı yaklaşımla depolanmış ısı ve üretilebilir güç fonksiyonlarına uygulamışlardır. *İlk yaklaşımda*, ABY yöntemini H_t ve PW fonksiyonları girdi rastlantısal değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak; *ikinci yaklaşımda*, $\ln H_t$ ve $\ln PW$ fonksiyonları girdi rastlantısal değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak, *üçüncü yaklaşımda* ise, $\ln H_t$ ve $\ln PW$ fonksiyonları girdi rastlantısal değişkenlerinin doğal logaritmasının bir fonksiyonu olarak ele alıp uygulamışlardır. Gerçi her üç yaklaşımda, (MC ile elde edilenlerle kıyaslandığında) oldukça iyi sonuçlar vermekle beraber, Sarak vd. [7], ABY yöntemi eğer H_t ve PW (yaklaşım bir) yerine, $\ln H_t$ (Denklem 3) ve $\ln PW$ (Denklem 4) uygulanırsa (yaklaşım iki ve üç) daha doğru sonuçların elde edildiğini göstermişlerdir. En doğru sonuçların ise, ABY yönteminin yukarıda yaklaşım üçte tanımlandığı şekilde uygulandığında elde edildiğini göstermektedirler [7]. Bunun temel nedeni, $\ln H_t$ ve $\ln PW$ rastlantısal fonksiyonlarının, girdi rastlantısal değişkenlerinin doğal

logaritmalarına göre hemen hemen doğrusal olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, burada sadece yaklaşım üçte tanımlandığı şekilde elde edilen formülasyon ve buna ait sonuçlar sunulacaktır.

ABY yöntemi için yaklaşım üç kullanıldığında, $\ln f$ fonksiyonu (burada $f = H_t$ (Denklem 1) veya PW (Denklem 2) temsil eder) girdi rastlantısal değişkenler $\ln X_i$ 'nin (burada $X_i = A, h, c_w, c_s, \text{vd.}, i = 1, 2, \dots, M$) ortalama değerleri civarında birinci türeve kadar Taylor serisi yaklaşımı uygulanarak aşağıda verildiği şekilde ifade edilir:

$$\ln f(\ln X_1, \ln X_2, \dots, \ln X_M) = f(\mu_{\ln X_1}, \mu_{\ln X_2}, \dots, \mu_{\ln X_M}) + \sum_{i=1}^M (\ln X_i - \mu_{\ln X_i}) \left(\frac{\partial \ln f}{\partial \ln X_i} \right) \Bigg|_{\ln X_i = \mu_{\ln X_i}, i=1, \dots, M} \quad (5)$$

Burada M , girdi rastlantısal değişkeni toplam sayısı temsil etmektedir. Denklem 5 ile tanımlı fonksiyonun ortalaması ve varyansı aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\mu_{\ln f} = f(\mu_{\ln X_1}, \mu_{\ln X_2}, \dots, \mu_{\ln X_M}), \quad (6)$$

ve

$$\sigma_{\ln f}^2 = \sum_{i=1}^M \theta_i^2 \sigma_{\ln X_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \theta_i \theta_j \text{cov}(\ln X_i, \ln X_j), \quad (7)$$

Burada, θ_i , $\ln f$ 'in $\ln X_i$ 'ye kısmi türevlerini (veya kısaca duyarlılık katsayıların) temsil eder:

$$\theta_i = \left(\frac{\partial \ln f}{\partial \ln X_i} \right) \Bigg|_{\ln X_i = \mu_{\ln X_i}, i=1, \dots, M}, \quad (8)$$

ve $\text{cov}(\ln X_i, \ln X_j)$, girdi rastlantısal parametre çiftleri $\ln X_i$ ve $\ln X_j$ arasındaki (varsa) kovaryans değerini temsil etmektedir. İki değişken arasındaki kovaryans, doğrusal korelasyon katsayısı, $\rho_{\ln X_i, \ln X_j}$

$$\text{cov}(\ln X_i, \ln X_j) = \rho_{\ln X_i, \ln X_j} \sigma_{\ln X_i} \sigma_{\ln X_j}, \quad (9)$$

cinsinden de ifade edilebileceğinden, Denklem 7, kovaryans yerine, korelasyon katsayısı $\rho_{\ln X_i, \ln X_j}$ cinsinden aşağıdaki verildiği şekilde de ifade edilebilir:

$$\sigma_{\ln f}^2 = \sum_{i=1}^M \theta_i^2 \sigma_{\ln X_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \theta_i \theta_j \rho_{\ln X_i, \ln X_j} \sigma_{\ln X_i} \sigma_{\ln X_j}. \quad (10)$$

Eğer girdi parametre çiftlerinin arasında korelasyon yok ise, Denklem 7 veya 10'nun sağ tarafındaki ikinci terim sıfır olacaktır ve durumda, Denklem 7 veya 10, aşağıdaki denkleme indirgenecektir:

$$\sigma_{\ln f}^2 = \sum_{i=1}^M \theta_i^2 \sigma_{\ln X_i}^2. \quad (11)$$

ABY yönteminde, her bir girdi rastlantısal değişkeninin toplam varyansa görece katkıları, Denklem 10'nun belirsizlik yüzde katkıları değişkenleri (BYK) cinsinden aşağıda ifade edilebilen denklemi yardımıyla hesaplanabilir:

$$\sum_{i=1}^M BYK_i + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M BYK_{ij} = 1. \quad (12)$$

Burada BYK_i , her bir girdi rastlantısal değişkeninin $\ln f$ 'nin varyansına (kesir olarak) katkısını, BYK_{ij} ise, girdi rastlantısal çiftleri $\ln X_i$ ve $\ln X_j$ arasındaki korelasyonun $\ln f$ 'nin varyansına (kesir olarak) katkısını belirler ve sırasıyla aşağıda verilen denklemlerden hesaplanır:

$$BYK_i = \theta_i^2 \left(\frac{\sigma_{\ln X_i}}{\sigma_{\ln f}} \right)^2, \quad (13)$$

ve

$$BYK_{ij} = 2 \left(\frac{\sigma_{\ln X_i}}{\sigma_{\ln f}} \theta_i \right) \left(\frac{\sigma_{\ln X_j}}{\sigma_{\ln f}} \theta_j \right) \rho_{\ln X_i, \ln X_j}. \quad (14)$$

Denklem 13 ve 14'den dikkat edilecek olursa, BYK_i her zaman pozitifdir, ancak BYK_{ij} duyarlılık katsayısı θ_i ve korelasyon katsayısı $\rho_{\ln X_i, \ln X_j}$ - ki değişkenler negatif değerler alabilirler - işaretine bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Bu nedenle, korelasyon olması durumunda, korelasyonun her zaman $\ln f$ 'nin veya f 'nin belirsizliğini (varyansını) artıracaklarını söylemek doğru değildir. Korelasyon, teorik olarak varyansı azaltabilir de.

