TÜRKİYE'NİN JEOTERMAL ENERJİ POTANSİYELİ

Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Türkiye'de bügüne kadar yapılan araştırmalar, ülke genelinde 280'e yakın alanda jeotermal etkinliklerin olduğunu göstermektedir. Bunlar arasında geliştirilmiş 25 kadar jeotermal saha halen doğrudan amaçlı olarak veya elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Birçok jeotermal alanda ise yerel halkın ılıca, kaplıca gibi banyo amaçlı kullanımı sözkonusudur. Bu arada, yeni araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmekte, bazı sahalar geliştirilirken yeni sahalar da bulunmaktadır.

Bu bildiride, tanımlanmış jeotermal alanlarla ilgili mevcut verilere dayanarak hesaplanmış jeotermal kapasite değerleri verilmekte, ayrıca Türkiye için 0-3 km derinlik aralığında geçerli jeotermal kaynak potansiyeli ve hidrotermal sahaların potansiyeli hakkında tahminler sunulmaktadır.

Kapasite belirlenirken, tanımlanmış sahaların mevcut koşullardaki üretim ve rezervuar verileri gözönüne alınmaktadır. Tanımlanmış saha verileri olarak MTA jeotermal envanterleri ile birlikte İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde (İTÜ PDGMB) yapılmakta olan çalışmalarda elde edilen veriler ve literatürde yeralan veriler alınmaktadır.

İTÜ PDGMB'de halen sürdürülmekte olan jeotermal kapasite çalışmasında elde edilen ilk sonuçlara göre tanımlanmış mevcut kapasite, 20 ^{o}C sıcaklık yukarısındaki ısı söz konusu olduğunda, 3700 MW_t kadardır. Bunun 1436 MW_t'ı sıcaklığı 140 ^{o}C'tan büyük olan jeotermal sahaların elektrik üretimine uygun kapasitedir. Ancak burada verilen kapasite tanımlanmış sahalar için geçerli kapasite olup, gerek bu sahalar geliştirildiğinde ve gerekse de tanımlanmamış olarak bilinen olası yeni sahaların keşfedilmeleri durumunda 3700 MW_t'tan çok daha yüksek bir kapasite değerine ulaşmak söz konusu olacaktır. ABD için keşfedilmemiş saha kapasitesinin tanımlanmış saha kapasitesine oranı 4-6 olarak alınırken, diğer bazı ülkelerde söz konusu oran 5-10 olarak varsayılmaktadır.

Türkiye için 0-3 km derinlik aralığında geçerli jeotermal kaynak potansiyeli, literatürde mevcut olan çalışmalara ve İTÜ PDGMB'de gerçekleştirilmekte olan jeotermal potansiyel belirleme çalışmasına göre, 2.0×10^{23} J ile 3.7×10^{23} J arasında değişen ($2.85 \pm 0.85 \times 10^{23}$ J) bir değer olarak tahmin edilmektedir. Hidrotermal sahaların potansiyeli hakkında belirli varsayımlara dayanan tahmini değerler metin içinde verilmektedir.

1. GİRİŞ

Tarih içinde jeotermal akışkanın ısıtma ve yıkanma amaçlı kullanıldığı kayıtlarda yeralmaktadır. Endüstriyel ve ticari amaçlı kullanımı ise ancak 20. yüzyılın ilk yıllarında başlamıştır. 1904'te Larderello-İtalya'da jeotermal buhardan ilk elektrik üretimi sağlandı. O günden bugüne Kaliforniya'daki Geysers sahası, Wairakei-Yeni Zelanda, Cerro-Prieto-Meksika, Reykjavik-İzlanda, Endonezya, Filipinler, Kızıldere-Türkiye ve diğer sıcak su sistemleri Dünya jeotermal elektrik üretim kapasitesini yaklaşık olarak 9 bin MW_e'a ve elektrik-dışı doğrudan kullanım kapasitesini de 28 bin MW_t'a çıkarmış durumdadır.

Jeotermal enerji, yer kabuğu içinde depolanmış olan ısıl enerjidir. Bu ısıl enerji yeraltındaki kayaç formasyonlarında ve bu formasyonların çatlaklarında ve gözeneklerinde bulunan doğal akışkanlarda bulunur.

Yerkabuğu içindeki jeotermal enerji "**kaynak**" olarak değerlendirilebilir ve kaynak "varlığı tanımlanmış olanlarla beraber henüz keşfedilmemiş olanları da kapsayacak şekilde ekonomik analizden bağımsız olarak düşünülen tüm ısıl enerji" olarak tanımlanabilir. **Ulaşılabilir kaynak** olarak "yakın gelecekte yapılacak üretim kuyularıyla ulaşılabilir kaynak" tanımı yapılabilir. Genelde ulaşılabilir kaynak olarak, belirli bir yüzey alanı altında kalan ve belirli bir referans sıcaklığın üzerinde olan, yeryüzü ile yer kabuğu içinde belirli bir derinlik arasında kalan jeotermal enerji anlaşılır. Referans sıcaklığı olarak literatürde 15 ^{o}C, 20 ^{o}C veya ortalama yüzey sıcaklığı değerleri kullanılmaktadır. Ulaşılabilir kaynak tanımı yeryüzü ile yer kabuğu içinde belirli bir derinlik arasındaki ısı içeriğini veya yer kabuğu içinde belirli iki derinlik arasındaki mevcut ısı içeriğini verebilir. Akışkan içermeyen ve iletimin etken olduğu sıcak kuru kayaç veya son yıllarda kullanılan terminolojiyle Geliştirilmiş Jeotermal Sistemler (Enhanced/Engineered Geothermal Systems, EGS) için derinlik sınırı olarak 10 km alınmaktadır. Kayaç ve akışkan ısısının birlikte düşünüldüğü hidrotermal taşınım sistemleri için ise yer kabuğu içinde sınırlayıcı derinlik olarak genelde 3 km alınır. 3 km'nin sınır olarak kullanılmasının nedeni, hidrotermal taşınım sistemleri içine delinen üretim kuyuları için mevcut teknolojik koşullarda geçerli sınırlayıcı derinlik olmasıdır.

Teknolojik gelişmeler ve ekonomik koşullarda yapılabilen varsayımlarla, yakın gelecekte enerjinin diğer türleriyle rekabet edebilecek maliyetlerde üretilebilir ısıl enerji jeotermal kaynağın ulaşılabilir kısmıdır. Ulaşılabilir kaynak ise tanımlanmış ve keşfedilmemiş olarak tanımlanan iki bileşenden oluşur. **Tanımlanmış ulaşılabilir kaynak**, sondaj, jeokimya, jeofizik ve jeolojik gibi verilerle belirlenmiş ve bilinen jeotermal enerjidir. **Keşfedilmemiş ulaşılabilir kaynak** olarak ise jeolojik bilgi, teori ve deneyime dayanarak varolabileceği varsayılan jeotermal enerjidir.

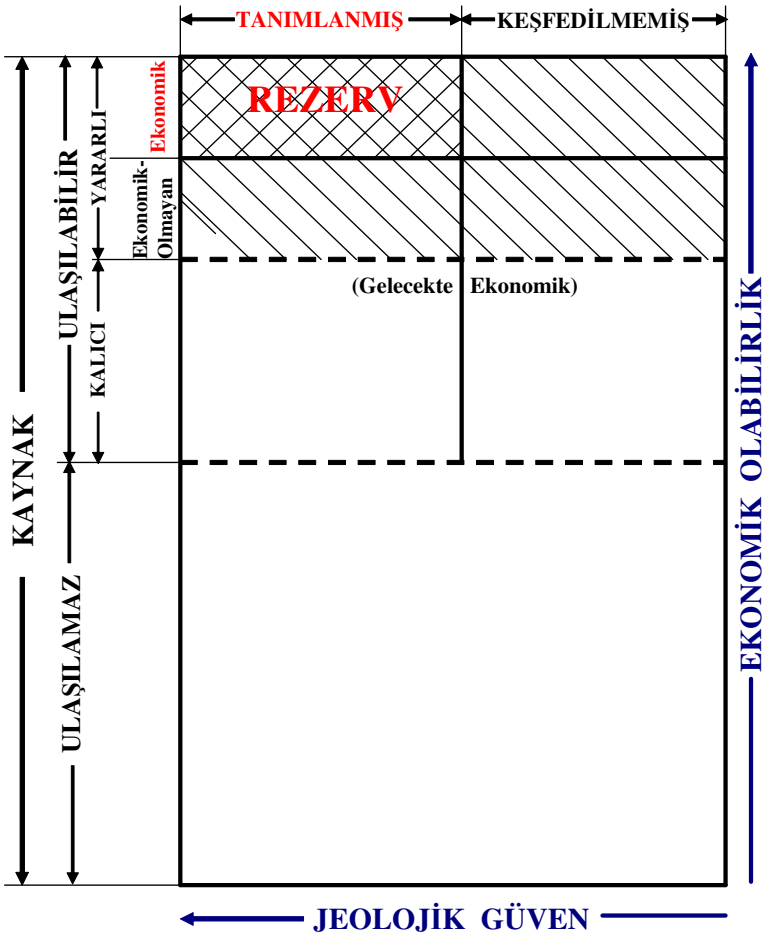
Jeotermal **rezerv** tanımı, tanımlanmış ve mevcut koşullarda ekonomik olarak işletilebilme özellikleri olan (üretilebilir) ulaşılabilir kaynak için geçerlidir.

