

## ENERGY COST IN GEOTHERMAL POWER PLANTS

**Ahmet DAĞDAŞ\***

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 03.11.2004 Kabul/Accepted: 20.04.2005**

---

### ABSTRACT

One of the most important parameters that shows the effectiveness of conventional and renewable energy plant is energy production cost. Especially, the first and second law efficiencies have second degree importance for geothermal power plants. The most important parameter is unit energy cost per kW in geothermal technology. Since every geothermal field and plant have own characteristic values, unit electricity production cost for geothermal power can vary at almost every geothermal field.

In this paper, after general view to geothermal energy economy, the cost of energy is calculated for single flash power plant. To obtain more available result, levelized costs method is used. For this reason, a software has been developed and used for calculating energy cost.

**Keywords:** Geothermal, Energy cost, Levelized costs.

### JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİNDE ENERJİ MALİYETİ

#### ÖZET

Konvansiyonel ve yenilenebilir enerji santrallerinde elektrik üretim maliyetleri, o santrallerin diğer santrallerle karşılaştırılmasında ve ekonomik uygunluğunun belirlenmesindeki en önemli parametrelerden birisidir. Özellikle jeotermal enerji santrallerinde verim ikinci derecede önemlidir. Asıl önemli olan, üretilen birim elektrik enerjisi başına maliyettir. Jeotermal kaynaklı elektrik üretim maliyetleri, her jeotermal saha için farklı değerlerde olabilir. Çünkü her sahanın ve santralin kendine özgü karakteristikleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada jeotermal enerji ekonomisine genel bir bakış yapıldıktan sonra, yüksek sıcaklıklı bir jeotermal sahada kurulan tek flaşlı güç santrali için karakteristik ve güncel değerler kullanılarak elektrik üretim maliyeti hesaplanmıştır. Maliyet hesabında bir değere getirilmiş maliyetler (levelized costs) yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla geliştirilen bilgisayar programı ile elektrik üretim maliyeti kolaylıkla hesaplanabilmekte, ayrıca maliyetin farklı ekonomik ve teknik parametreler ile değişimleri incelenebilmektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Jeotermal, Enerji maliyeti, Bir değere getirilmiş maliyetler.

---

## 1. GİRİŞ

Jeotermal güç santralleri ile ilgili maliyet analizleri, hem ulusal hem de uluslararası literatürde çok az rastlanan bir konudur. Oysa jeotermal santrallerde performansı gösteren en önemli parametre verim değil, birim elektrikselsel güç başına enerji maliyetidir. Jeotermal rezervuardan sağlanan ısı enerjisinin, ısı üretim maliyetinin olmaması (akışkanın yer üstüne çıkarılması ile ilgili

---

e-posta: dagdas@yildiz.edu.tr, tel: (0212) 259 70 70 / 2488

maliyetler hariç) ve kaynağın yenilenebilir olması bu tip santrallere ait verim hesaplamalarında bulunan değerleri çok anlamlı kılmamaktadır. Bu nedenle jeotermal güç santrallerinin diğer konvansiyonel santrallerle karşılaştırılmasında, verim yerine birim elektrik üretim maliyetinin kullanılması daha doğru olacaktır. Jeotermal akışkanların sıcaklık ve basınçlarının, konvansiyonel sistemlerde elde edilen akışkan sıcaklık ve basınçlarına göre oldukça düşük olması, bu santrallerdeki verim düşüklüğünün temel sebebidir. Fakat verimin düşük olması jeotermal santrallerin yapımlarını engellemektedir. Çünkü bir ülke için enerji kaynaklarındaki çeşitlilik, çevresel açıdan uygunluk, ülkenin döviz kaybının azaltılması gibi faktörler jeotermal güç santrallerinin yapımını teşvik etmektedir. Oysa klasik fosil yakıtlı santrallerdeki yakıt maliyetleri, bu tip santrallerdeki elektrik üretim maliyetini belirleyen en önemli harcamadır. Bu açıdan santral verimleri oldukça önemlidir.

Jeotermal enerji uygulamalarının maliyetleri öncelikle jeotermal sahanın özelliklerine ve uygulamanın tipine bağlıdır. Jeotermal santrallerde elektrik üretim maliyetlerinin, kuyu açma maliyetlerine ve farklı ülkeler için çok değişken olan bireysel kuyu üretimlerine çok duyarlı olduğu vurgulanmalıdır.