Denklem 8 ve 12'den $\ln H_t$ ve $\ln PW$ fonksiyonları için hesap yaparken gerekli olan duyarlılık katsayılarına (θ) ait formüller Tablo 1'de $\ln H_t$, Tablo 2'de $\ln PW$ için sunulmaktadır.

Tablo 1. $\ln H_t$ 'nin Girdi Rastlantısal Değişken X_i 'nin Doğal Logaritmasına Göre Duyarlılık Katsayısı Veya Türevi.

Değişken X_i	$\theta_i = \partial \ln H_t / \partial \ln X_i$
ϕ	$\frac{\mu_\phi (-\mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_{c_w} \mu_{\rho_w})}{[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}]}$
c_s	$\frac{\mu_{c_s} (1 - \mu_\phi) \mu_{\rho_s}}{[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}]}$
ρ_s	$\frac{\mu_{\rho_s} (1 - \mu_\phi) \mu_{c_s}}{[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}]}$
c_w	$\frac{\mu_{c_w} \mu_\phi \mu_{\rho_w}}{[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}]}$
ρ_w	$\frac{\mu_{\rho_w} \mu_\phi \mu_{c_w}}{[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}]}$
A	1
h	1
$T - T_r$	1

Tablo 2. $\ln PW$ 'nin Girdi Rastlantısal Değişkeni X_i 'nin Doğal Logaritmasına Göre Duyarlılık Katsayısı Veya Türevi.

Değişken X_i	$\theta_i = \partial \ln PW / \partial \ln X_i$
ϕ	$\frac{\mu_\phi (-\mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_{c_w} \mu_{\rho_w})}{\left[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w} \right]}$
c_s	$\frac{\mu_{c_s} (1 - \mu_\phi) \mu_{\rho_s}}{\left[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w} \right]}$
ρ_s	$\frac{\mu_{\rho_s} (1 - \mu_\phi) \mu_{c_s}}{\left[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w} \right]}$
c_w	$\frac{\mu_{c_w} \mu_\phi \mu_{\rho_w}}{\left[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w} \right]}$
ρ_w	$\frac{\mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w}}{\left[(1 - \mu_\phi) \mu_{c_s} \mu_{\rho_s} + \mu_\phi \mu_{c_w} \mu_{\rho_w} \right]}$
A	1
h	1
$T - T_r$	1
R_F	1
Y	1
L_F	1

Uygulamalara geçmeden önce, birkaç önemli noktaya değinmek gerekmektedir. Bu bölümde sunulan ABY formülasyonu, Denklem 3 ve 4 için geçerli olduğundan ve girdi rastlantısal değişkenlerinin doğal logaritması cinsinden sunulduğundan, girdi rastlantısal değişkenlerinin doğal logaritması alınarak oluşturulacak olasılık yoğunluk fonksiyonlarına ait ortalama ($\mu_{\ln X_i}$) ve varyans ($\sigma_{\ln X_i}^2$) değerlerinin hesaplanmasını gerekli kılar. Girdi rastlantısal çiftleri arasında korelasyon olduğu durumda ise, korelasyon katsayısı $\rho_{\ln X_i, \ln X_j}$ değerinin hesaplanması gerekir. Eğer girdi rastlantısal değişkeni X_i log-normal bir dağılım olarak seçilmiş ise, bu dağılım için belirlenmiş ortalama μ_{X_i} ve varyans $\sigma_{X_i}^2$ değerleri aşağıdaki denklemlerde kullanılarak $\mu_{\ln X_i}$ ve $\sigma_{\ln X_i}^2$ değerleri hesaplanabilir:

$$\mu_{\ln X_i} = \ln \mu_{X_i} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_{X_i}^2}{\mu_{X_i}^2} \right), \quad (15)$$

ve

$$\sigma_{\ln X_i}^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_{X_i}^2}{\mu_{X_i}^2} \right). \quad (16)$$

Eğer X_i için seçilen dağılım log-normal değil ise, bu da sorun değildir ve X_i için belirlenmiş dağılım, ortalama ve varyans değerleri kullanılarak, örnekleme ile bu değişkenin doğal logaritmasına ait olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait ($\mu_{\ln X_i}$) ve varyans ($\sigma_{\ln X_i}^2$) değerleri hesaplanabilir. X_i ve X_j arasındaki

korelasyon katsayısı ile $\ln X_i$ ve $\ln X_j$ arasındaki korelasyon katsayısına eşittir; yani, $\rho_{\ln X_i, \ln X_j} = \rho_{X_i, X_j}$. Dolayısıyla, girdi parametre çiftleri arasında korelasyon olduğu durumlarda $\rho_{\ln X_i, \ln X_j}$ değeri yerine ρ_{X_i, X_j} kullanılır.

Son olarak, ABY yöntemi kullanıldığında H_t veya PW 'ya ait belirsizlik markerlerini – ki bunlar, P10, P50 ve P90 istatistiksel ölçüleridir – nasıl hesaplanacağı üzerinde duracağız. Daha önce bu bölümün başında değinildiği gibi, MST'ye göre, H_t ve PW 'ya ait dağılım log-normal (veya başka ifade ile $\ln H_t$ ve $\ln PW$ 'ya ait dağılım normal olacağından), H_t ve PW 'ya ait P10, P90 ve P50 istatistiksel ölçüleri kolayca aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır [7]:

$$P_{10} = \exp(\mu_{\ln f} - 1.28\sigma_{\ln f}), \quad (17)$$

$$P_{90} = \exp[\mu_{\ln f} + 1.28\sigma_{\ln f}], \quad (18)$$

ve

$$P_{50} = \sqrt{P_{10}P_{90}}. \quad (19)$$

Denklemler 16-17'de $f = H_t$ veya PW 'yu temsil eder ve ortalama $\mu_{\ln f}$ ve varyans $\sigma_{\ln f}^2$ değerleri, sırasıyla Denklem 6 ve Denklem 7 (veya 10)'dan hesaplanır. Gerekli olmamakla beraber, istenirse, f 'ye ait ortalama μ_f ve varyans σ_f^2 değerleri, ABY yöntemiyle hesaplanan ortalama $\mu_{\ln f}$ ve varyans $\sigma_{\ln f}^2$ değerleri, aşağıdaki denklemlerde kullanılarak hesaplanabilir [7]:

$$\mu_f = \exp\left(\mu_{\ln f} + \frac{\sigma_{\ln f}^2}{2}\right). \quad (20)$$

ve

$$\sigma_f^2 = \exp(2\mu_{\ln f} + \sigma_{\ln f}^2) \left[\exp(\sigma_{\ln f}^2) - 1 \right]. \quad (21)$$

4. UYGULAMALAR

Bu bölümde bazı saha ve sentetik veriler ile bildiride sunulan yöntemleri kullanımını ve sonuçlarının doğrulamasına yönelik uygulamalar sunulmaktadır.