Jeotermal kaynak terminolojisi genelde bir McKelvey diyagramı üzerinde özetlenebilir [1-4]. Şekil 1'de verilen McKelvey diyagramında, düşey eksen ekonomik olabilirlik düzeyini ve yatay eksen ise jeolojik güven düzeyini yansıtmaktadır.

Hidrotermal taşınım sistemlerinin üç temel bileşeni vardır. Bunlar; ısı kaynağı, bir akışkan ve geçirgenliktir. Geçirgenlik, ısınan düşük yoğunluklu akışkanın yukarılara doğru akışını kolaylaştırırken aynı zamanda doğal beslenmenin gerçekleşmesine neden olan kayaç özelliğidir. **Rezervuar** olarak ta tanımlanan hidrotermal taşınım sistemlerinde ısıl enerjinin çoğunluğu (%90'a yakını) kayaçtadır. Sıcak akışkanın ısıyı taşıması ısıl enerjinin rezervuar içinde yeryüzüne doğru yaklaşımında ve ekonomik olarak üretiminde temel mekanizmadır.

Hidrotermal taşınım sistemleri genelde genç volkanik etkinliklerin olduğu alanlarda ve bölgesel ısı akısının yüksek olduğu alanlarda görülür. Taşınım sistemleri içindeki fay zonları akışkan akışı için en uygun ortamlardır. Sıcak akışkanların üretildiği rezervuarlar gözenekli veya çatlaklı ortamlardır.

Hidrotermal taşınım sistemleri buharın etken olduğu sistemler ve sıvının etken olduğu sistemler olarak iki gruba ayrılırlar. Buharın etken olduğu sistemlere dünyada az rastlanmaktadır ve Türkiye'de yoktur. Türkiye'de keşfedilen tüm jeotermal rezervuarlar sıvının etken olduğu hidrotermal taşınım sistemleridir. Bu tür sistemler içinde hareket eden sıvı su, rezervuardaki basıncı kontrol eder ve ısının derinlerden rezervuara taşınmasına neden olur. Yeryüzüne doğal olarak ulaşan çıkışlarla tanımlanırlar. Sıvının etken olduğu sistemlerde belirli derinliklerde sıvı fazdan gaz fazına geçişin gerçekleştiği (iki fazın oluştuğu, sıvı ve gaz fazının birlikte bulunduğu) durumlar olabilir.



Şekil 1. Jeotermal enerji için McKelvey diyagramı.

Isının yer kabuğu boyunca yeryüzüne akışı yalnızca kayaçların katı kesimlerini oluşturan matriks yapı içinde değil, bu kayaçların birbiriyle bağlantılı gözenek, çatlak vb. boşlukları içinde yüksek basınç ortamından düşük basınç ortamına doğru akan akışkanlar tarafından da taşınarak sağlanır. Bu tür sistemlerde ısı geçişi a) ısı iletimi ve ısı taşınımı mekanizmaları ile ve b) uranyum, toryum ve potasyum izotopları gibi radyoaktif elementlerin bozunması sonucu oluşan ısıdan kaynaklanan ısıl ışıma ile gerçekleşir.

Yerkürede yüzeye olan ısı akısı, düşük ısı akışı olan alanlardaki 20 mW/m^2 değerinden yüksek ısı akışının olduğu alanlardaki 150 mW/m^2 değerine kadar değişebilir. Dünya ortalaması 59 mW/m^2 (1.9x10^{-2} Btu/hr-ft^2)'dir. Hidrotermal sistemler içeren alanlarda yüzeye ısı akısı genelde 120 mW/m^2 'den yüksektir. Yüzeye ısı akışında önemli olan parametreler; ısıl iletkenlik, yüzey sıcaklığı ve kabuk içindeki radyoaktif elementlerden (U, Th, K) kaynaklanan ısı akışıdır.

Daha önce tanımlandığı gibi, jeotermal enerji yer kabuğunda depolanmış ısıl enerjidir. Yerin ısısı, kabuk içindeki kayaçta ve kayaçın gözenek ve çatlaklarında bulunan akışkanda bulunur. Akışkan ise genelde değişik miktarlarda çözünmüş tuzluluğu olan sudur. Su sıvı olabildiği gibi doymuş durumda sıvı-buhar karışımı veya kızgın buhar şeklinde de olabilir.

Yerkürenin kabuğunda depolanmış ısı, halen üretilmekte olan göreli olarak sığ derinliklerdeki ekonomik hidrotermal kaynakları ve ayrıca yerkürenin daha derininde depolanmış ve her yerde bulunan ısı enerjisini de kapsar.

Her ne kadar hidrotermal kaynaklar elektrik ve elektrik-dışı amaçlarla kullanılmakta ise de bu tür kaynaklar sınırlıdır. EGS kaynakları ısı üretimi amaçlı teknoljiler kullanılarak yer içinde depolanmış ısıl enerjiyi üretmek için hemen hemen sonsuz bir potansiyele sahiptir.

Jeotermal kaynağın türü sıcaklık-derinlik ilişkisine (jeotermal gradyana), rezervuar kayacının geçirgenlik ve gözenekliliğine ve akışkan içeriğine bağlı olarak belirlenebilir. Hidrotermal kaynaklar yüksek sıcaklık gradyanları, yüksek kayaç geçirgenliği ve gözenekliliği, içerdiği yeterli akışkan miktarı ve rezervuara yeterli akışkan beslenmesi özelliklerine sahipken, tüm EGS kaynaklarında bu özelliklerden en az biri olmaz. Örneğin, rezervuar kayacı yeteri kadar sıcak olabilir fakat ya düşük formasyon geçirgenliği veya yeterli miktarda akışkan olmamasından dolayı ısı üretimi için gerekli akışkanı içermeyebilir.

Jeotermal kaynakların değerlendirilmesinde üç önemli bileşen incelenir:

1. Kaynak – Kaynağın büyüklüğünün ve dağılımının tahmininde kullanılır.
2. Teknoloji – Sondaj, rezervuar tasarımı ve işletilmesi, ve ısıl enerjinin doğrudan veya dolaylı kullanımı için dönüşümü gibi enerji üretimi ve kullanımını kapsayan koşulları oluşturur.
3. Ekonomi – Yerküreden ısı üretimi için kullanılan yöntemlerin kullanımındaki maliyeti tahminde kullanılır.

Herhangi bir jeotermal kaynağın uygunluğu için belirli koşulların sağlanması gerekmektedir. Bunların birincisi **ulaşılabilirlik**tir. İlgilenilen derinliğe kuyu delmekte başarılır. İkinci koşul yeterli rezervuar **üretilebilirliği**dir. Hidrotermal sistemler için gerekli olan, gözenekliliği ve geçirgenliği olan akiferlerin içerdiği akışkanların ekonomik olarak kabul edilebilir düzeylerde uzun süreli üretimidir. Eğer hidrotermal sistemlerin doğal beslenmesi yeterli değilse, üretimi uzun süreli tutabilmek için bir tekrarbasma (reenjeksiyon) (üretilen akışkanın ısısı alındıktan sonra geldiği yere basılması) uygulamasına başvurulur.

Bu çalışmada Türkiye'de 0-3 km derinlik için geçerli jeotermal kaynak potansiyeli hakkında değerlendirmeler sunulacak, 3 km derinliğe kadar olan yer kabuğu içinde olası hidrotermal taşınma sistemleri için kaynak potansiyeli değerlendirilecek ve mevcut koşullara ve verilere dayanarak mevcut ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kapasite bilgileri verilecektir.