Jeotermal projelerin yürütülmesindeki teknik ve ekonomik parametreler sahadan sahaya oldukça farklılıklar gösterir. Bu nedenle her bir jeotermal proje kendine özgü üretim maliyetlerine sahiptir ve bu maliyetleri genelleştirmek mümkün değildir. Ancak ön fizibilite çalışmaları için genel maliyetler kullanılabilir.

Jeotermal enerjili doğrudan ısıtma uygulamalarında üretim maliyetini etkileyen temel faktörler; rezervuarın karakteristik özellikleri (derinlik, sıcaklık, debi vs.), yerel iklim şartları, yerel ısı talepleri ve ısı tüketiminin tipidir (büyük bölgesel ısıtma sistemleri, bireysel ısıtma veya soğutma, jeotermal ısı pompası uygulamaları, diğer kullanımlar gibi).

Jeotermal enerjinin avantajlı olup olmadığı, bu enerjinin konvansiyonel veya diğer yenilenebilir enerji sistemleri ile mukayese edilmesi sonucunda ortaya çıkar. Genellikle elektrik üretim maliyeti, standart ekonomik ve finansal analizlere dayanmaktadır. Jeotermal projelerin uluslararası finans kurumlarınınca desteklenmesi, elde edilen elektrik maliyetlerinin alternatif yöntemlerle elde edilenlerden daha düşük olmasına bağlıdır. Halen Türkiye’de ve Avrupa’da fosil yakıtların özellikle de doğal gazın düşük maliyetli olması, sadece yakıt fiyatlarına bağlı olan mukayeselerde, jeotermal enerjiyi pahalı kılmaktadır. Bu durumda sadece çok yüksek kaliteli sahne (yüksek entalpili veya doğrudan kuru buhar üreten) akışkan üreten jeotermal kaynaklar, alternatifleriyle rekabet edebilecek maliyetlerde elektrik üretebilirler. Oysa Türkiye’de bu tip jeotermal kaynak hemen hemen hiç yoktur. Bununla birlikte, eğer mukayeseler sadece finansal kriterlerle sınırlı değilse, jeotermal enerji klasik enerji kaynakları ile daha fazla rekabet edebilmektedir. Enerji üretiminde bir de görünmeyen fakat gerçekte maliyetleri ciddi oranda artırabilecek unsurlar bulunmaktadır. Örneğin konvansiyonel fosil yakıtlı sistemlerin çevreye ve insan sağlığına verdiği zararları ortadan kaldırmak için yapılan harcamalar dikkate alındığında (her türlü arıtma sisteminin kurulması, küresel ısınma ile oluşan olumsuzluklar, sağlık ve tedavi giderleri vb.), jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji sistemlerine ait enerji maliyetlerinin ekonomik açıdan da uygun olacağı düşünülebilir.

Jeotermal güç santralleri iklim ve mevsimlerden bağımsızdır. İklim şartları bazı santrallerde soğutma kapasitesini etkileyebilir. Fakat genel olarak jeotermal güç santralleri (JGS) gün ve yıl boyunca sabit yükte çalışabilirler. Bu nedenle, JGS’leri şebekeye bağlandıklarında diğer tip santrallerle birlikte temel yük santrali olarak çalışmaya uygundur. İzlanda’da JGS’lerinin ortalama çalışma süreleri yılda yaklaşık 8000 saat civarındadır. JGS’lerin kapasite faktörlerinin yüksek olması, ürettiği kWh başına üretim maliyetini ekonomik açıdan uygun konuma getirmektedir [1-3].

Bu çalışmanın amacı, jeotermal elektrik üretim maliyetinin belirlenmesidir. Yukarıda da belirtildiği gibi jeotermal kaynaklı enerji üretim sistemlerinin klasik sistemlere göre en önemli avantajı yakıt maliyetlerinin olmamasıdır. Diğer bir avantaj da, jeotermal enerjili uygulamalarda kullanılan ekipmanların klasik sistemler için kullanılan ekipmanlarla hemen hemen aynı

olmasıdır. Jeotermal enerji uygulamaları bu özellikleri ile diğer yenilenebilir enerjili sistemlerine de üstünlük sağlamaktadır.