4.1. Korelasyonsuz Durum

Bu uygulamada, girdi rastlantısal değişkenleri arasında korelasyon olmadığı durum göz önünde bulundurulmaktadır. Bu örnekte, keyfi olarak her bir girdi rastlantısal değişkenine ait olasılık yoğunluk fonksiyonun üçgensel olduğu kabul edilmiştir ve her girdi değişkenine ait parametreler (min, maks, mode, vb) Tablo 3'de sunulmuştur. Burada min, minimum; maks, maksimum değeri; mode ise doruk veya tepe değeri veya bir sıklık dağılımında en çok yinelenen değeri temsil eder. Tablo 3'de verilen veriler, Satman vd. [17] tarafından İzmir Balçova-Narlıdere jeotermal sistemi için hazırlanan rapordan alınmıştır. Tablo 3'de verilen ortalama ve varyans değerleri, üçgensel dağılımlar için verilen ve bilinen formüllerden hesaplanmıştır:

$$\mu_{X_i} = \frac{Min + Maks + Mode}{3}, \quad (22)$$

ve

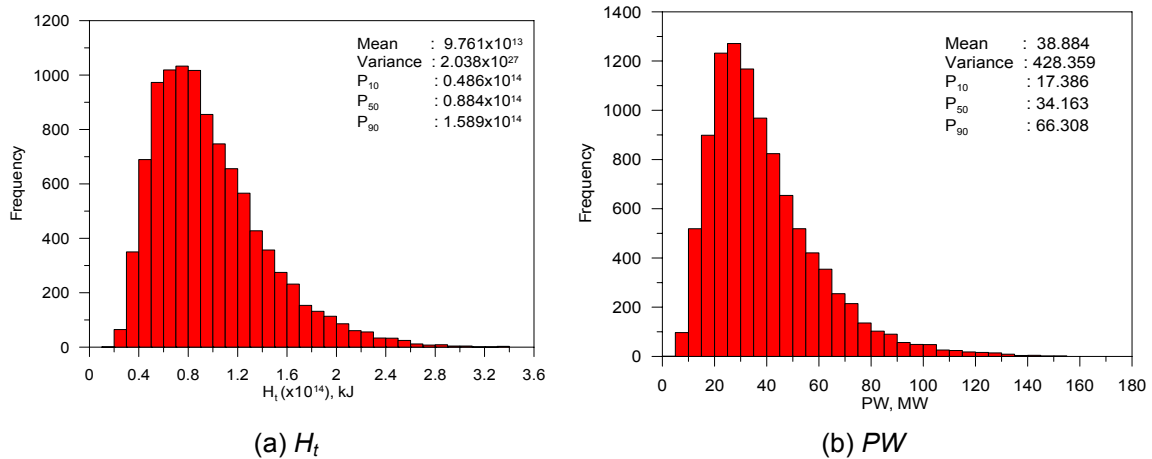
$$\sigma_{X_i}^2 = \frac{(Min)^2 + (Maks)^2 + (Mode)^2}{18} - \frac{(Min \times Maks + Min \times Mode + Maks \times Mode)}{18}. \quad (23)$$

Tablo 3. Girdi Rastlantısal Değişkenlerine Ait Üçgensel Dağılım Parametreleri.

Değişken X_i	Min	Mode	Maks	Ortalama μ_{X_i}	Varyans $\sigma_{X_i}^2$	Ortalama $\mu_{\ln X_i}$	Varyans $\sigma_{\ln X_i}^2$
ϕ	0.02	0.05	0.1	0.057	2.722×10^{-4}	-2.919	9.324×10^{-2}
c_s , kJ/(kg °C)	0.75	0.9	1.0	0.883	2.639×10^{-3}	-0.127	3.437×10^{-3}
ρ_s , kg/m ³	2550	2650	2750	2650	1.667×10^3	7.882	2.382×10^{-4}
c_w , kJ/(kg °C)	4.00	4.18	4.21	4.130	2.150×10^{-3}	1.418	1.261×10^{-4}
ρ_w , kg/m ³	922	931	987	946.7	2.067×10^2	6.853	2.264×10^{-4}
A, m ²	5×10^5	9×10^5	2×10^6	1.1×10^6	1.006×10^{11}	13.896	8.104×10^{-2}
h_i , m	250	350	1000	533.3	2.764×10^4	6.236	9.630×10^{-2}
$T - T_r$, °C	40	75	85	66.67	9.306×10^1	4.200	2.296×10^{-2}
R_F	0.07	0.18	0.24	0.163	1.239×10^{-3}	-1.837	5.487×10^{-2}
Y	0.7	0.85	0.9	0.817	1.806×10^{-3}	-0.204	2.854×10^{-3}
L_F	0.35	0.41	0.5	0.42	9.500×10^{-4}	-0.871	5.314×10^{-3}
t_p , s.	8×10^8	8×10^8	8×10^8	8×10^8	0.0	20.5	0.0

Tablo 3'ün son iki satırında verilen girdi rastlantısal değişkenin doğal logaritması alınarak elde edilmiş ve ABY yönteminde kullanılacak ortalama ve varyans değerlerini temsil etmektedir.

Şekil 1a ve 1b'de, sırasıyla, MC yöntemi kullanılarak yerinde depolanmış ısı H_i ve üretilebilir güç PW 'ya ait histogramlar gösterilmektedir. Bu şekillerden görüleceği gibi hem H_i hem de PW 'ya ait histogram log-normaldir. Bu da, MST'den beklenen bir sonuçtur. Şekiller içerisinde MC yönteminden hesaplanan ortalama (mean), varyans (variance), P10, P50 ve P90 istatistiksel ölçüleri de ayrıca kaydedilmiştir.



Şekil 1. MC Yöntemi İle Oluşturulmuş (a) H_i 'ye ve (b) PW 'ya Ait Histogramlar; Korelasyonsuz Durum.

Tablo 4 ve 5'de MC ve ABY yöntemlerinden H_t ve PW için hesaplanan istatistiksel ölçüler verilmekte ve kıyaslanmaktadır. Bu tablolardan görüleceği gibi, MC ve ABY yöntemlerinden elde edilen değerler arasındaki uyum çok iyidir.

Tablo 4. MC ve PW için MC ve ABY Yöntemlerinden Hesaplanan Ortalama ve Varyans Değerlerinin Kıyaslaması.

	Ortalama		Varyans	
	MC	ABY	MC	ABY
H_t , kJ	9.76×10^{13}	9.76×10^{13}	2.04×10^{27}	2.16×10^{27}
PW , MW	38.9	39.1	428.4	468.8

Tablo 5. MC ve PW için MC ve ABY Yöntemlerinden Hesaplanan P10, P50 ve P90 Değerlerinin Kıyaslanması.