2. TÜRKİYE İÇİN JEOTERMAL ISI KAYNAĞI

2.1. Mevcut Çalışmalar

Türkiye'nin jeotermal potansiyeli hakkında literatürde yeralan ilk çalışma EPRI tarafından yapılan çalışmadır [5]. EPRI çalışmasında aşağıda sıralanan varsayımlara dayanarak tüm ülkeler ve dünya için 0-3 km derinlik aralığında jeotermal potansiyel tahmini yapılmıştır:

1) Jeotermal kuşak dışında kalan tüm alanlarda jeotermal gradyan 25 ^{o}C/km'dir.
2) Jeotermal kuşakta yeralan alanlarda jeotermal gradyan normalden yüksektir. X olarak herhangi bir ülkedeki jeotermal kuşakta olan alan oransal olarak o ülkenin alanına (A) göre alınmaktadır. ($0 \leq X \leq 1$)
3) Bir ülkenin jeotermal kuşakta olan alanının (XA), %90'ı (0.9XA) 40 ^{o}C/km ve %10'u (0.1XA) 80 ^{o}C/km jeotermal gradyana sahiptir.
4) Yeryüzü sıcaklığı 15 ^{o}C'tır.
5) Bir ülkenin jeotermal kaynağı, 3 km derinliğe kadar olan kayaç ve akışkanların 15 ^{o}C referans sıcaklığında içerdiği ısıdır.

6) Yeraltında sıcaklığa bağlı olarak dört grup oluşturulmuştur:
   Grup 1: < 100 °C
   Grup 2: 100 – 150 °C
   Grup 3: 150 – 250 °C
   Grup 4: > 250 °C
7) Kayacın hacimsel ısı kapasitesi sıcaklığa bağlı olmakla beraber, bütün alanlar için 2.5 J/(cm^3-°C) değeri ortalama değer olarak varsayılmaktadır.
8) Herhangi bir sıcaklık grubu için kaynağın ısısı

$$Q = ADC_v(T - 15) \ , \ J \qquad (1)$$

denkleminden hesaplanmaktadır. Burada:
A = kaynağın alanı
D = kaynağın derinlik aralığı
C_v = hacimsel ısı kapasitesi
T = kaynağın ortalama sıcaklığı.

EPRI'nin yaklaşımı Türkiye'ye uygulandığında alan (A) olarak 7.8x10^5 km^2, jeotermal kuşak oranı (X) olarak 0.50 varsayılmaktadır. EPRI'nin Türkiye, ABD ve tüm Dünya için sonuçları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Hesaplanan jeotermal kaynak, J [5]

Ülke Sıcaklık, °C	Alan, km^2	X	Grup 1 <100	Grup 2 100-150	Grup 3 150-250	Grup 4 >250	Toplam
Türkiye	7.8x10^5	0.50	1.9x10^{23}	8.4x10^{22}	2.3x10^{22}	1.4x10^{21}	3.1x10^{23}
ABD	9.4x10^6	0.25	4.1x10^{24}	5.0x10^{23}	1.3x10^{23}	8.4x10^{21}	4.6x10^{24}
Dünya			3.8x10^{25}	3.8x10^{24}	9.6x10^{23}	5.0x10^{22}	4.3x10^{25}
Türkiye/Dünya, %			0.5	2.2	2.4	2.8	0.7

Türkiye'nin 3 km derinlik içinde jeotermal potansiyeli ile ilgili ilk çalışmalar arasında yukarıda verilen EPRI çalışmasından sonra yapılan Serpen (1996) [6] çalışması ve Serpen-Mıhçakan (1999) [7] çalışması sayılabilir. EPRI ve Serpen (1996) sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmektedir. Görüldüğü gibi sonuçlar benzerdir.

Tablo 2. Türkiye'nin Jeotermal Potansiyeli, J

Sıcaklık, °C	X	Grup 1 <100	Grup 2 100-150	Grup 3 150-250	Grup 4 >250	Toplam
EPRI [5]	0.50	1.9x10^{23}	8.4x10^{22}	2.3x10^{22}	1.4x10^{21}	3.1x10^{23}
Serpen [6]	0.89	1.6x10^{23}	9.3x10^{22}	3.2x10^{22}	---	2.9x10^{23}

Serpen-Mıhçakan (1999) [7] çalışmasında Tezcan (1979) [8], İlkışık (1992) [9] ve Mıhçakan-Öcal (1998) [10] verileri kullanılarak 3 km derinlik içinde jeotermal potansiyel değerleri hesaplandı. Serpen-Mıhçakan sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

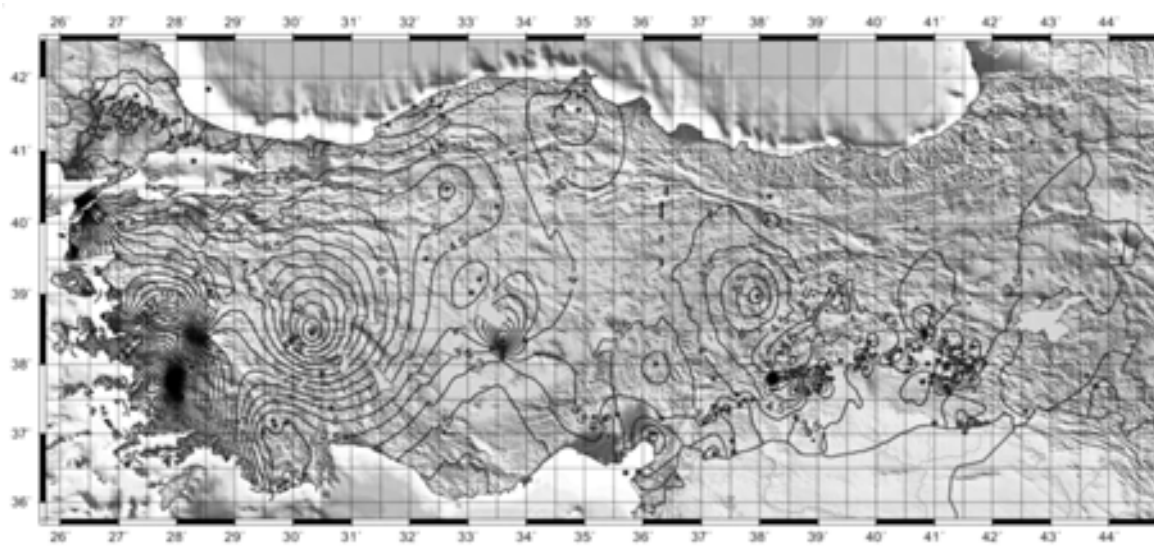
Tablo 3. Türkiye'nin Jeotermal Potansiyeli, J

Sıcaklık, ^oC	Grup 1 <100	Grup 2 100-150	Grup 3 150-250	Grup 4 >250	Toplam
EPRI [5]	$1.9x10^{23}$	$8.4x10^{22}$	$2.3x10^{22}$	$1.4x10^{21}$	$3.1x10^{23}$
Serpen [6]	$1.6x10^{23}$	$9.3x10^{22}$	$3.2x10^{22}$	---	$2.9x10^{23}$
	Grup 1 <100	Grup 2 100-180	Grup 3 180-250		
Serpen-Mıhçakan (1999)[1]	$1.6x10^{22}$	$9.2x10^{22}$	$3.2x10^{22}$	---	$1.4x10^{23}$
Serpen-Mıhçakan(1999)[2]	$6.7x10^{22}$	$1.8x10^{23}$	$8.4x10^{21}$	---	$2.6x10^{23}$
Serpen-Mıhçakan(1999)[3]	$1.3x10^{23}$	$8.2x10^{22}$	$7.7x10^{21}$	---	$2.2x10^{23}$
Serpen-Mıhçakan(1999)[4]	$7.1x10^{22}$	$1.1x10^{23}$	$1.5x10^{22}$	---	$2.0x10^{23}$

[1] Tezcan (1979) ısı akısı haritasından bulunan sonuçlar
[2] İlkışık (1992) ısı akısı haritasından bulunan sonuçlar
[3] Mıhçakan-Öcal (1998) sıcaklık gradyanı haritasından bulunan sonuçlar
[4] Serpen-Mıhçakan (1999) Monte Carlo simülasyon çalışmasından bulunan sonuçlar

2.2. Bu Çalışma

Bu çalışmada, Mıhçakan (2006) [11] tarafından geliştirilmiş olan Türkiye yeraltı sıcaklık gradyanı dağılımı haritası kullanılarak Türkiye jeotermal potansiyeli tahmini çalışması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar burada sunulmaktadır. Kaynak [11]'de ayrıntıları verilen Mıhçakan'ın çalışmasında Türkiye'de derinliği 1000 m'den büyük olan 539 adet kuyu sıcaklık verileri analiz edilmiş ve Türkiye yeraltı sıcaklık dağılımı haritası çıkarılmıştır. Şekil 2'de Türkiye yeraltı sıcaklık gradyanı dağılımı ve topoğrafya haritası (eşgradyan eğri aralığı 0.5 ^oC/100 m) verilmektedir.