## 2. JEOTERMAL SANTRAL EKONOMİSİNE GENEL BİR BAKIŞ

Jeotermal enerjiden yararlanma ile ilgili maliyet ekonomisi başlıca iki faktörden meydana gelir. Bunlar;

- Yer üstü maliyetleri
- Yer altı maliyetleri

Yer üstü maliyetleri, yüzey araştırması işlemleri, santral inşası ile ilgili işleri ve buhar toplama sistemlerini kapsarken, yer altı maliyetleri kuyu açma işlemlerine ait yatırımları kapsar. Yüzey maliyetleri, yüzeydeki diğer inşaa çalışmaları gibi (inşaatlar, yollar, köprüler) aynı doğrulukta belirlenebilirken, kuyu açma maliyetleri ile ilgili belirsizlikler daha fazladır. İzlanda'daki 5 güç santrali için yapılan analizlerde yüzey maliyetleri yaklaşık 1000 USD/kW civarındadır [1].

Kuyu açma çalışmaları ile ilgili maliyetler sahadan sahaya ve ülkeden ülkeye büyük farklılıklar gösterebilmektedir. ABD için tipik kuyu açma maliyetleri Çizelge 1'de görülmektedir [2].

**Çizelge 1.** ABD'de tipik kuyu açma maliyetleri (x bin US\$)

Kaynak Adı	Derinlikler		
	1000 m	1500 m	2000m
The Geysers, California	640	820	1200
Baca, New Mexico	740	900	1400
Roosevelt Hot Springs, Utah	570	910	1100
Imperial Valley, California (ortalama)	340	470	630

Kuyu maliyetleri ile ilgili farklı bir referanstan alınan maliyetler aşağıdaki gibidir [3];

610 m'lik kuyu için birim maliyet	886 \$/m
1829 m'lik kuyu için birim maliyet	984 \$/m
3048 m'lik kuyu için birim maliyet	1083 \$/m
4572 m'lik kuyu için birim maliyet	1206\$/m

Doğrudan kullanım uygulamaları için açılan kuyuların % 90'ının derinlikleri 550 m. den daha büyüktür. Bu tip kuyularda kuyu açma maliyetleri 100 - 650 \$/m aralığında değişir. En yaygın karşılaşılan aralık ise 170-350 \$/m aralığıdır [4].

Düşük sıcaklıklı kaynaklarda jeotermal akışkanın ekserji içeriği oldukça düşüktür ve santralin uygun miktarda güç üretimini sağlamak için yüksek debilere ihtiyaç vardır. Bu durum önemli pompa güçlerini gerektirir. Böylece santralin net güç üretimi azalır. Düşük sıcaklıklı kaynaklarda birim elektrik maliyeti, yüksek sıcaklıklı kaynaklara göre, pompalama güçlerinden daha çok etkilenir [5].

Jeotermal akışkanın toplanması ve reinjeksiyonu için yapılan yatırımların toplam maliyetteki payı %30-40 civarındadır [6].

Küçük binary jeotermal santraller için sermaye ve işletme- bakım (O&M) maliyetleri Çizelge 2'de görülmektedir [4].

Çeşitli jeotermal santrallerin birim tesis maliyetleri aşağıda belirtilmektedir. Verilen rakamlar; kuyu açma maliyetleri ile jeotermal akışkanın toplama ve reinjeksiyon maliyetlerini kapsamamaktadır, jeotermal iletim hatlarının kısa olduğu ve tüm vergilerin hariç tutulduğu kabul edilmektedir [7];

**Çizelge 2.** Küçük Binary Jeotermal Güç santrallerinde Sermaye ve O&M Maliyetleri

Net Power (kW <sub>e</sub> )	Kaynak Sıcaklığı (°C)			Toplam O&M Maliyeti (\$/yıl)
	100	120	140	
	Sermaye Maliyeti (\$/kW <sub>e</sub> )			
100	2786	2429	2215	21010
200	2572	2242	2044	27115
500	2357	2055	1874	33446
1000	2143	1868	1704	48400

Tipik atmosferik çıkışlı JGS'ler için birim kuruluş maliyetleri;

- 2.5 MW için 1250 \$/kW<sub>net</sub>

- 5 MW için 1050 \$/kW<sub>net</sub>

Tek flaşlı JGS'ler için birim kuruluş maliyetleri;

- 5 MW (Yoğuşmalı) için 1690 \$/kW<sub>net</sub>

- 10 MW (Yoğuşmalı) için 1485 \$/kW<sub>net</sub>

Binary JGS'ler için birim kuruluş maliyeti 1900 \$/kW<sub>net</sub> 'dir

Çift fazlı JGS'ler için birim kuruluş maliyetleri ;