	P_{10}		P_{50}		P_{90}	
	MC	ABY	MC	ABY	MC	ABY
$H_t \times 10^{13}$, kJ	4.86	4.78	8.84	8.72	15.9	15.9
PW , MW	17.4	17.6	34.2	34.2	66.3	66.3

Daha öncede değinildiği gibi, ABY yönteminin faydalı yönlerinden biri de, hangi girdi parametrelerinin H_t veya PW üzerindeki toplam belirsizliği daha çok etkilediğinin belirlenmesine olanak vermesidir. Tablo 6'da ABY yönteminden her girdi parametresinin, PW üzerindeki toplam belirsizliğe (varyansa) katkısını görel olarak ölçen BYK_i değerleri sunulmaktadır. Bu tablodaki BYK_i değerlerinden görüldüğü gibi, PW üzerindeki toplam belirsizliğe en çok katkı yapan girdi parametreleri, sırasıyla, rezervuar kalınlığı, h , rezervuar alanı, A , üretim veya kurtarım faktörü, R_F ve rezervuar sıcaklığı, $T-T_r$ 'dir. Rezervuar kalınlığı, h , toplam belirsizliğe %36, rezervuar sıcaklığı %8.6 yapmaktadır. Toplam belirsizlik üzerinde en az etkili olan girdi parametresi ise, %0.0007 katkı ile suyun özgül ısı kapasitesi c_w 'dir. Tablo 6'da, toplam belirsizliğe katkı yapan parametrelerin belirlenmesinde, girdi parametrelerine ait değişkenlik katsayısı (veya görel belirsizlik) DK_i veya boyutsuz duyarlılık katsayısı BDK_i değerlerine bakmanın yeterli olmadığı göstermek için bu değerlerde Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da mutlak değerleri alınarak verilmiş DK_i ve BDK_i değerleri aşağıda verilen formüllerden hesaplanmıştır:

$$DK_i = \frac{\sigma_{\ln X_i}}{\mu_{\ln X_i}}, \quad (24)$$

ve

$$BDK_i = \frac{\mu_{\ln X_i}}{\mu_{\ln f}} \frac{\partial \ln f}{\partial \ln X_i}. \quad (25)$$

Tablo 6'dan görüleceği gibi, en yüksek değişkenlik katsayısı değerine (0.262) sahip girdi parametresi dönüşüm verimliliği Y olmasına rağmen, bu parametrenin PW 'nin toplam belirsizliği üzerine katkısı ancak %1.0 civarındadır. Buna karşın, değişkenlik katsayısı bundan yaklaşık beş kat daha küçük olan rezervuar kalınlığı h 'nin ise, belirsizliğe katkısı %36'dır. Aslında, belirsizlik üzerinde en etkili olan parametreler, DK_i ve BDK_i değerleri çarpımı (bu çarpımlar Tablo 6'da 4. kolonda verilmektedir) en büyük değerlere sahip olan parametrelerdir ki bu çarpımlarda BYK_i değerlerine yansır.

Tablo 6. *PW* için Girdi Parametrelerine Ait DK_i , BDK_i ve BYK_i Değerleri.

Değişken X_i	$ DK_i $	$ BDK_i $	$ DK_i \times BDK_i $	BYK_i
ϕ	0.105	3.0×10^{-2}	3.2×10^{-3}	4.8×10^{-4}
c_s , kJ/(kg °C)	0.462	3.3×10^{-2}	1.5×10^{-2}	1.1×10^{-2}
ρ_s , kg/m ³	0.002	2.0×10^0	4.1×10^{-3}	7.5×10^{-4}
c_w , kJ/(kg °C)	0.008	3.7×10^{-2}	3.0×10^{-4}	4.0×10^{-6}
ρ_w , kg/m ³	0.002	1.8×10^{-1}	3.9×10^{-4}	7.0×10^{-6}
A , m ²	0.021	3.9×10^0	8.1×10^{-2}	3.0×10^{-1}
h , m	0.050	1.8×10^0	8.8×10^{-2}	3.6×10^{-1}
$T-T_r$, °C	0.036	1.2×10^0	4.3×10^{-2}	8.6×10^{-2}
R_F	0.128	5.2×10^{-1}	6.7×10^{-2}	2.1×10^{-1}
Y	0.262	5.8×10^{-2}	1.5×10^{-2}	1.1×10^{-2}
L_F	0.084	2.5×10^{-1}	2.1×10^{-2}	2.0×10^{-2}

4.2. Korelasyonlu Durum

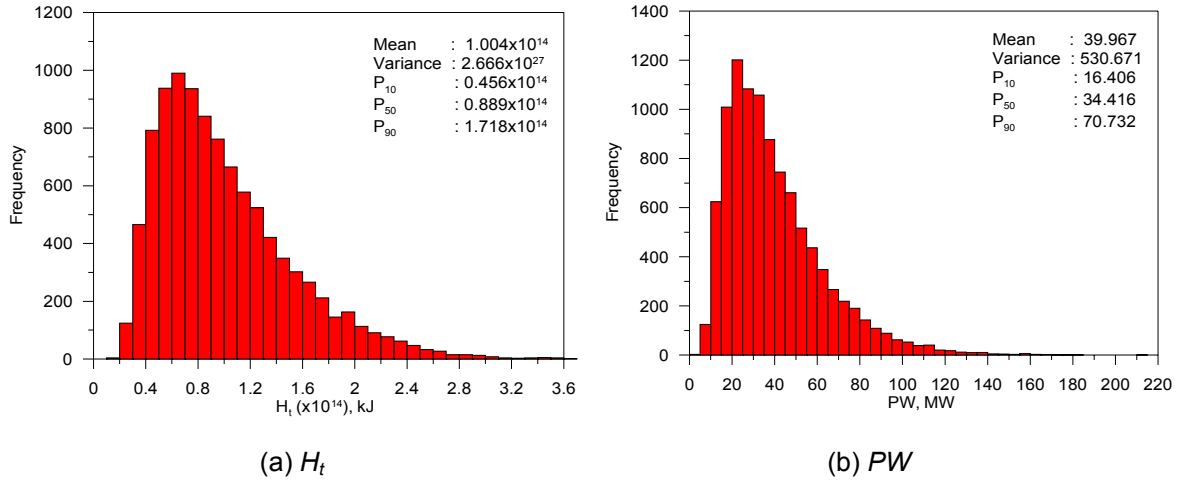
Bu uygulamada da, Tablo 3'de verilen girdi değişkenleri için aynı üçgensel dağılım ve parametre değerleri kullanılmakta, ancak burada farklı olarak Tablo 7'de verilen altı girdi çifti arasında korelasyon olduğu varsayılmaktadır.

Tablo 7. Korelasyonlu Girdi Çiftleri ve Korelasyon Katsayısı Değerleri.

Korelasyonlu girdi çiftleri (X_i, X_j)	Korelasyon Katsayısı ρ_{X_i, X_j}
$(c_s, T-T_r)$	+0.63
(c_s, ρ_s)	-0.44
$(\rho_w, T-T_r)$	-0.62
(c_w, ρ_w)	-0.42
(A, h)	+0.24

Şekil 2a ve 2b'de, sırasıyla, MC yöntemi kullanılarak yerinde depolanmış ısı H_t ve üretilebilir güç PW ya ait histogramlar gösterilmektedir. Bu şekillerden görüleceği korelasyon olması durumunda da, hem H_t hem de PW ya ait histogram log-normaldir. Şekiller içerisinde MC yönteminden hesaplanan ortalama (mean), varyans (variance), P10, P50 ve P90 istatistiksel ölçüleri de ayrıca kaydedilmiştir.