Şekil 2. Türkiye yeraltı sıcaklık gradyanı dağılımı ve topoğrafya haritası (eşgradyan eğri aralığı 0.5 ^oC/100 m) [11] .

Buradaki çalışmada jeotermal potansiyel tahmini yapılırken EPRI [5] yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanıldı. Aşağıda sıralanan varsayımlara dayanarak Türkiye için 0-3 km derinlik aralığında jeotermal kaynak potansiyeli tahmini yapıldı:

1) Şekil 2 verileri kullanılarak Türkiye'nin ¾'ündeki tüm alanlarda jeotermal gradyan 35 ^{o}C/km varsayıldı.
2) ¼'ündeki alanlarda ise: %90'ında sıcaklık gradyanı 60 ^{o}C/km ve %10'unda sıcaklık gradyanı 80 ^{o}C/km varsayıldı.
3) Yeryüzü sıcaklığı 15 ^{o}C olarak alındı.
4) Jeotermal kaynak potansiyeli, 3 km derinliğe kadar olan kayaç ve akışkanların 15 ^{o}C referans sıcaklığında içerdiği ısıdır.
5) Yeraltında sıcaklığa bağlı olarak dört grup oluşturuldu:
   Grup 1: < 100 ^{o}C
   Grup 2: 100 – 150 ^{o}C
   Grup 3: 150 – 250 ^{o}C
   Grup 4: > 250 ^{o}C
6) Kayacın hacimsel ısı kapasitesi sıcaklığa bağlı olmakla beraber, bütün alanlar için 2.5 J/(cm^{3}-^{o}C) değeri ortalama değer olarak varsayıldı.
7) Herhangi bir sıcaklık grubu için kaynağın ısısı Denklem 1'den yararlanılarak hesaplandı.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmektedir. Karşılaştırma amacıyla EPRI [5], Serpen [6] ve Serpen-Mıhçakan [7] (Monte Carlo simülasyon çalışması) sonuçları birlikte gösterilmektedir.

Tablo 4. Türkiye için hesaplanan jeotermal kaynak, J

Sıcaklık, ^{o}C	Grup 1 <100	Grup 2 100-150	Grup 3 150-250	Grup 4 >250	Toplam
EPRI	$1.9x10^{23}$	$8.4x10^{22}$	$2.3x10^{22}$	$1.4x10^{21}$	$3.1x10^{23}$
Bu Çalışma	$1.8x10^{23}$	$1.2x10^{23}$	$6.3x10^{22}$	$6.9x10^{20}$	$3.7x10^{23}$
Serpen(1996)	$1.6x10^{23}$	$9.3x10^{22}$	$3.2x10^{22}$	---	$2.9x10^{23}$
Sıcaklık, ^{o}C	Grup 1 <100	Grup 2 100-180	Grup 3 180-250		Toplam
Serpen-Mıhçakan(1999)	$7.1x10^{22}$	$1.1x10^{23}$	$1.5x10^{22}$	---	$2.0x10^{23}$

Tablo 4 incelendiğinde, yapılan tüm çalışmalarda bulunan sonuçların birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Türkiye için toplam jeotermal kaynak potansiyeli 2-$3.7x10^{23}$ J ($2.85\pm0.85x10^{23}$ J) arasında değişmektedir. Sıcaklık gruplarına bağlı olarak Tablo 4'te karşılaştırılan çalışmaların yine birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

2.3. Ulaşılabilir Tanımlanmış Hidrotermal Kaynak

Türkiye'nin ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kaynağı hakkında literatürde birçok çalışma yeralmaktadır. Bunlardan en güncel olanları Satman-Serpen-Korkmaz [12, 13], Dağıstan [14] ve Akkuş-Aydoğdu [15] tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmalarda ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kaynak yerine kapasite terimi kullanılmıştır.

2.3.1. Diğer Çalışmalar

Dağıstan [14] ve Akkuş-Aydoğdu [15] Türkiye'nin doğrudan kullanılabilir jeotermal kapasitesini 1229 MW_t, toplam kapasitesini ise 3600 MW_t olarak vermiştir. Toplam kapasitenin 3000 MW_t'nın şimdiye kadar delinmiş olan 415 kuyudan hesaplandığı, 600 MW_t'ının da doğal kaynaklardan olduğu ifade edilmiştir.

2.3.2. Satman-Serpen-Korkmaz Çalışması

Türkiye'de ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kaynak konusunda en ayrıntılı çalışma Satman-Serpen-Korkmaz [12, 13] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, MTA 1996 [16] ve 2005 [17] envanterleri, literatürde çalışılan sahaların verileri ile birlikte İTÜ PDGMB'de yürütülen projelerdeki mevcut veriler kullanılarak gerçek üretim değerleri ile kapasite tahmini maksimum ve yıllık enerji kullanımı cinsinden güncellenmiş ve tahmin edilmiştir. Kapasite hesabı maksimum akış debisi cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$Kapasite = w_{\max} \times \Delta T \times 0.004184 \qquad (2)$$

Denklem 2'de kapasite (MW_t) termal gücü, w_{max} (kg/s) maksimum akış debisini, ΔT (^oC) giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı temsil etmektedir. İki fazlı üretimin olduğu yüksek entalpili alanlarda denklemin sıcaklık yerine entalpi cinsinden yazılması gerekir. Yıllık enerji kullanımı ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$Enerji\ \ Kullanımı = w_{ort} \times \Delta T \times 0.1319 \qquad (3)$$

Burada enerji kullanımı TJ/yıl, ortalama akış debisi olan w_{ort} ise kg/s cinsinden ifade edilmektedir.

Denklem 2 ve 3'te giriş sıcaklığı olarak sahada ölçülen en yüksek sıcaklık ya da sahada üretilen akışkanın ortalama sıcaklığı kullanılabilir. Ancak bu iki sıcaklık değeri birbirinden farklıdır. Örneğin, Kızıldere sahasında ölçülen en yüksek sıcaklık 242 ^oC iken, üretilen akışkanın ortalama sıcaklığı ise 217 ^oC'dir. Denklem 2 ve 3 kullanılarak kapasite ve yıllık enerji kullanımı bulunmak istenildiğinde maksimum sıcaklık yerine ortalama sıcaklık değerinin kullanılması daha gerçekçi ve mantıklı olacaktır. İşletimi süren sahalarda, akış debisi değeri olarak ölçülen debi değeri ve giriş sıcaklığı olarak ortalama üretim sıcaklığı değeri kullanılmaktadır. Ancak yeni bulunmuş veya henüz geliştirilmemiş sahalar için Denklem 2'de sondaj sonrası ilk testlerde elde edilen debi ve sıcaklık değerleri kullanılarak kapasite tahmini yapılmaktadır.

2.3.2.1. Genel Sonuçlar

Veri seti hazırlanırken tüm Türkiye gözönünde bulundurulmuştur. Ülkemizde 63 ilde toplam 276 adet hidrotermal alan ve oluşum vardır. Bu rakam delinmiş kuyusu bulunan tanımlanmış sahalarla birlikte doğal kaynakları ve boşalımları da içermektedir.