- Doğrudan atmosferik çıkışlı çift fazlı santral için 1750 \$/kW<sub>net</sub>

- Üst Çevrim olarak atmosferik çıkışlı türbine sahip çift fazlı santral için 1620 \$/kW<sub>net</sub>

- Alt Çevrim olarak kondensasyonlu türbine sahip çift fazlı santral için 1490 \$/kW<sub>net</sub>

Bazı santraller için birim işletme ve bakım (O&M) maliyetleri aşağıdaki gibidir [3];

- Flaş sistem santraller için 0.0123 \$/kWh

- Binary sistem santraller için 0.0112 \$/kWh

### 3. BİR DEĞERE GETİRİLMİŞ MALİYETLER YÖNTEMİ İLE ENERJİ MALİYETİNİN BELİRLENMESİ

Bir santralde üretilen enerjinin maliyeti, seçilen bir tarihte hesaplanan yıllık sermaye masrafları, işletme ve bakım masrafları ve yakıt masrafları toplamının, yıllık elektrik üretim miktarına bölünmesi ile bulunur.

$$g = \frac{C_k + C_m + C_f}{E} \quad (1)$$

Burada,  $C_k$  yıllık sermaye masraflarını,  $C_m$  işletme ve bakım masraflarını,  $C_f$  yakıt masraflarını,  $E$  ise yıllık toplam elektrik üretim miktarını temsil etmektedir.

Jeotermal enerji santralleri için enerji maliyeti ise;

$$g = \frac{C_k + C_m}{E} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir.

Ekonomik yatırımlar faiz ve eskalasyon oranlarından etkilenmektedirler. Bu nedenle, santralde üretilen elektrik maliyetinin daha doğru olarak hesaplanması, santralin yapımı ve çalışma ömrü boyunca yapılan tüm masrafların referans bir tarihe getirilmiş toplamlarının, o santralin ömrü boyunca üreteceği elektrik enerjisine bölünmesi ile yapılır. Bu yöntemle bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi (levelized costs yöntemi) adı verilir.

“Levelized costs” metodu ile bulunan enerji maliyeti değeri, toplam enerji miktarı ile çarpıldığında bulunan meblağ, santral için yapılan tüm masrafların aynı tarihe getirilmiş değerine eşit olur. Bu metoda göre enerji üretim maliyeti aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [8];

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [C_k(t) + C_m(t) + C_f(t)] \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t) \cdot (1+r)^{-t}} \quad (3)$$

bu bağıntıda,  $C_k$  sermaye masrafını,  $C_m$  işletme ve bakım masrafını,  $C_f$  yakıt masrafını,  $E$  yıllık üretilen enerji miktarını,  $r$  iskonto oranını,  $t$  ise yılı temsil eder.

Jeotermal santrallerde yakıt giderleri olmadığı için Denk (3), aşağıdaki hale gelir.

$$g = \frac{\sum_{t=0}^n [C_k(t) + C_m(t)] \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n E(t) \cdot (1+r)^{-t}} \quad (4)$$

#### 4. TEK FLAŞLI JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİ İÇİN ENERJİ MALİYETİNİN BELİRLENMESİ

Flaş tipi jeotermal güç santralleri için birim tesis maliyeti saha geliştirme ve kuyu açma maliyetleri hariç 1485 \$/kW<sub>e</sub>'dir. Saha geliştirme ve kuyu açma maliyetleri de dahil edildiğinde santral birim maliyeti 2004 fiyatları ile 1988 \$/kW<sub>e</sub> olmaktadır [7-9].

İnşaatına 2005 yılında başlanan ve 5 yıllık inşaat süresi kabul edilerek 2010 yılında işletmeye açılması planlanan 20 MW<sub>e</sub> güç üretim kapasiteli bir tek flaşlı santralde üretilen elektrik maliyetinin belirlenmesi amacıyla bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Yapılan analizlerde kullanılan bazı karakteristik değerler Çizelge 3'de gösterilmektedir. Jeotermal santral için kapasite faktörü %90 alınmıştır.

Çizelge 3. Analizlerde kullanılan bazı değerler

Birim tesis maliyeti	1988 \$/kW <sub>e</sub>
Santral yük faktörü	0.90
Santral ömrü	25 yıl
Santralin inşa süresi	5 yıl
Faiz oranı	%6.8
Eskalasyon oranı	%5
İskonto Oranı	%8
Birim O&M Maliyeti	70 \$/kW <sub>e</sub> yıl

İnşaat süresince yapılacak yatırımın dağılımı aşağıdaki gibi kabul edilmiştir.