Tablo 8 ve 9'da MC ve ABY yöntemlerinden H_t ve PW için hesaplanan istatistiksel ölçüler verilmekte ve kıyaslanmaktadır. Bu tablolardan görüleceği gibi, MC ve ABY yöntemlerinden elde edilen değerler arasındaki uyum korelasyon olması durumunda da çok iyidir.



Şekil 2. MC Yöntemi İle Oluşturulmuş (a) H_t 'ye ve (b) PW 'ya Ait Histogramlar; Korelasyonlu Durum.

Tablo 8. MC ve PW için MC ve ABY Yöntemlerinden Hesaplanan Ortalama ve Varyans Değerlerinin Kıyaslaması; Korelasyonlu Durum.

	Ortalama		Varyans	
	MC	ABY	MC	ABY
H_t , kJ	1.00×10^{14}	1.01×10^{13}	2.67×10^{27}	2.96×10^{27}
PW , MW	39.9	40.2	530.7	605.5

Tablo 9. MC ve PW için MC ve ABY Yöntemlerinden Hesaplanan P10, P50 ve P90 Değerlerinin Kıyaslanması, Korelasyonlu Durum.

	P_{10}		P_{50}		P_{90}	
	MC	ABY	MC	ABY	MC	ABY
$H_t \times 10^{13}$, kJ	4.56	4.65	8.89	8.87	17.2	16.9
PW , MW	16.4	16.7	34.4	34.3	70.7	70.6

Şekil 1 ve 2, Tablo 4, 5, 8 ve 9'da sonuçlar incelendiğinde, korelasyon durumunda, ortalama değerler korelasyonsuz duruma göre fazla farklılık göstermemekle beraber, varyansın korelasyonsuz duruma göre yaklaşık olarak %30 daha büyüdüğünü söyleyebiliriz.

Tablo 10'da ABY yönteminden her girdi parametresinin, PW üzerindeki toplam belirsizliğe (varyansa) katkısını görece olarak ölçen BYK_i (Denklem 13) ve BYK_j (Denklem 14) değerleri sunulmaktadır. Bu tablo gösterildiği gibi, korelasyonlu parametre çiftlerinin toplam belirsizliğe katkısı %16 civarında iken girdi parametresinin bireysel olarak toplam belirsizliğe katkısı %86'dır. Bu tablodaki BYK_i değerlerinden görüldüğü gibi, PW üzerindeki toplam belirsizliğe en çok katkı yapan girdi parametreleri, sırasıyla, rezervuar kalınlığı, h , rezervuar alanı, A , üretim veya kurtarım faktörü, R_F ve rezervuar sıcaklığı, $T-T_r$ 'dir. En fazla belirsizliği artıran korelasyonlu parametre çifti ise, rezervuar alanı-kalınlık arasındadır (yaklaşık %13). Dikkat edilecek olursa, (c_s, ρ_s) , $(\rho_w, T-T_r)$ ve (c_w, ρ_w) girdi çiftleri arasındaki korelasyonlar negatif işaretli olduğundan, bu çiftler arasındaki korelasyonlar PW üzerinde belirsizliği azaltıcı yönde etki etmektedirler.

Tablo 10. Korelasyonlu Durum İçin ABY Yönteminden Hesaplanan BYK_i ve BYK_{ij} Değerleri.

Değişken X_i	BYK_i	BYK_{ij}
ϕ	4.0×10^{-4}	-
$c_s, \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$	9.1×10^{-3}	-
$\rho_s, \text{ kg/m}^3$	6.3×10^{-4}	-
$c_w, \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$	3.3×10^{-6}	-
$\rho_w, \text{ kg/m}^3$	6.6×10^{-6}	-
$A, \text{ m}^2$	2.6×10^{-1}	-
$h, \text{ m}$	3.0×10^{-1}	-
$T-T_r, ^\circ\text{C}$	7.3×10^{-2}	-
R_F	1.7×10^{-1}	-
Y	8.8×10^{-3}	-
L_F	1.7×10^{-2}	-
BYK_i Toplamı	0.84	
Korelasyonlu çiftler, (X_i, X_j)		
$(c_s, T-T_r)$	-	3.3×10^{-2}
(c_s, ρ_s)	-	-2.1×10^{-3}
$(\rho_w, T-T_r)$	-	-8.2×10^{-4}
(c_w, ρ_w)	-	-3.8×10^{-6}
(A, h)	-	1.3×10^{-1}
BYK_{ij} Toplamı	-	0.16
$BYK_i + BYK_{ij}$ Toplamı	1.00	

4.3. Kavramsal Yanlılık Durum

Tversky ve Kahneman [18], Capen [9] ve Welsh vd. [11,19] tarafından yapılan çalışmalar, insanların kavramsal yanlılığının, belirsizlik koşulları altında alınan kararları önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Kavramsal yanlılık, optimal yöntemler ile insan sezgisine dayalı olarak alınan kararları arasındaki farklılıktan ortaya çıkmaktadır. Kavramsal yanlılığın üç farklı durumu vardır. Bunlar kendine aşırı güven ("overconfidence"), sağlamcılık ("anchoring") ve sadece hatırlanabilir olanlara rağbet ("availability") etmedir. Bu çalışmada, sadece aşırı güvenin neden olduğu kavramsal yanlılık ve modellenmesi üzerinde durulacak, bu tür yanlılığın hacimsel yöntemden hesaplanan H_t ve PW 'daki

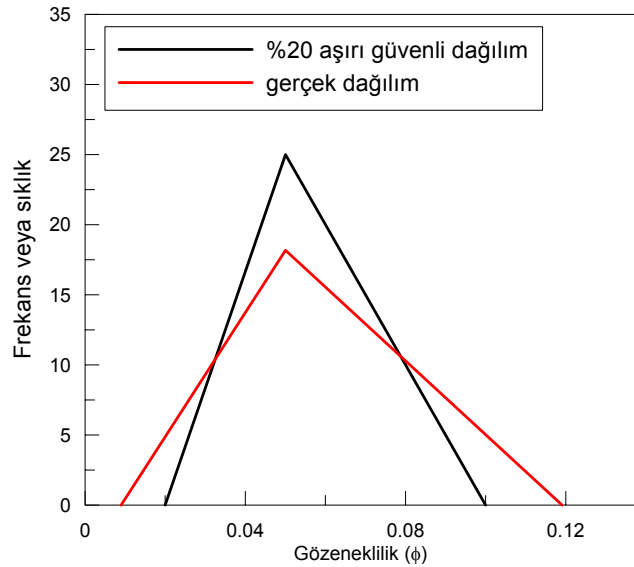
belirsizliğe nasıl yansıdığı incelenecektir. Diğer yanlılık türlerine ait bilgi ve modelleme detayları Welsh vd. [19] bulunabilir.