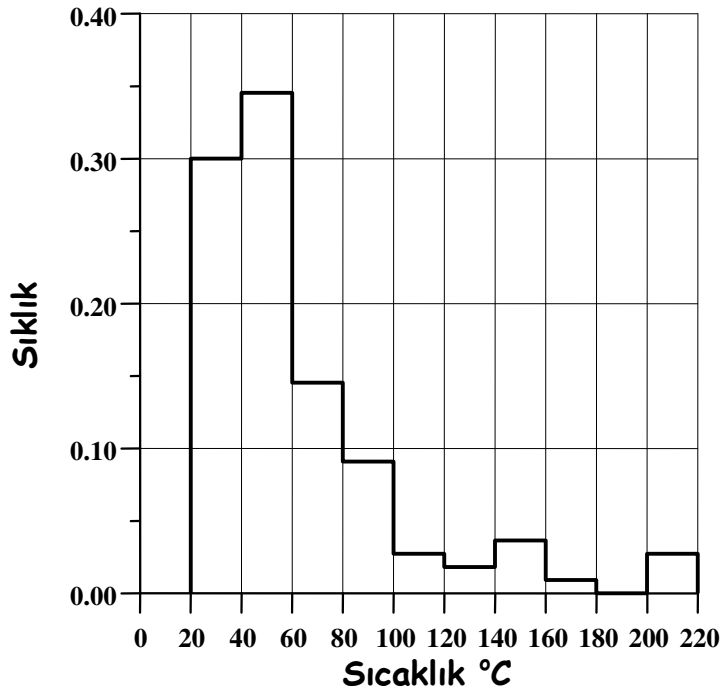
Yapılan analizlere göre, en az 1 tane delinmiş kuyusu bulunan yaklaşık 110 saha mevcuttur. Sadece jeotermal çıkışların olduğu (doğal kaynak ve boşalımlar v.b.) yaklaşık 60 saha tanımlanmıştır.

Sıcaklığın 20 ^oC 'nin üzerinde olması durumunda, 276 alan ve oluşum için tanımlanmış hidrotermal kapasite 3700 MW_t olarak hesaplanmıştır. Bu değer çıkış sıcaklıklarının 40 ^oC, 60 ^oC ve 140 ^oC olması durumunda ise sırasıyla 2461, 1637 ve 385 MW_t'dir.

Kuyularla delinerek belirlenmiş sıcaklığı 20 ^oC üzerinde 110 ve 60 ^oC üzerinde 39 adet saha vardır. Sıcaklığı 60 ^oC ve daha yüksek olan 39 adet saha, 110 sahanın % 35'lik kısmını oluşturmaktadır. Şekil 3, sadece kuyularla tanımlanmış 110 jeotermal sahanın sıklık-sıcaklık değerlerini göstermektedir.

2.3.2.2. Güç Üretimine Uygun Sahalar

ETKB'nın istatistikleri; Türkiye'nin elektriğinin %40'ının doğal gazdan, %30'unun sudan, %25'inin kömürden ve %5'inin sıvı fosil yakıtlar ve yenilenebilirden karşılandığını göstermektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi jeotermal enerjinin ülkenin elektrik üretimine katkısı çok düşüktür. 2006 itibariyle jeotermal enerjiden elde edilen elektrik Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin % 0.04'üdür.



Şekil 3. Jeotermal sahaların Sıklık-Sıcaklık Grafiği
(Sadece kuyularla tanımlanmış 110 saha için) [12, 13].

Aşağıda ortalama sıcaklığı 140 ^{o}C'nin üzerinde olan jeotermal sahalar listelenmektedir. Parantez içindeki ilk değer, sahanın ortalama sıcaklığını, ikinci değer ise sahada ölçülen en yüksek sıcaklıkları temsil etmektedir.

Kızıldere Sahası (217 ^{o}C ve T_{max}=242 ^{o}C, elektrik üretiminde kullanılmaktadır)
Salavatlı–Sultanhisar Sahası (157.5 ^{o}C ve T_{max}=171 ^{o}C, elektrik üretiminde kullanılmaktadır)
Germencik–Ömerbeyli Sahası (220 ^{o}C ve T_{max}=232 ^{o}C)
Tuzla Sahası (160 ^{o}C ve T_{max}=174 ^{o}C, doğrudan kullanımda kullanılmaktadır)
Simav Sahası (145 ^{o}C ve T_{max}=162 ^{o}C, doğrudan kullanımda kullanılmaktadır)
Seferihisar Sahası (144 ^{o}C ve T_{max}=153 ^{o}C)
Yılmazköy- İmamköy Sahası (142 ^{o}C)
Kavaklıdere Sahası (215 ^{o}C)
Caferbeyli Sahası (155 ^{o}C)

Son 3 saha için parantez içindeki değerler kuyudibi sıcaklık değerleridir.

Kızıldere'de 20 yıldır elektrik üreten bir santral mevcuttur. Tuzla ve Simav doğrudan kullanıma müsait gelişmekte olan sahalardır. Kavaklıdere, Caferbeyli ve Yılmazköy-İmamköy sahaları sınırlı sayıda verisi bulunan yeni keşfedilmiş sahalardır. Seferihisar sahası yıllardır varolan ancak henüz geliştirilmemiş bir sahadır. Germencik sahası en düşük sıcaklığı 203 ^{o}C olan 9 adet kuyu delinmiş olmasına rağmen enerji üretimi yapılmayan bir sahadır. 45 MW_e kurulu güce sahip elektrik santralı planlanmaktadır.

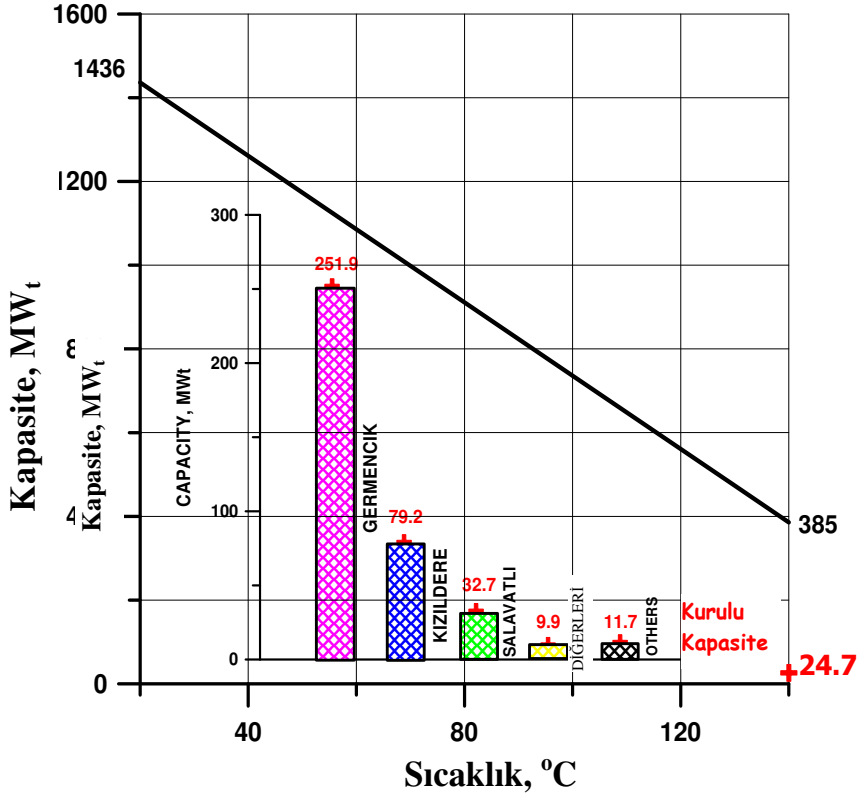
Tablo 5 yukarıda listelenen ve sıcaklığı 140 ^{o}C'tan yüksek olan sahalar için elektrik üretimine uygun jeotermal kapasiteyi göstermektedir. Elektrik üretimi için elverişli sahaların 140 ^{o}C, 130 ^{o}C, 40 ^{o}C ve 20 ^{o}C geri gönüş sıcaklıklarının olması durumunda tahmini kapasiteleri sırasıyla 385 MW_t, 473 MW_t, 1261 MW_t, 1436 MW_t'dir. Referans sıcaklığı 20 ^{o}C için hesaplanan ısıl enerjinin yaklaşık % 5'inin elektrik üretimine dönüşebileceği varsayılırsa, elektrik üretim kapasitesi 75 MW_e olarak bulunur.

