

## BURSA VE ÇEVRESİNDE JEOTERMAL ENERJİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

*Akın Burak ETEMOĞLU\**

*Mustafa Kemal İŞMAN\**

*Muhiddin CAN\**

**Özet:** Jeotermal enerji yerküreden alınan ısıdır. Jeotermal enerji konutların merkezi ısıtılması ve soğutulmasında, sıcak su temininde, sera ısıtılmasında, kaplıca amaçlı olarak, kimyasal madde ve elektrik üretiminde v.b. kullanılabilir. Jeotermal enerji; yenilenebilir, ucuz, düşük teknoloji seviyeli ve çevreyi kirliletmeme avantajlarına sahiptir.

Bu makalede, Bursa ve çevresinde jeotermal enerjinin değişik amaçlar için kullanılabilirliği incelendi. Bu çalışmada ele alınan kaynakların ekonomik katkısının yaklaşık yıllık 1200000 YTL olduğu belirlendi. Ayrıca, termodinamiğin ikinci kanunu ile jeotermal kaynakların analizi verildi. Bu analizde, giriş şartları 161 kPa basınç, 102.2°C sıcaklık ve 60.1 kg/s kütleli debideki bir jeotermal kaynak ele alınarak organik Rankine çevriminde (ORÇ) incelendi. İş yapan akışkan olarak isopentanin kullanıldığı bu sistemde en büyük tersinmezlik oranının %43 ile buharlaştırıcıda olduğu hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** Jeotermal kaynaklar, ekserji analizi, kullanılabilirlik, yenilenebilir enerji.

### Investigation Into the Availability of the Geothermal Energy in Bursa And Its Vicinity

**Abstract:** The geothermal energy is heat from the Earth. It can be used for district heating and cooling, greenhouse, sanitary hot water requirements, thermal spring, production of chemical substances and production of electrical energy etc. The advantage of the geothermal energy is renewable, cheap, simple technological level and zero environmental impact respectively.

In this paper, the availability of the geothermal energy in Bursa and its vicinity is examined. Economical contribution of investigated resources in this study is determined as approximately 1200000 YTL per year. Analysis of geothermal resources with the second law of thermodynamics is also given. A geothermal resource which has the inlet conditions of 161 kPa pressure, 102.2°C temperature and 60.1 kg/s mass flow rate is examined by organic Rankine cycle (ORC). The greatest portion of the irreversibility rate of the system in which isopentane is used as a working fluid is calculated as 43% in evaporator.

**Key Words:** Geothermal resources, exergy analysis, availability, renewable energy.

#### Simgeler Dizini

|           |                           |
|-----------|---------------------------|
| e         | : özgül ekserji (kJ/kg)   |
| h         | : özgül entalpi (kJ/kg)   |
| $\dot{m}$ | : kütleli debi (kg/s)     |
| s         | : özgül entropi (kJ/kgK)  |
| $\dot{E}$ | : ekserji (kW)            |
| I         | : tersinmezlik (kW)       |
| ORÇ       | : organik Rankine çevrimi |
| P         | : basınç (kPa)            |
| T         | : sıcaklık (°C)           |
| W         | : iş (kW)                 |
| $\eta$    | : verim (%)               |

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa.

### ***Alt İndis***

|    |                |
|----|----------------|
| ç  | : çıkış        |
| g  | : giriş        |
| o  | : ölü hal      |
| tr | : tersinir     |
| II | : ikinci kanun |

### ***Üst İndis***

: birim zamandaki miktar

## **1. GİRİŞ**

Dünya’da ve ülkemizde nüfus artışı, sanayileşme, yatırımların büyümesi ve yaşam standartlarının yükselmesi enerji alanındaki teknolojik ve bilimsel çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Enerji bugün uluslararası bir sorun haline gelmiştir. Diğer taraftan, enerji harcamaları önümüzdeki yıllarda da hem kamu ve özel kurum ve kuruluşlarda hem de aile bütçesinde önemli bir yer tutmaya devam edecektir.

Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının belli bir süre içinde bitecek olması ve yeni rezervlerin üretiminin oldukça pahalı olması, alternatif yeni kaynakların bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu konuda başta AB ülkeleri ile ABD ve Japonya gibi gelişmiş dünya ülkeleri araştırma-geliştirme (AR-GE) çalışmalarına oldukça yüksek miktarlarda maddi kaynak ayırmaktadırlar. Bilim adamları alternatif enerji kaynakları ile ilgili çalışmalarda, sırası ile üretilen enerjinin ekonomik olması, uzun vadede enerji açığını büyük ölçüde kapatması, ülkeyi enerji açısından dışa bağımlılıktan kurtarması ve çevreyi en az şekilde kirletmesi konularını göz önünde bulundurmaktadır. Ülkemiz açısından yukarıda belirtilen hususlar dikkate alındığında alternatif enerji kaynaklarının önemi ortaya çıkmaktadır.

Jeotermal enerji, yer kabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaların içerisindeki ısı enerjisidir. Bir başka deyişle, jeotermal enerji yerküre ısı enerjisi olarak da tanımlanabilir. Yerkürenin merkezi çok sıcak olduğundan, ısı yüzeye doğru akmakta ve dolayısıyla yüzeyden derine doğru inildikçe sıcaklık artmaktadır. Yer merkezine doğru ortalama sıcaklık artışı 30°C/km’dir. Sıcaklık artışı termal olmayan bölgelerde 10-40°C/km, semitermal bölgelerde 70°C/km, hipotermal bölgelerde ise 70°C/km değerinden fazladır (Lund ve diğ., 1998). Deprem kuşakları ve volkanik bölgelerde, yerkabuğunun zayıf noktalarında yüzeye yakın kısımlara sokulmuş magma nedeniyle yukarıda bahsedilen değerlerin çok üzerinde bir sıcaklık değişimi gözlenir. Ayrıca, yoğun radyoaktivite, sedimentasyon sırasında oluşan kimyevi tepkimelerde jeotermal sıcaklık değişiminin yükselme sebebi olabilir.

Yerküre ısı kaynaklarının başlıcaları; yerküre içerisindeki radyoaktif maddelerin bozunumu, ekzotermik kimyevi tepkimeler, yerküre büzülmeleri, faylanmanın ortaya çıkardığı sürtünme enerjisi, ergimiş kayaların soğuması ile meydana gelen kristal ve katılaşma gizli ısılarıdır.

Jeotermal akışkanı meydana getiren sular, genellikle meteorik kökenli olduklarından yeraltındaki rezervuarlar sürekli beslenmekte ve kaynak yenilenebilmektedir. Bu sebeple pratikte beslenmenin üzerinde kullanma olmadıkça jeotermal kaynakların azalması söz konusu değildir (Dickson ve Fanelli, 1995).

Ekserji kavramı jeotermal enerji sistemleri için ilk kez Bodvarsson ve Eggers (1972) tarafından kullanılmış ve çalışmada farklı kaynak sıcaklıkları için ekserji değerleri hesaplanmıştır. Brook ve diğ. (1979) ise 150°C sıcaklığın üzerindeki jeotermal kaynaklara ekserji kavramını uygulamışlardır.

Kanoğlu (2002) 12.4 MW gücündeki bir jeotermal güç santralının enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiş, sistemin ana noktalarındaki ekserji ve tersinmezlik değerlerini tespit ederek sistemin ikinci kanun verimini %29.1 olarak belirlemiştir.

Çerci (2003) ise 11.4 MW gücündeki Denizli jeotermal güç santralini ele alarak tesisin ana noktalarındaki ekserji değerlerini sunmuş ve tesisteki en büyük tersinmezlik değerinin jeotermal akışkanın Menderes Nehri’ne atılmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Ayrıca, benzer diğer jeotermal güç santralleri ile karşılaştırıldığında, ele alınan tesisin %20.1 olan ikinci kanun veriminin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

Hepbaslı ve Akdemir (2004), toprak kaynaklı (jeotermal) ısı pompalarının konvansiyonel sistemlere göre varolan avantajlarına dikkat çekerek, ısıtma ve soğutma işlemleri için uygun bir alternatif olduğunu belirtmiş ve bu tip bir sistem için deneysel destekli enerji-ekserji analizi gerçekleştirmiştir.