Aşırı güven, genelde insanların girdi parametrelerine ait belirsizlik için daha dar bir aralık kullanma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, insanlar parametrelerin gerçekte sahip olduğu belirsizliği, eksik tahmin etme eğilimindedirler [9, 11, 19].

Bu çalışmada aşırı güvenden dolayı ortaya çıkan kavramsal yanlılığın, hacimsel yöntemle tahmin edilecek H_i veya PW üzerindeki belirsizliğe nasıl yansıyacağını incelemek için, Welsh vd. [19] önerdiği modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Farz edelim ki, Tablo 3'de tanımlanan her bir girdi değişkenine ait olasılık yoğunluk dağılımı ve sınırları, %20 aşırı güven sonucunda oluşturulmuş bir model ait olsun.

O halde, girdi parametrelerine ait bilinmeyen gerçek belirsizliği içeren girdi parametrelerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonu şöyle oluşturulabilir. Tablo 3'de verilen her bir girdi değişkenine ait birikimli dağılım fonksiyonunun 10. ve 90. yüzdelerinde değerleri, girdi değişkenlerinin tepe (mode) ve ortalama değerleri Tablo 3'de verilen değerlerinde tutularak, fakat minimum ve maksimum değerleri gerçek belirsizliği içerecek şekilde (girdi parametrelerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonunun 20. ve 80. yüzdelerinde değerlerine eşit oluncaya kadar) değiştirilir. Bu şekilde her bir girdi parametresi için oluşturulan olasılık yoğunluk fonksiyonu ancak bilinmeyen gerçek durumdaki girdi parametresine ait olasılık yoğunluk fonksiyonu temsil eder. Bu bir anlamda, her girdi parametresinin Tablo 3'de verilen varyansını artırmaya eşdeğerdir.

Şekil 3'de yukarıda açıklanan modelleme yaklaşımıyla, girdi parametresi gözeneklilik (ϕ) için oluşturulan "gerçek" durumuna ait üçgensel dağılımı, Tablo 3'de %20 aşırı güven ile oluşturulduğu varsayılan üçgensel dağılımı ile kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. %20 aşırı güvenli gözeneklilik üçgensel dağılımının varyansı 2.722×10^{-4} iken, gerçek gözeneklilik üçgensel dağılımının varyansı 5.161×10^{-4} tür; yani gerçek dağılımın varyansı %20 aşırı güvenli dağılım yaklaşık iki katı daha büyüktür.



Şekil 3. %20 Aşırı Güvenle Gözeneklilik İçin Oluşturulan Üçgensel Dağılımın, Gerçek Üçgensel Dağılımı İle Kıyaslaması.

Tablo 3'de diğer girdi değişkenleri için, gözeneklilik için yapılan aynı işlem tekrarlanarak, bu girdi değişkenlerine ait gerçek üçgensel dağılımları oluşturulmuştur. Daha sonra her girdi değişkeni PW için verilen hacimsel yöntem denkleminde ABY yöntemi uygulanarak %20 aşırı güvenli ve gerçek duruma ait girdi değişkenleri ile PW 'daki belirsizlik hesaplanmıştır. Bu uygulamada girdi değişkenleri arasında hiçbir korelasyon olmadığı varsayılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, kıyaslamalı olarak Tablo 11'de sunulmuştur. Beklenildiği gibi, her iki model içinde ortalama değerler aynı elde edilirken, belirsizlik markerleri olan; varyans, P10, P50 ve P90 her

iki model için oldukça farklıdır. Beklenildiği gibi, %20 aşırı güvenli model, PW 'nin gerçekte olması gereken varyansını yaklaşık iki kat daha küçük tahmin edilmesine neden olmuştur. Bu sonuç, mümkün olduğunca, aşırı güvenden kaçınılması gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 11. %20 Aşırı Güvenli ve “Gerçek” Durum İçin PW 'ya ait ABY Yöntemi İle Hesaplanan Ortalama, Varyans, P10, P50 ve P90 Değerlerinin Kıyaslaması.

	μ_{PW}	σ_{PW}^2	P_{10}	P_{50}	P_{90}
20% aşırı güvenli durum	39.1	468.8	17.6	34.2	66.3
Gerçek durum	39.1	929.4	10.7	29.4	78.2

4.4. Kuyu (veya Saha) Rezervleri Değerlerinden Saha (veya Ülke) Rezervlerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, MC veya bu çalışmada tanıtılan ABY yöntemi kullanılarak, verilen bir jeotermal sahadaki (veya bir ülkedeki) her bir kuyu (veya saha) için hesaplanmış depolanmış ısı veya üretilebilir güç tahminlerine ait belirsizlik markerlerinden o saha veya ülke geneli için belirsizlik markerlerini nasıl belirleneceği üzerinde durulacaktır.

Bu işin nasıl yapılması gerektiğini göstermek için, 10 adet jeotermal sahası olan hipotetik bir ülke düşünülmüştür. Bu ülkenin birbirinden bağımsız 10 ayrı jeotermal sahası için MC veya ABY yöntemi kullanılarak Denklem 2'den üretilebilir güçlerine (PW 'ya) ait Tablo 12'de verilen ortalama, varyans, P10, P50 ve P90 değerleri hesaplanmış olsun. (Burada önemli bir hatırlatma olarak, her sahaya ait PW 'nin log-normal dağılımlı olacağını belirtmek isteriz.) O halde, cevaplamamız istenecek soru şudur: Bu ülke için üretilebilir güne ait ortalama, varyans, P10, P50 ve P90 değerleri nedir?

Tablo 12. Hipotetik Bir Ülkedeki Birbirinden Bağımsız 10 Ayrı Jeotermal Sahanın Üretilebilir Gücüne Ait Ortalama, Varyans, P10, P50 ve P90 Değerleri.

	μ_{PW} MW	σ_{PW}^2 MW ²	P_{10} MW	P_{50} MW	P_{90} MW
Saha 1	856.2	8.07×10^4	538.1	813.2	1224.8
Saha 2	408.0	2.57×10^4	234.4	377.0	618.0
Saha 3	96.59	1.07×10^3	60.10	91.45	138.4
Saha 4	50.25	7.17×10^2	23.93	44.22	84.07
Saha 5	49.41	5.57×10^2	24.55	44.74	79.62
Saha 6	41.54	5.36×10^2	18.57	36.28	70.69
Saha 7	40.39	5.29×10^2	17.65	34.83	69.41
Saha 8	26.37	2.02×10^2	12.26	53.19	44.03
Saha 9	26.36	2.62×10^2	10.75	22.31	46.58
Saha10	17.04	1.47×10^2	6.10	13.88	31.59
Toplam	1612.15	110420	946.4	1531.1	2407.2