Tablo 5. Sahaların Elektrik Üretim Kapasiteleri (T_{rez}>140 °C) [12, 13]

Lokasyon	Üretim Debisi (kg/s)	Sıcaklık (°C)	Kapasite (MW_t) $T_{çıkış}$=140 °C	Kapasite (MW_t) $T_{çıkış}$=130 °C	Kapasite (MW_t) $T_{çıkış}$=40 °C	Kapasite (MW_t) $T_{çıkış}$=20 °C
Kizildere	250	217	79.2	89.5	182.1	202.7
Salavatlı	454	157.5	32.7	51.3	219.3	256.7
Germencik*	765	220	251.9	283.4	566.8	629.8
Tuzla+	120	160	9.9	14.8	59.3	69.2
Simav*	223	145	4.6	13.8	96.4	114.7
Seferihisar	264	144	4.4	15.3	112.9	134.6
Imamkoy+	40	142	0.3	2.0	16.8	20.1
Kavaklidere	6.5	215	2.0	2.3	4.7	5.2
Caferbeyli	6.5	155	0.4	0.7	3.1	3.6
TOPLAM			385	473	1261	1436

* MTA (1996), + MTA (2005)

Şekil 4 elektrik üretimine uygun sahalar için kapasite ve sıcaklık ilişkisini göstermektedir. Şekildeki sıcaklık-kapasite doğrusunun altında yeralan bar grafikte ise sahaların 140 °C geri dönüş sıcaklıkları için kapasiteleri gösterilmektedir. Elektrik üretimine uygun 9 saha Türkiyenin toplam tanımlanmış hidrotermal kapasitesinin % 39'unu oluşturmaktadır. Germencik sahası toplam elektrik kapasitesinin % 60'ına sahiptir.



Şekil 4. Türkiye'deki elektrik üretimine uygun sahalar için kapasite-sıcaklık grafiği [12, 13].
Ülkemizde şu anda mevcut iki adet jeotermal elektrik santralinin kurulu kapasitesi 24.7 MW_e'dir. 2006 yılında jeotermal enerjide dünyanın kurulu elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 9 GW_e'tir. Dünyanın kurulu kapasitesinin % 0.3'ü Türkiye'dedir.

Germencik Sahasında 45 MW_e kapasiteye sahip yeni bir santralin inşası devam etmektedir. Bu santralin kurulması ile varolan kapasite yaklaşık üç kat artacaktır.

2.3.2.3. Doğrudan Kullanıma Uygun Sahalar

Alan ısıtılması, bölge ısıtılması, banyolar, kaplıcalar, spa merkezleri, seralar ve endüstriyel uygulamalar jeotermal enerjinin doğrudan kullanım alanlarını oluşturmaktadır. Ülkemizdeki bölge ve sera ısıtma sistemlerinin doğrudan kullanım kapasiteleri Tablo 6 ve 7'de gösterilmektedir.

Tablo 6. Konut Isıtılması Uygulaması Yapılan Yerler [18]

Lokasyon	İşletmeye Alındığı Yıl	Giriş Sıcaklığı (^oC)	Çıkış Sıcaklığı (^oC)	Maksimum Akış Debisi (kg/s)	Kapasite (MW_t)
Gönen	1987	75	45	110	13.8
Simav	1991	100	50	125	26.2
Kırşehir	1994	54	49	270	5.6
Kızılcahamam	1995	70	42	150	17.6
Balçova	1996	118	60	294	71.3
Ömer-Gecek	1996	90	45	180	33.9
Kozaklı	1996	92	52	100	16.7
Sandıklı	1998	70	42	250	29.3
Diyadin	1998	86	73	200	10.9
Salihli	2002	98	40	70	17.0
Sarayköy	2002	97	50	55	10.8
TOPLAM					253

Tablo 7. Sera Isıtması Yapılan Sistemler [19]

Lokasyon	Sera Alanı (dekar=10^3 m^2)	Tahmini Kapasite (MW_t)
Dikili	240	42
Urganlı	20	3.5
Simav	180	31.5
Gümüşlük	80	14
Edremit	50	9
Tuzla	50	9
Gediz	9	1.5
Afyon	20	3.5
Alaşehir	20	3.5
Urfa	60	10.5
Balçova	80	14
TOPLAM	809	142

Türkiye'de 11 tanesi şehir-bölge ısıtma sistemi olan toplam 38 tane jeotermal alan ısıtma sistemi mevcuttur. 11 şehir ısıtma sistemin toplam kapasitesi 253 MW_t'dir [18]. Tablo 6, 11 bölgenin maksimum üretim debileri ile birincil ısı değiştiricisine giriş ve çıkış sıcaklıklarını göstermektedir. Dolayısıyla, Tablo 6'da gösterilen kapasiteler bölge ısıtma sistemlerinin kapasiteleri olup, sahaların kapasiteleri ile karıştırılmamalıdır.

Türkiye'nin 645 MW_t bölge ısıtma sistemi, 327 MW_t jeotermal banyo ve havuzları, 131 MW_t sera ısıtma sistemleri ve 74 MW_t alan ısıtma sistemleri ile birlikte 2005 yılı için toplam kurulu kapasitesi 1177 MW_t olarak rapor edilmiştir [21]. Lund vd. [21] irili ufaklı tüm ısıtma sistemlerini değerlendirmeye alarak 645 MW_t'lik kapasite, Erdoğmuş vd. [18] ise 11 bölge ısıtma sistemi için 253 MW_t 'lik kapasite değeri vermektedir.

Bölge ısıtma sistemleri için jeotermal sahadan üretilecek gerçek güç hesaplanırken yıllık ortalama üretim debisi, sahanın ortalama sıcaklığını temsil eden giriş sıcaklığı ve sahanın ortalama tekrarbasma sıcaklığı veya atık suyunun sıcaklığını temsil eden çıkış sıcaklığı kullanılmalıdır. Örneğin, Afyon (Ömer-Gecek) sahasının tüm kuyuları dikkate alındığında maksimum akış debisi 236 kg/s, yıllık ortalama akış debisi 114 kg/s, sahanın ortalama sıcaklığı 100 ^{o}C olup, üretilen akışkanın yarısı enjekte edilmektedir. Bu varsayımlar altında maksimum debiye dayalı kapasite 71.4 MW_t, ve ortalama debiye dayalı kapasite ise 34.5 MW_t olarak bulunmaktadır [12, 13]. Bu değer Erdoğmuş vd.'e [18] göre ise 39.9 MW_t'dir.

Tablo 7 Türkiye'de jeotermal enerjinin kullanıldığı 11 adet sera alanını göstermektedir [19]. 2005 yılı itibariyle 11 sera alanının yüzölçümü 809 dekar ve tahmini kapasitesi 142 MW_t'dir. Son 2 yıl içinde mevcut sera alanları Simav'da 180 dekardan 400 dekara, Dikili'de ise 240 dekardan 550 dekara kadar genişleyerek oldukça büyük gelişim göstermiştir. Yeni sera alanlarının kurulması ile birlikte, sera alanlarının yaklaşık 1500 dekarı ve tahmini kapasitelerinin 240 MW_t 'i bulduğu tahmin edilmektedir [20].

Tablo 8 Türkiye'nin doğrudan kullanım alanlarına uygun jeotermal kapasitelerini vermektedir. Rezervuar sıcaklığı 60 ^{o}C'nin üzerinde 53 saha ve/veya alan mevcuttur. Bunların 39 tanesi kuyularla tanımlanmış jeotermal kaynaklar olup, geri kalan 14 tanesi doğal kaynaklar ve çıkışlardır. Tablo 8'de gösterildiği gibi sıcaklığı 60 ^{o}C'tan yüksek olan bu jeotermal kaynakların 60 ^{o}C referans (veya çıkış) sıcaklığında yararlanılabilir toplam kapasitesi 1637 MW_t'dir. Tablo 8'deki 53 sahanın dokuzu, sıcaklığı 140 ^{o}C'tan yüksek olan ve elektrik üretimine uygun sahalardır. Bu dokuz sahanın 60 ^{o}C'ın yukarısında yararlanılabilir kapasitesi 1104 MW_t'dir. Dolayısıyla, bu dokuz saha dışında kalan 44 sahanın 60 ^{o}C'tan yüksek sıcaklıkta yararlanılabilir toplam ısı kapasitesi (bölgesel ısıtmaya uygun kapasite) 533 MW_t'dir.