1. yıl: %20, 2. yıl: %30, 3. yıl: %30, 4.yıl: %15, 5.yıl: %5

Literatürde 20-30 MW güç üreten bir jeotermal santralin yapım süresinin 6 yıl olduğu belirtilmiştir [1]. Bu çalışmadaki analizlerde santralin yapım süresi 5 yıl olarak kabul edilmiştir

##### 4.1. Yıllık Sermaye Masrafları

Tek flaşlı jeotermal güç santralleri için birim tesis bedeli 1988 \$/kW olarak kabul edilebilir [9]. Birim tesis bedeli ile santralin fiziki inşaat tutarı ( $I_d$ ) aşağıdaki denklem ile bulunabilir;

$$I_d = C_s \times N_e \quad (5)$$

burada  $C_s$  birim tesis bedelini,  $N_e$  ise santral kurulu gücünü temsil etmektedir.

## Energy Cost in Geothermal Power ...

Buna göre fiziki santral bedeli 2005 yılı itibari ile;  
 $1988 \times 20000 = 39\,760\,000\ \$$   
olmaktadır.

Santralin üretime geçeceği tarih olan 2010 yılındaki toplam yatırım bedelinin belirlenebilmesi için, inşaat süresi boyunca eskalasyon ve faiz yüklerinin doğru hesaplanması gerekir. Eskalasyon (e), inşaat periyodu süresince kullanılan malzeme, ekipman ve işçilik fiyatlarındaki artışlara denir. İnşaat süresince yapılacak yatırım harcamaları zaman içinde yayılacağından (5 yıl), inşaat periyodunda yapılan gerçek toplam harcama eskalasyon etkisiyle, inşaatın başlangıç tarihi için geçerli olan direkt inşaat bedelinden daha yüksek olacaktır. Yıllık eskalasyon oranı ve harcama modeli yardımıyla inşaat süresi içinde herhangi bir yıla ait eskalasyon yükü ve eskale edilmiş yıllık gerçek harcamalar belirlenebilir. Belirtilen eskalasyon yükleri Çizelge 4’de görüldüğü gibi olmaktadır.

Çizelge 4. İnşaat Süresince Eskalasyon Hesabı

Yıl Sonu	Eskalasyon Periyodu	Harcama Dağılımı %	Eskalasyonsuz Harcama Planı (M\$)	Eskale edilmiş Harcama Planı (M\$)	Eskalasyon Yükü (M\$)
2005	1	20	7.952	8.350	0.387
2006	2	30	11.92	13.15	1.223
2007	3	30	11.92	13.80	1.880
2008	4	15	5.964	7.249	1.285
2009	5	5	1.988	2.537	0.549
<b>TOPLAM</b>		<b>100</b>	<b>39.76</b>	<b>45.09</b>	<b>5.335</b>

e=%5

İnşaat yılları boyunca yapılan yıllık harcamaların kredi olarak alındığı düşünülürse, inşaat periyodunun sonunda toplam eskale edilmiş harcama miktarına ilave olarak bir faiz yükünün de geri ödenmesi gerekmektedir. İnşaat süresi boyunca faiz yükleri ve inşaat bitimindeki toplam yatırım maliyeti Çizelge 5’ de görülmektedir.

Çizelge 5. İnşaat Süresince Faiz Hesabı

Yıl Sonu	Faiz Periyodu	Eskale Edilmiş Harcama (M\$)	Eskale Edilmiş Harcama+Faiz (M\$)	Faiz Yükü (M\$)
2005	4	8.350	10.86	2.513
2006	3	13.15	16.02	2.869
2007	2	13.80	15.75	1.942
2008	1	7.249	7.742	0.492
2009	0	2.537	2.537	0
<b>TOPLAM</b>		<b>45.09</b>	<b>52.91</b>	<b>7.817</b>

i=%6.8

Çizelgede görüldüğü gibi, inşaat süresince yapılan yatırım harcamalarından dolayı eskalasyon ve faiz yükleri de dahil olmak üzere, santralin işletmeye geçiş tarihi (1.1.2010) itibariyle toplam kredi borcu 52.91 M\$ olmaktadır. İşletmeye başlama tarihindeki değeri P olan yatırımın sabit yıllık sermaye maliyeti;

$$C_k = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

bağıntısı ile bulunur.