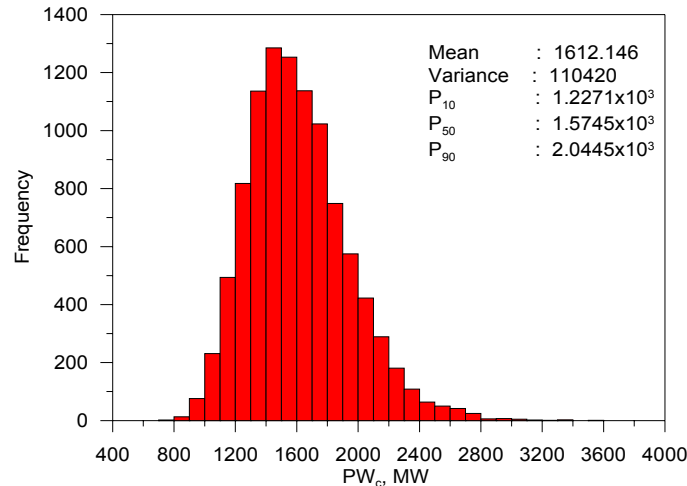
Eğer her bir sahaya ait gücü PW_j , $j = 1, 2, \dots, 10$, olarak gösterirsek, bu ülkeye ait toplam üretilebilir gücünü (PW_C ile gösterelim) aşağıdaki denklemden istatistiksel olarak hesaplamamız gerekir:

$$PW_C = \sum_{j=1}^{10} PW_j . \quad (26)$$

Her saha birbirinden istatistiksel olarak bağımsız düşünülendiğinden, ülkeye ait PW_C 'nin ortalama ve varyans değeri, her bir sahanın bireysel PW_j 'lerine ait ortalama ve varyans değerlerinin toplamına eşit olacaktır. Ülkenin PW_C 'sine ait ortalama ve varyans değerleri, Tablo 12'nin 2. ve 3. kolonlarının son satırında verilmiştir $\mu_{PW_C} = 1612.15$ MW ve $\sigma_{PW_C}^2 = 110,420$ MW² (or $\sigma_{PW_C} = 332.295$ MW). Bu demektir ki, ülke geneli PW 'suna ait ortalama ve varyans değerleri, sahaların bireysel ortalama ve varyans değerlerinin toplanmasıyla hesaplanabilir. Ancak, birazdan gösterileceği gibi, bu basit toplama işlemiyle, ülke geneli PW 'suna ait P10, P50 ve P90 belirsizlik markerleri değerleri doğru olarak belirlenemez. Basit toplama işlemiyle hesaplanan bu markerlere ait değerler, Tablo 12'nin 4., 5. ve 6. sütunlarının son satırlarında (ve ayrıca Tablo 13'de) verilmiştir.

Merkezi sınır teoremine göre, Denklem 26 yardımıyla, PW_C için oluşturulan dağılımın normal dağılıma yakınsamasını bekleriz. Ancak Capen [10] ve Sarak vd. [7] gösterildiği gibi, toplam işlemde genelde MST, normale oldukça yavaş yakınsamakta ve toplama sonucunda elde edilen dağılım normalden daha çok log-normal dağılıma yakınsamaktadır.

Bunu kanıtlamak için, Her bir sahaya ait Tablo 12'de verilen ortalama ve varyans değerleri kullanılarak log-normal dağılımdan çekilen PW_j , $j=1, 2, \dots, 10$, değerleri Denklem 26'da kullanılarak MC yöntemiyle örnekleme yapılmıştır. PW_C için sonuçta elde edilen dağılım Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekil içerisinde, MC yönteminden elde edilen ortalama, varyans, P10, P50 ve P90 değerleri de gösterilmektedir.



Şekil 4. Denklem 26 İle Tanımlanan PW_C 'nin MC Yöntemi Kullanılarak Oluşturulan Histogramı.

Şekil 4'den görüleceği gibi, PW_C 'nin histogramı normalden daha çok log-normal dağılıma yakındır. O halde, ülke geneli PW_C 'si log-normal dağılımlı olduğu, ortalaması ($\mu_{PW_C} = 1612.15$ MW) ve varyansı/ standart sapması ($\sigma_{PW_C}^2 = 110,420$ MW² (or $\sigma_{PW_C} = 332.295$ MW)) bilindiğine göre, P10, P50 ve P90 belirsizlik markerleri, Denklem 16-18'den kolayca hesaplanabilir. Bu değerlerde Tablo 13'de, basit toplama işlemi ile hesaplanan değerler ile kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. Tablo 13'den görüldüğü gibi, MC ve log-normal dağılım varsayımı ile istatistiksel toplama işlemi ile elde edilen P10, P50 ve P90 değerleri, beklenildiği gibi birbirlerine çok yakındır. Ancak, basit toplama işlemi ile hesaplanan P10, P50 ve P90 değerleri – ki bunları ülke geneli PW_C 'sinin birikimli dağılımına ait 10. (P10), 50. (P50) ve 90. (P90) yüzdelik değerleri olarak nitelenmek doğru değildir – istatistiksel toplama ile elde

edilen doğru P10, P50 ve P90 değerlerinden oldukça farklıdır. Bu istatistiksel markerlerden en önemlisi olan P10 için basit toplama işlemi ile elde edilen değer doğru istatistiksel toplama işlemi ile elde edilen P10 değerinden, 1.3 katı kadar daha küçüktür. Yani, basit toplama işlemi ile ülke geneli PW_C 'si için olması gereken P10 değerinden, 1.3 katı kadar küçük yani kötümser bir tahmin yapılmış oldu. Basit toplama işlemi ile elde edilen P10'nin, gerçek P10 değerinden küçük çıkması tesadüf değildir. Bunun temel nedeni, saha bireysel P10'larının basit toplama işlemi ile elde edilecek değer, ülke geneli PW_C 'sine ait birikimli dağılım fonksiyonda daha küçük olasılığa sahip bir değere karşılık gelecek olmasıdır.

Tablo 13. Hipotetik Bir Ülkenin “Toplam” Üretilbilir Gücüne Ait İstatistiksel ve Basit Toplama İşlemleri İle Hesaplanan P10, P50 ve P90 Değerleri.

	P_{10}	P_{50}	P_{90}
	MW	MW	MW
PW_C^1	1227.1	1574.5	2044.5
PW_C^2	1216.1	1579.0	2050.0
PW_C^3	946.4	1531.1	2407.2
¹ MC ile hesaplanan yüzdellikler ² log-normal varsayımı ile hesaplanan yüzdellikler ³ Basit toplama işlemi ile hesaplanan yüzdellikler.			