2.3.2.4 Sonuçlar

Satman-Serpen-Korkmaz çalışmasında [12, 13] güncellenmiş veriler kullanılarak Türkiye'nin tanımlanmış hidrotermal kapasitesi sunulmuştur. 276 adet jeotermal oluşum ve saha değerlendirildiğinde Türkiye'nin belirlenmiş jeotermal kapasitesi 3700 MW_t'dir. Sıcaklığı 140 ^{o}C'nin üzerindeki sahaların toplam kapasitesi, 140 ^{o}C'ın yukarısındaki ısının kullanılması durumunda 385 MW_t ve 20 ^{o}C referans sıcaklığı alındığında ise 1436 MW_t'dir. 60 ^{o}C ve üzeri sıcaklığa sahip 53 adet saha bulunmaktadır. Bu 53 saha toplam saha sayısının (170 adet) %31'ini oluşturmaktadır. 53 sahanın 60 ^{o}C'ın yukarısındaki ısısının kullanımı durumunda hesaplanan referans sıcaklığındaki 1637 MW_t kapasitesi, 20 ^{o}C referans sıcaklığında hesaplanan 3700 MW_t'lik toplam jeotermal kapasitenin %45'ini oluştururken, geriye kalan %55'lik kapasite sıcaklığın 60 ^{o}C 'den az olduğu doğrudan kullanıma uygun jeotermal kapasiteyi oluşturmaktadır.

Türkiye için mevcut tanımlanmış jeotermal kapasite 3 700 MW_t olmasına rağmen, bunun kullanılmakta olan ortalama yıllık işletme kapasitesi; ~300 MW_t'ı 13 adet merkezi ısıtma sisteminde, ~240 MW_t'i sera ısıtmada ve kalanı kaplıca ve termal turizmde olmak üzere toplam ~800 MW_t olarak tahmin edilmektedir.

2.4 Türkiye'nin Ulaşılabilir Hidrotermal Kaynak Potansiyeli

Türkiye'nin ulaşılabilir hidrotermak kaynak potansiyeli konusunda literatürde şimdiye kadar herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak Türkiye'nin jeotermal potansiyeli olarak 31 500 MW rakamı değişik yerlerde dile getirilmektedir [21, 22]. Fakat bu rakamın nasıl bulunduğu, hangi varsayımlara dayandığı ve ne oranda belirsizlik içerdiği bilinmemektedir ve yukarıda verilen kaynaklarda da herhangi bir açıklama yeralmamaktadır. Sözkonusu 31 500 MW'ın doğrudan kullanımda geçerli MW_t olarak yeraltındaki depolanmış hidrotermal ısıl enerjiyimi ifade ettiği yoksa yeryüzünde üretilebilir ısıl enerjiyimi gösterdiği ve ne kadarının MW_e olarak elde edilebilecek elektrik enerjisini ifade ettiği belirsizdir. Daha da ilginci, bu rakam DPT raporlarında ve ETKB raporlarında Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli olarak yeralmaktadır ve buna dayanarak Türkiye'de 5 milyona yakın konutun jeotermal enerjiyle ısıtılabileceği gibi sonuçlara varılmaktadır.

Tablo 8. Doğrudan Kullanım Alanları (T_{rez}>60 ^{o}C) [12, 13]

Yer	Üretim Sıcaklığı (oC)	Debi (kg/s)	Kapasite (MW_t) $T_{çıkış}$=60 oC
Germencik+	220	765	503.8
Salavatı	157	454	181.1
Kızıldere	217	250	162
Ömer-Gecek*	94	673	95.7
Simav*	109	476	96.1
Seferihisar	144	264	91.2
Dikili	120	250	61.7
Tuzla*	160	120	49.4
Balçova	117	369	88.3
Kula-Emir*	135	140	43.2
Kozaklı*	91.2	247	31.8
Diyadin*	72.3	560.5	28.3
Salihli	104	150	27.4
Kuzuluk*	80.9	271	23.4
Sandikli*	67.6	496	15.6
Hisarköy*	96.7	103	15.6
Gölemezli*	70	340	14
İmamkoy*	142	40	13.5
Aliağa*	96	80	11.9
Gediz	83.3	119	11.4
Hisaralan*	72.3	176	8.9
Tekkehamam*	138.7	26.6	8.6
Kızılcahamam*	80.1	91.5	7.6
Ercis-Zilan*	86.7	66	7.3
Gönen	80	83	6.9
Kavaklıdere	215	6.5	4.2
Yenice*	65	164	3.4
Köprübaşı*	70.7	67	2.9
Banaz*	66	114	2.8
Caferbeyli	155	6.5	2.5
Diğerleri			16.3
TOPLAM (53)			1637

* MTA (2005), + MTA (1996)

Bu çalışmada, Türkiye'nin ulaşılabilir hidrotermal kaynak potansiyeli hakkında belirli varsayımlara dayanan tahminler sunulmaktadır. Sunulan potansiyel tahminlerinin varsayımlara dayandığı, belirsizlikler içerdiği ve gelecekteki teknolojik ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır.

Daha önce değinildiği gibi ulaşılabilir hidrotermak kaynak potansiyelinin tanımlanmış ve keşfedilmemiş olmak üzere iki ayrı bileşeni vardır. Türkiye'nin ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kaynak potansiyelin 3700 MW_t kadar olduğu yukarıda söylenmişti. Ancak, keşfedilmemiş bileşeni tahmin için aşağıdaki iki yaklaşım kullanılmaktadır.

2.4.1. Yaklaşım 1

Ulaşılabilir keşfedilmemiş hidrotermal kaynak potansiyeli konusunda en kolay yapılabilecek yaklaşımlardan birisi Stefannson [23] tarafından sunulmaktadır. Stefannson'a göre jeotermal kaynağın toplam potansiyeli tanımlanmış potansiyelin 5-10 katı (ABD için 4-6 katı) daha büyük olabilir. Bu durumda, Türkiye için ulaşılabilir hidrotermal kaynak potansiyeli, 3700 MW_t'lik tanımlanmış potansiyel için, en az 19 bin MW_t ve en çok 37 bin MW_t kadardır.

Diğer taraftan, sıcaklığı 140 ^oC'tan yüksek olan tanımlanmış hidrotermal sahalar için kapasite 1436 MW_t olarak bilinmektedir [12, 13]. Stefannson'un yaklaşımı kullanılırsa ve eğer yeraltındaki ısının %4.5'i elektriğe dönüştürülebilir varsayımı (ki Kızıldere jeotermal sahası için yaklaşık olarak bu değer geçerlidir) yapılırsa, Türkiye için hidrotermal sahalardan elektrik üretim potansiyeli en az 323 MW_e ve en çok 646 MW_e olarak hesaplanır.

Dünyada jeotermal enerjiden elektrik üretim teknolojisi hızla değişmektedir. Halen bilinen teknolojiyle elektrik üretimine uygun hidrotermal kaynaklar için varsayılan sıcaklık 110 ^oC'tır (bazı özel durumlarda 80 ^oC olabilir) [24]. Yukarıda yapılan hesaplamalarda sıcaklığı 140 ^oC'tan yüksek sahalar alınmıştı. Eğer sıcaklık değeri 110 ^oC olarak seçilirse elektrik üretim potansiyeli de yüksek olacaktır.

20 ^oC referans sıcaklığına göre hesaplanan ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kaynak potansiyeli olan 3700 MW_t'ın 2264 MW_t'i sıcaklığı 140 ^oC'tan düşük olan hidrotermal sahalar için ve 1637 MW_t'i (Tablo 8) sıcaklığı 60 ^oC'tan yüksek olan hidrotermal sahalar için geçerlidir. Stefannson'un yaklaşımı kullanılırsa ulaşılabilir hidrotermal kaynak potansiyeli, sıcaklığı 140 ^oC'tan düşük olan sahalar için ve sıcaklığı 60 ^oC'tan yüksek olan sahalar için, sırasıyla, en az 11 320 ve 8 185 MW_t ve en çok 22 640 ve 16 370 MW_t olarak hesaplanabilir. Bu potansiyel değerleri, doğrudan kullanıma uygun (140 ^oC'tan düşük sahalar için) ve jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerine uygun (60 ^oC'tan yüksek sahalar için) jeotermal potansiyel değerlerini tahminde kullanılan sınır değerlerdir.