Buna göre sermaye masrafı için kullanılan kredinin geri ödemesi, santralin işletmeye başlama tarihi olan 1.1.2010’da başlarsa, santral ömrü boyunca sabit yıllık sermaye masrafı,

$$C_k = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 52.91 \left[ \frac{0.068(1+0.068)^{25}}{(1+0.068)^{25} - 1} \right] = 4.459 M\$$$

olarak hesaplanır.

Jeotermal santralde yıllık ortalama elektrik enerjisi üretimi;

$$E = 8760 \times N_e \times L_f = 8760 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,90 = 157,7 \cdot 10^6 \text{ kWh/yıl}$$

olarak bulunur ( $L_f$  yük faktörü).

Geri ödeme periyodunda (n=25) yıl her yıl geri ödenecek sabit miktarın yıllara göre faiz ve ana para kısmı ile yıllık ödemelerin bu günkü (1.1.2010) değeri Çizelge 6'da görülmektedir.

**Çizelge 6.** Sabit Yıllık Sermaye Masrafı ve “Levelized Costs” Metodu ile Sermaye Maliyetinin Hesabı

							(M\$)
Yıl	t	Borç	Yıllık Faiz Ödemesi i=%6.8	Yıllık Anapara Ödemesi	Yıllık Sermaye Masrafı (C <sub>k</sub> )	(1+r) <sup>-t</sup> r = % 6.8	Bugünkü değer (1.1.2010)
2010	1	52.91	3.598	0.860	4.459	0.9259	4.129
2011	2	52.05	3.539	0.919	4.459	0.8573	3.823
2012	3	51.13	3.477	0.981	4.459	0.7938	3.540
2013	4	50.15	3.410	1.049	4.459	0.7350	3.277
2014	5	49.10	3.339	1.120	4.459	0.6806	3.035
2015	6	47.98	3.263	1.196	4.459	0.6302	2.810
2016	7	46.79	3.181	1.278	4.459	0.5835	2.602
2017	8	45.51	3.095	1.364	4.459	0.5403	2.409
2018	9	44.14	3.002	1.457	4.459	0.5002	2.231
2019	10	42.69	2.903	1.556	4.459	0.4632	2.065
2020	11	41.13	2.797	1.662	4.459	0.4289	1.912
2021	12	39.47	2.684	1.775	4.459	0.3971	1.771
2022	13	37.69	2.563	1.896	4.459	0.3677	1.640
2023	14	35.80	2.434	2.025	4.459	0.3405	1.518
2024	15	33.70	2.296	2.162	4.459	0.3152	1.406
2025	16	31.61	2.149	2.310	4.459	0.2919	1.302
2026	17	29.30	1.992	2.467	4.459	0.2703	1.205
2027	18	26.83	1.825	2.634	4.459	0.2502	1.116
2028	19	24.20	1.646	2.813	4.459	0.2317	1.033
2029	20	21.39	1.454	3.005	4.459	0.2145	0.956
2030	21	18.38	1.250	3.209	4.459	0.1987	0.885
2031	22	15.17	1.031	3.427	4.459	0.1839	0.820
2032	23	11.74	0.798	3.660	4.459	0.1703	0.759
2033	24	8.084	0.549	3.909	4.459	0.1577	0.703
2034	25	4.175	0.284	4.175	4.459	0.1460	0.651
<b>TOPLAM</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>58.56</b>	<b>52.91</b>	<b>111.4</b>	<b>---</b>	<b>47.60</b>

Çizelge 6'da görüldüğü gibi, 25 yıl boyunca ödenecek sabit yıllık sermaye masrafının bu günkü değeri;

$$\sum_{t=1}^{25} C_k(t) \cdot (1+r)^{-t} = 4,459 \cdot 10^6 \cdot (1+0.068)^{-t} = 47,60 M\$$$

olarak belirlenir.

## Energy Cost in Geothermal Power ...

Diğer taraftan;

$$\sum_{t=1}^{25} E(t).(1+r)^{-t} = 157,7.10^6.(1+0.068)^{-t} = 16,83.10^8 [kWh/ yıl]$$

olarak bulunur.

Buna göre, “levelized costs” yöntemine dayanan, birim enerji başına sermaye maliyeti ( $g_k$ );

$$g_k = \frac{47.60.10^9}{16.83.10^8} = 28,28 \text{ mills/kWh} \text{ olarak hesaplanır (1 \$ = 1000 mills).}$$

### 4.2. Yıllık İşletme ve Bakım (O&M) Masrafları:

Jeotermal santrallerde işletme ve bakım maliyeti, santralin yatırım maliyetinin %3 veya %4'ü civarındadır [7]. Bu çalışmada yapılan analizlerde birim işletme ve bakım maliyeti olarak 70 \$/kW<sub>e</sub> yıl değeri kabul edilmiştir.