Dağdaş ve diğ. (2005), Kanoğlu (2002)'deki tesisi tekrar ele alarak tesisin verim değerlerini artırma alternatiflerini sunmuşlardır. Çalışma neticesinde kombine çevrim ile tesisin ikinci kanun veriminin %38.58'e ve iş yapan akışkan olarak isobütan kullanıldığında elde edilebilecek gücün 18.2 MW'a ulaşabileceği belirtilmiştir.

Özgener ve diğ. (2005) İzmir-Balçova jeotermal enerji kaynaklı merkezi ısıtma sistemini inceleyerek enerji ve ekserji değerlerini hesaplamışlardır. Ekserji akış diyagramları aracılığıyla pompa, ısı eşanjörü, re-enjeksiyon ve dağıtım kayıplarını, tersinmezlik değerlerini ve oranlarını sunmuşlardır. Optimizasyon neticesinde sistemin ısıl ve ikinci kanun verimlerini sırasıyla %41.9 ve %46 olarak tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, jeotermal enerjinin temel avantajları, Bursa'da jeotermal enerjinin tarihi gelişimi ve değişik amaçlarla kullanılabilirliği incelenmiştir.

## 2. JEOTERMAL ENERJİNİN KULLANIM ALANLARI VE TEMEL AVANTAJLARI

Jeotermal kaynaklar genellikle içerdiği ısı enerjisi ve kimyasal maddeler nedeniyle değerlendirilir. Jeotermal enerjinin akışkan sıcaklığına göre başlıca faydalanılma alanları şunlardır:

1. Isı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi,
2. Doğrudan ısı enerjisinden endüstriyel amaçlı ısıtma ve kurutma işlemlerinde yararlanılması (şeker, tekstil, kağıt, ilaç, konservecilik vb. ürünlerde),
3. Merkezi sistemle ısıtma ve soğutmada kullanımı (sera, toplu konut, kampüs vb. ısıtılması veya soğutulması),
4. Kimyasal madde üretimi (tatlı su, mineral ve kimyasal tuz üretimi vb),
5. Turistik ve tedavi amaçlı kaplıca, yüzme havuzu ve turistik tesislerde kullanımı (Can 1994, Lund ve ark. 1998).

Tablo 1'de değişik sıcaklıklardaki jeotermal akışkanların kullanım alanları özetlenmiştir.

**Tablo 1.**  
**Jeotermal Akışkanların Sıcaklıklarına Göre Değerlendirilmesi**

| Sıcaklık (°C) | Değerlendirme Şekli   |
|---------------|---|
| 180           | Yüksek konsantrasyondaki solüsyonun buharlaştırılması, amonyak absorpsiyonu ile soğutma           |
| 170           | Ağır su (D <sub>2</sub> O : döteryumoksit), ve hidrojen sülfid eldesi, di-atomitlerin kurutulması |
| 160           | Kereste kurutulması, balık vb. yiyeceklerin kurutulması   |
| 150           | Bayer's yoluyla alüminyum ve diğer kimyasal maddeler eldesi                                       |
| 140           | Çiftlik ürünlerinin çabuk kurutulması (konservecilik)   |
| 130           | Şeker endüstrisi, tuz eldesi  |
| 120           | Temiz su eldesi, tuzluluk oranının artırılması  |
| 110           | Kerestecilik, çimentonun kurutulması  |
| 100           | Organik maddelerin kurutulması (et, sebze, yosun vb.)   |
| 90            | Balık kurutma, yün yıkama ve kurutma  |
| 80            | Ev ve sera ısıtılması   |
| 70            | Soğutma (alt sıcaklık sınırı)   |
| 60            | Sera, kümes ve ahır ısıtılması  |
| 50            | Mantar yetiştirme, balneolojik banyolar (kaplıca)   |
| 40            | Toprak ısıtma, kent ısıtması (alt sınır), tedavi amaçlı kaplıca tesisleri                         |
| 30            | Yüzme havuzları, fermantasyon, damıtma, ısı pompası aracılığıyla ev, şehir ısıtılması             |
| 20            | Balık çiftlikleri   |