2.4.2. Yaklaşım 2

MIT [4] tarafından yapılan çalışmada 3 km'lik bir derinlik içinde hidrotermal sahaların ısı içeriğinin yeraltındaki toplam ısı içeriğine oranının ABD için %2-10 aralığında (tahmini ortalama %4.3) olduğunu göstermektedir. Tablo 4'te sıcaklığı 150 ^oC'tan büyük kaynaklar için yeraltındaki ısı içeriği ortalama $4.3x10^{22}$ J olarak belirlenmişti. Diğer taraftan ısı içeriği yaklaşık $6x10^{18}$ J olarak tahmin edilen Kızıldere jeotermal sahasından yıllık ortalama 11 MW_e elektrik üretimi yapılmaktadır. Bu oranın tüm Türkiye'deki hidrotermal sahalar için geçerli olduğu ve ayrıca yeraltında 3 km derinlik içindeki ısının %4.3'ünün hidrotermal sahalarda olduğu varsayılırsa, elektrik üretim potansiyeli yaklaşık olarak 3 600 MW_e olarak hesaplanır. Eğer hidrotermal sahaların ısı içeriğinin yeraltındaki toplam ısı içeriğine oranı %2 varsayılırsa, elektrik üretim potansiyeli ~1 700 MW_e olarak hesaplanır.

Yaklaşım 2 ile bulunan 3 600 MW_e (veya 1 700 MW_e) değeri Yaklaşım 1'den bulunan 323 ve 646 MW_e değerlerinden oldukça yüksektir. Dolayısıyla, elektrik üretim potansiyeli tahmini geniş bir aralık içinde yapılabilmektedir.

2.4.3. Tartışma

Burada verilen sonuçlar İTÜ PDGMB'de halen sürdürülmekte olan Türkiye'nin jeotermal potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir araştırmanın ilk sonuçlarıdır. Kapasite ve potansiyel olarak verilen değerler, mevcut sahalar geliştirildiğinde, rezervuar işletme sistemleri değiştirildiğinde (örneğin tekrarbasma uygulaması olmayan bir sahaya uygulama gerçekleştirildiğinde), yeni sahalar bulunduğunda revize edilebilecek değerlerdir. Mevcut sahalardan elektrik üretimine ve doğrudan kullanıma yönelik çalışmalar arttıkça, keşfedilmemiş sahalarla ilgili veriler elde edildikçe ve sahalar hakkında yeni jeolojik, jeofizik ve jeokimya çalışmaları ile veriler üretildikçe daha sağlıklı tahminlere ulaşmak olasıdır.

SONUÇLAR

Türkiye'nin tahmini jeotermal enerji potansiyelini belirlemeye yönelik bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

(1) Yeraltında 0-3 km derinlik içinde jeotermal kaynak içeriği, literatürde mevcut çalışmalara ve burada verilen çalışmaya göre, $2.85 \pm 0.85 \times 10^{23}$ J kadardır.
(2) Kuyularla delinmiş ve ayrıca doğal çıkışlarla belirlenmiş alanlar için hesaplanan ulaşılabilir tanımlanmış hidrotermal kapasite 3700 MW_t kadardır. Bunun:
    (a) Elektrik üretimine uygun olan ve sıcaklığı 140 ^oC'tan yüksek olan sahaların 20 ^oC referans sıcaklığında kapasitesi 1436 MW_t'dir.
    (b) Sıcaklığı 140 ^oC'tan düşük olan sahaların 20 ^oC referans sıcaklığında doğrudan kullanıma uygun kapasitesi 2264 MW_t'dir.
    (c) Sıcaklığı 60 ^oC'tan yüksek olan ve jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde kullanım için uygun olan toplam 53 sahanın, 60 ^oC sıcaklığın yukarısındaki yararlanılabilir ısısını veren, görünür kapasitesi 1637 MW_t'dir.
(3) Tanımlanmış ve keşfedilmemiş bileşenleriyle birlikte ulaşılabilir hidrotermal kaynak potansiyeli en az 19 bin MW_t ve en çok 37 bin MW_t (~28 000±9 000 MW_t) olarak tahmin edilmektedir.
(4) Hidrotermal sahalardan elektrik üretim potansiyeli, değişik varsayımlara bağlı olarak, en az 323 MW_e ve en çok 3 600 MW_e olarak (~2 000±1600 MW_e) tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] WHITE, D.E., WILLIAMS, D.L., Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975, U.S. Geological Survey Circular 726, 1975.
[2] MUFFLER, L.P.J., Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978, U.S. Geological Survey *Circular* 790, 1979.
[3] REED, M.J., Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States-1982, U.S. Geological Survey *Circular* 892, 1983.
[4] The Future of Geothermal Energy (Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century), Massachusetts Institute of Technology, 2006. (http://geothermal.inel.gov)
[5] EPRI: Geothermal Energy Prospect for the Next 50 Years, EPRI ER-611-SR, Palo Alto, Ca., Febr., 1978.
[6] SERPEN, U., "Türkiye'nin Jeotermal Kaynağı", yayınlanmamış çalışma, 1996.
[7] SERPEN, U., MIHÇAKAN, M., "Heat Flow and Related Geothermal Potential of Turkey", Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 23, Oct. 17-20, 1999.
[8] TEZCAN, A.K., "Geothermal Studies, Their Present Status and Contribution to Heat Flow Contouring in Turkey", V. Cermak ve L. Rybach (Editor), Terrestrial Heat Flow in Europe, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
[9] İLKIŞIK, O.M., "Silica Heat Flow Estimates and Lithospheric Temperature in Anatolia", Proceedings, XI. Congress of World Hydrothermal Organization, İstanbul, Mayıs 13-18, 92-104, 1992.
[10] MIHÇAKAN, M., ÖCAL, M, "A Survey on Geothermal Gradient Distribution in Turkey", Bildiriler Kitabı, 12. Uluslararası Petrol Kongresi ve Sergisi, Ankara, Ekim 12-15, 1998.
[11] MIHÇAKAN, M., Türkiye Yeraltı Sıcaklık Gradyanı Dağılımının Derin Kuyu Sıcaklıkları ve Varogram Analizi Kullanılarak Haritalanması, Tübitak, Proje No: YDABÇAG-100Y040, Kasım 2006.
[12] SATMAN, A., SERPEN, U., KORKMAZ BAŞEL, E.D., "An Update of Geothermal Potential of Turkey", Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 22-24 Jan. 2007.

[13] SATMAN, A., SERPEN, U., KORKMAZ BAŞEL, E.D., "Türkiye'nin Güncel Hidrotermal Enerji Kapasitesi", Bildiriler Kitabı, IPETGAS07 Türkiye 16. Uluslararası Petrol ve Doğalgaz Kongre ve Sergisi, Ankara, 29-31 Mayıs 2007.
[14] DAĞISTAN, H., "Yenilenebilir Enerji ve Jeotermal Kaynaklar", Türkiye 10. Enerji Kongresi, Bildiriler Kitabı, İstanbul, Kasım 27-30, 73-80, 2006.
[15] AKKUŞ, İ., AYDOĞDU, Ö., "Türkiye'nin Jeotermal Kaynaklarının Potansiyeli ve Önemi", Jeotermal Enerji ve Yasal Düzenlemeler Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, 12-15 Ekim, 48-57, 2006.
[16] MTA, Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, MTA, Ankara, 1996.
[17] MTA, Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, MTA, Ankara, 2005.
[18] ERDOĞMUŞ, B., TOKSOY, M., ÖZERDEM, B., AKSOY, N., "Economic Assessment of Geothermal District Heating Systems: A Case Study of Balçova-Narlıdere, Turkey", Energy and Building, yayın aşamasında, 2006.
[19] SERPEN, U., "Present Status of Geothermal Energy and Its Utilization in Turkey", Geothermal Resources Council, GRC 2006 Annual Meeting, Transactions, Vol. 30, San Diego, 10-13 Sept., 2006.
[20] HARZADİN, G., Kişisel Görüşme, Kasım, 2006.
[21] LUND, J.W., FREESTON, D.H., BOYD, T.L., "World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005", Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan, 2005.
[22] ŞİMŞEK, Ş., MERTOĞLU, O., BAKIR, N., AKKUŞ, İ., AYDOĞDU, Ö., "Geothermal Energy Utilization, Development and Projections-Country Update Report (2000-2004) of Turkey, Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan, 2005.
[23] STEFANNSON, V., "World Geothermal Assessment", Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan, 2005.
[24] PETTY, S., PORRO, G., "Updated U.S. Geothermal Supply Characterization", Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, Ocak 22-24, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman SATMAN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümü'nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği ABD'deki Stanford Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölümü'nden MS ve Doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde Assistant Profesör olarak çalıştıktan sonra 1980 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan'da KFUPM-Research Institute'te çalıştı. Halen İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak ve İTÜ Enerji Enstitüsü'nde Müdür olarak görev yapmaktadır. İlgi alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliğinin üretim ve rezervuarla ilgili konuları yer almaktadır.