Buna göre santralin yıllık işletme ve bakım masrafı,

$$C_m = 70 \times 2 \times 10^4 = 14.10^5 \text{ \$/yıl}$$

olarak bulunur. Hesaplanan bu O&M masraflarında ileriye yönelik reel eskalasyon olmadığı kabul edilerek, işletme ömrü boyunca O&M masraflarının bu günlük değeri Çizelge 7'de görülmektedir.

**Çizelge 7.** Levelized Cost Metodu ile O&M Maliyetinin Hesaplanması (M\$)

Yıl	t	Yıllık O&M Masrafı (C <sub>m</sub> )	Bu günlük Değeri	(1+r) <sup>-t</sup> r = % 6.8
2010	1	1.400	1.296	0.9259
2011	2	1.400	1.200	0.8573
2012	3	1.400	1.111	0.7938
2013	4	1.400	1.029	0.7350
2014	5	1.400	0.952	0.6806
2015	6	1.400	0.882	0.6302
2016	7	1.400	0.816	0.5835
2017	8	1.400	0.756	0.5403
2018	9	1.400	0.700	0.5002
2019	10	1.400	0.648	0.4632
2020	11	1.400	0.600	0.4289
2021	12	1.400	0.555	0.3971
2022	13	1.400	0.514	0.3677
2023	14	1.400	0.476	0.3405
2024	15	1.400	0.441	0.3152
2025	16	1.400	0.408	0.2919
2026	17	1.400	0.378	0.2703
2027	18	1.400	0.350	0.2502
2028	19	1.400	0.324	0.2317
2029	20	1.400	0.300	0.2145
2030	21	1.400	0.278	0.1987
2031	22	1.400	0.257	0.1839
2032	23	1.400	0.238	0.1703
2033	24	1.400	0.220	0.1577
2034	25	1.400	0.204	0.1460
<b>TOPLAM</b>		<b>35</b>	<b>14.94</b>	----



Çizelge 7'den anlaşıldığı gibi 25 yıl boyunca yıllık O&M masraflarının bu günkü (1.1.2010) değeri 14,94 M\$'dir.

Buna göre "bir değere getirilmiş maliyetler" yöntemi ile enerjinin birim elektrik enerjisi başına işletme ve bakım (O&M) maliyeti ( $g_m$ );

$$g_m = \frac{14,94 \cdot 10^9}{16,83 \cdot 10^8} = 8,879 \text{ [mills / kWh]}$$

### 4.3. Toplam Enerji Maliyeti

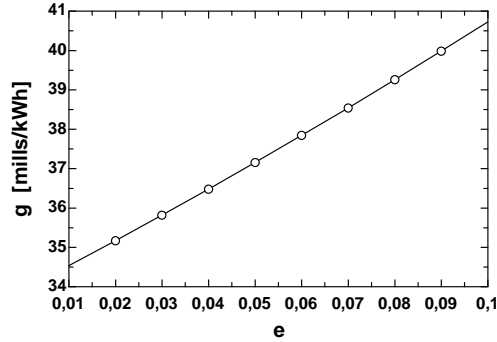
Yapılan tüm bu hesaplamalar sonucunda, "bir değere getirilmiş maliyetler" yöntemine göre jeotermal santralde üretilen enerjinin birim maliyeti ( $g$ );

$$g = g_k + g_m = 28,28 + 8,879 = 37,16 \text{ mills/kWh}$$

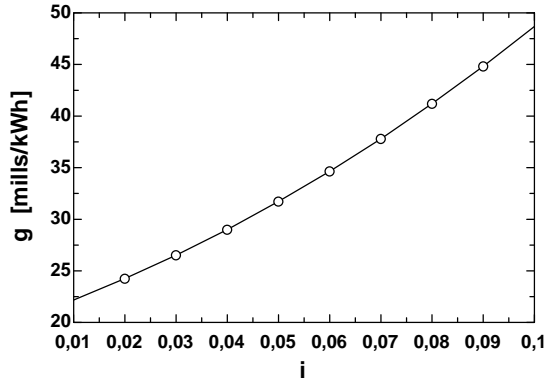
olarak belirlenmektedir.

Eskalasyon oranı ve faiz oranının birim enerji maliyetine etkileri, sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterildiği gibidir.