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- (i) Hacimsel yöntemde kullanılan girdi parametrelerine ait dağılımların tipi ne olursa olsun, hacimsel yöntemden hesaplanacak depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç dağılımları her zaman *log-normal* bir dağılımdır.
- (ii) Bu önemli sonuç ABY yönteminde kullanıldığında, ABY yönteminden tahmin edilen, termal enerji ve güçteki belirsizliğin karakterize edilmesi için gerekli olan istatistiksel ölçüler (veya markerler); P10, P50 ve P90, MC yönteminden elde edilenlerle aynıdır. Dolayısıyla, depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminindeki belirsizliğin tayin edilmesinde MC yazılımları kullanımı gerekli değildir. Onun yerine bu çalışmada geliştirilen basit ABY yöntemini kullanmak yeterlidir.
- (iii) Hacimsel yöntemde gerekli girdi parametreleri arasında (varsa) korelasyonun ihmal edilmesi, depolanmış termal enerji ve üretilebilir güç tahminlerinde belirsizliğin önemli ölçüde yanlış saptanmasına yol açabilir.
- (iv) Göz önünde bulundurulmuş bir sahada her bir kuyu (veya herhangi bir ülkedeki her bir jeotermal saha) için hesaplanmış P10, P50 ve P90 değerlerinin basit toplama işlemi ile elde edilen değerleri, o saha (veya ülke) toplamı için depolanmış ve üretilebilir güce ait P10, P50 ve P90 değerlerini temsil etmemektedir.
- (v) İstatistiksel toplama işlemiyle saha veya ülke geneli için hesaplanan P10 değeri (bu değer sahanın işletilip işletilmeyeceğine karar verirken bakılması gereken en önemli istatistiksel ölçüdür ve depolanmış ısı ve üretilebilir gücün %90 olasılıkla alacağı en küçük değeri temsil eder) basit toplama işlemiyle elde edilen değerden her zaman daha büyüktür.

KAYNAKLAR

- [1] MUFFLER, L.J.P. ve CATALDI, R., "Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources," *Geothermics*, Vol. 7, No. 2-4, 53-89, 1978.
- [2] BROOK, C.A., MARINER, R.H., MABEY, D.R., SWANSON, Jr., GUFFANTI, M., ve MUFFLER, L.J.P., "Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures ≥ 90 °C," Ed., Muffler, L.P.J., *Assessment of Geothermal Resources of US, USGS Circular 790*, 18-85, 1978.
- [3] SERPEN, U., "Estimation of Geothermal Field Potential by Stochastically Evaluating Stored Heat Model," *Turkish Journal of Oil and Gas*, 7, 37-43, 2001.
- [4] LOVEKIN, J., "Geothermal Inventory, US Geothermal Development," *GRC Bulletin*, November-December, 242-244, 2004.
- [5] ARKAN, S. ve PARLAKTUNA, M., "Resource Assessment of Balçova Geothermal Field," *proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005*.
- [6] SERPEN, U., KORKMAZ, B.E.D., SATMAN, A., "Power Generation Potentials of Major Geothermal Fields in Turkey," *proceedings 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 28-30 January, 2008.
- [7] SARAK, H., TÜREYEN, Ö.İ., ve ONUR, M., "Assessment of Uncertainty in Estimation of Stored Heat and Recoverable Thermal Energy in Geothermal Reservoirs By Volumetric Methods," *proceedings 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 09-11 February, 2009.
- [8] BARLOW, R.J. "Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences," John Wiley & Sons, 1989.
- [9] CAPEN, E.C., "The Difficulty of Assessing Uncertainty," *Journal of Petroleum and Technology*, (August) 843-850, 1976.
- [10] CAPEN, E.C., "Probabilistic Reserves! Here at Last?," *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, (October) 387-394, 2001.
- [11] WELSH, M.B., BEGG, S.H., ve BRATVOLD, R.B., "Modeling the Economic Impact of Cognitive Biases on Oil and Gas Decisions," paper SPE 110765 presented at the 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 11-14 November, 2007.
- [12] MURTHA, J.A., "Incorporating Historical Data Into Monte Carlo Simulation," *SPE Computer Applications*, (April), 11-17, 1994.
- [13] KALOS, M.V. ve WHITLOCK, P.A., "Monte Carlo Methods," Willey-Blackwell, 2008.
- [14] COLEMAN, H.W. and STEELE, W.G., "Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers," 2nd edition, Wiley & Sons, 1999.
- [15] ZEYBEK, A.D., ONUR, M., TÜREYEN, Ö.İ., MA, M.S., AL-SHAHRI, A.M., ve KUÇUK, F.J., "Assessment of Uncertainty in Saturation Estimated from Archie's Equation," paper SPE 120517 to be presented at the 2009 SPE Middle East Oil Show and Conference, Bahrain, Kingdom of Bahrain, 15-18 March, 2009.
- [16] @RISK Ver.4.5.5 software, Palisade Corporation, NY, USA, 2004.
- [17] SATMAN, A., SERPEN, U., ONUR, M., "İzmir Balçova-Narlidere Jeotermal Sahasının Rezervuar ve Üretim Performansı Projesi," yayınlanmamış rapor, Balçova Jeotermal Şirketi., İzmir, 2001.
- [18] TVERSKY, A. ve KAHNEMAN, D. "Judgment under Uncertainty," *Science* 185, 1124-1131, 1974
- [19] WELSH, M.B., BEGG, S.H., and BRATVOLD, R.B., "Modeling the Economic Impact of Cognitive Biases on Oil and Gas Decisions," paper SPE 110765 presented at the 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 11-14 November, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ONUR

1982 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra, Milli Eğitim Bakanlığı bursunu kazanarak gittiği Amerika Birleşik Devletleri Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği bölümünden Haziran 1986'da Master ve Haziran 1989'da Doktora derecelerini aldı. Kasım 1989'dan beri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Ekim 1992'de Doçent ve Nisan 1999 yılında İTÜ'de profesör oldu. 1995-1997 yılları arasında Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi ve 2003 yılında Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümlerinde de ziyaretçi profesör olarak görev yaptı. İlgili alanları arasında rezervuar ve üretim mühendisliği problemleri, kararsız kuyu basınç testi tasarım, analiz ve modellemeleri, telli formasyon testleri, sayısal petrol, doğal gaz ve jeotermal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği, jeostatistiksel yöntemlerle rezervuar tanımlaması, otomatik olarak geçmiş, statik ve üretim verilerine karşılaştırma ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. Halen İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevini yürüten Mustafa Onur, Petrol Mühendisleri Odası (Türkiye) ve Society of Petroleum Engineers (A.B.D.) üyesidir.

Hülya SARAK

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında lisans ve 1997 yılında yüksek lisans ve 2004 yılında doktora unvanlarını aldı. 1997-1998 yılları arasında Yeni Zelanda'da Auckland Üniversitesi tarafından düzenlenen "Jeotermal Enerji Teknolojisi Diploma Kursu"na katıldı. 1995 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başladığı İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde 2007 yılından beri Yrd. Doçent olarak görev yapmaktadır. Petrol Mühendisleri Odasına üyeliği bulunmaktadır.

Ömer İnanç TÜREYEN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında lisans ve 2000 yılında yüksek lisans unvanlarını aldı. 2005 yılında Stanford Üniversitesi'nde doktorasını tamamladıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent Dr. olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde öğretim üyeliği görevine devam etmektedir. İlgili alanları arasında rezervuar karakterizasyonu ve simülasyonu konuları yer almaktadır. Ömer İnanç Türeyen'in Petrol Mühendisleri Odasına ve Society of Petroleum Engineers kuruluşuna üyelikleri bulunmaktadır.