Elektrik santrallerinde santral gücü arttıkça birim elektrik üretim maliyeti azalır. Bu çalışmada incelenen tek flaşlı güç santrali için de aynı karakteristik durum gözlenmektedir. Buna göre güç ile birim elektrik üretim maliyeti arasındaki değişim Şekil 3'de gösterildiği gibi olmaktadır.

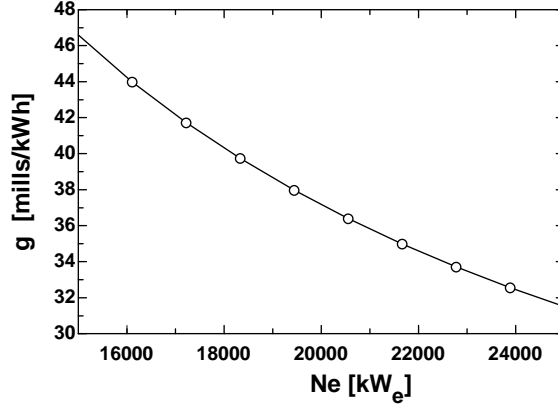


Şekil 1. Eskalasyon oranının birim enerji maliyeti ile değişim grafiği ( $i=0.068$ ,  $N_e=20$  MW)



Şekil 2. Faiz oranının birim enerji maliyeti ile değişimi ( $e=0.05$ ,  $N_e=20$  MW).

### Energy Cost in Geothermal Power ...



Şekil 3. Tek flaşlı santrallerde birim elektrik üretim maliyetinin santral gücüne bağlı değişimi (i=0.068, e=0.05)

### 5. SONUÇLAR

Bir değere getirilmiş maliyetler yöntemi kullanılarak jeotermal santrallerde enerji üretim maliyetinin güç ve kredi faiz oranına bağlı değişimleri Şekil 2 ve Şekil 3'teki grafiklerde görüldüğü gibi belirlenmiştir. Buna göre;  $Ne=20 \text{ MW}_e$  ve  $\%1 < i < \%10$  aralığı için birim enerji üretim maliyeti  $22 < g < 48$  mills/kWh arasında değişmektedir. Üretim maliyetinin güce bağlı değişimi ise  $i=\%6,8$  ve  $15 < Ne < 48 \text{ MW}_e$  aralığı için  $47 > g > 32$  mills/kWh aralığında olmaktadır. Bu sonuçlara göre jeotermal enerji santrallerinin üretim maliyeti, orta ve büyük güçlü konvansiyonel doğal gaz ve kömür yakıtlı santrallerin üretim maliyetlerine yakın olmaktadır. Ancak fosil yakıt kaynaklı konvansiyonel santrallerin enerji üretim maliyet hesabında çevresel etki maliyetleri de dikkate alınırsa, jeotermal santrallerin, enerji üretim maliyeti yönünden oldukça avantajlı olduğu belirtilebilir.

### KAYNAKLAR

- [1] Stefansson, V., "Investment Cost for Geothermal Power Plant", Geothermics, 31, 263-272, 2002
- [2] Altseimer, J.H, Edeskuty, F.J, Taylor, W.B., et.al., "Evaluation of the St. Lucia Geothermal Resource: Engineering Investigation and Cost Estimate", Los Alamos National Laboratory Report, 1984.
- [3] Prairie, M., Glowka, D., 2000, "Diagnostic-While-Drilling: Reducing The Cost of Geothermal Produced Electricity", Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu, Japan, 2000, Mayıs 28-Haziran 10, 2393-2397.
- [4] Battocletti L., "Financing Geothermal Energy Development: Opportunities & Challenges", National Conference on Sustainable Energy. USA, 2003
- [5] Gawlik, K., Kutscher, C., "Investigation of the Opportunity for Small-Scale Geothermal Power Plants in the Western United States", National Renewable Energy Laboratory Report, 2000.
- [6] Lewis, W. "Considerations in Two-Phase Geothermal Gathering System", POWER Engineers Inc. Idaho, USA. <http://www.unep.org>
- [7] Hudson, R., 1995, "Electricity Generation", Geothermal Energy, Editorler: Dickson, M., Fanelli, M., John Wiley and Sons, England, 1995, 39-71.

- [8] Şahin B., Aybers N., “Enerji Maliyeti”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, No:299, İstanbul, 1995, 92-122.
- [9] Del Chiaro, B. (2004) “Clean and Affordable Power”, Environment California Research and Policy Center. <http://www.environmentcalifornia.org>