Jeotermal enerjinin temel avantajları ise şunlardır:

1. Jeotermal enerjinin öncelikle, birden çok amaca gerekirse aynı anda hizmet etmesi, çevre ve ekonomik açıdan sahip olduğu önemli avantajlarının başında gelmektedir.
2. Jeotermal kaynaklar, yeraltındaki rezervuarlar tarafından sürekli beslenmekte, ayrıca kullanılan jeotermal akışkanın yeraltına tekrar basılmasıyla (re-enjeksiyon) kaynak yenilenebilmektedir.

3. Diğer enerji kaynaklarına göre oldukça ekonomiktir. Doğal ve kendi kaynağımız olan jeotermal enerji dışı bağımlı değildir ve politik ilişkilerden etkilenmez. Büyük yatırımlar gerektirmeyip, yapılan yatırımı kısa sürede geri ödeyebilmesi ekonomik yararlılığının bir başka yönüdür.
4. İhtiyaç duyduğu düşük teknoloji seviyesi nedeniyle jeotermal enerjiye yapılacak yatırımı cazip kılmaktadır.
5. Jeotermal enerjinin kullanılması ile havaya karbonmonoksit, azot oksitler ve kükürt oksitler atılmamakta ve çevre kirletilmemektedir (Can 1994, Lund ve ark. 1998).

### 3. BURSA'DA JEOTERMAL ENERJİNİN TARİHİ GELİŞİMİ

Alp-Himalaya kuşağında yeralan İtalya, Yunanistan, Tibet ve Çin Halk Cumhuriyeti ile beraber ülkemiz de oldukça yüksek jeotermal potansiyeline sahiptir. Türkiye, ısıtma amaçlı jeotermal enerji potansiyeli ile dünyada ilk yedi ülke arasına girmektedir (Anonim, 1996; Anonim, 2001). Bugün ülkemizde 600-1200 arası hidromineral ve termomineral kaynaklar mevcuttur. Yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar genellikle Batı Anadolu, düşük ve orta sıcaklıklı kaynaklar ise Orta ve Doğu Anadolu'dadır (Akkuş ve diğ., 1998).

Bursa jeotermal enerji kaynakları bakımından zengin illerimizden birisidir. Özellikle Bursa'daki sıcak su kaynakları tedavi amaçlı kaplıçalarda ve turistik tesislerde kullanılmaktadır. Jeolojik olarak çok eski tarihlere uzanmakla Bursa'da kaplıcaların halka mal edilmesi Bizans İmparatorluğu dönemine rastlar. Bugün Çekirge olarak bilinen bölgede "Piti" adında bir su kenti kuran Bizanslılar, Justinianus döneminde buraya görkemli bir saray ile büyük bir hamam yaptırmışlardır.

Osmanlı İmparatorluğunun ilk başkenti olan Bursa, bu önemli özelliğini korumuş, padişah, devlet adamları ve yüksek rütbeli askerler de dahil olmak üzere sağlık, yenilik ve dinlenme arayışında olan tüm halk kitlelerinin uğrak yeri olmuştur.

Jeotermal enerji ile ilgili ilk araştırmalar genellikle sıcak su kaynaklarının bulunduğu bölgelere yönelmiştir. Ülkemize yeni enerji kaynakları kazandırmayı amaç edinen bu araştırmalarla ilgili olarak MTA jeofizik rezistivite ekibi jeotermik enerji yönünden Bursa kenti sıcak su kaynaklarını da içine alan bir sahayı incelemişlerdir. Etüdün amacı, jeolektrik parametrelerin sıcaklıkla değişiminden yararlanarak jeotermal akışkanı içeren rezervuar kayacın durumun belirlemek ve tektonik yapıyla olan ilişkisini ortaya koymaktır (Erişen ve Öngör, 1976). Etüt sahası, Uludağ'ın kuzey yamaçlarındaki ovaya uzanan sırtlar ve vadiler, vadi ağzlarındaki birikinti konileri, Bursa kentinin kuzeybatı bölümündeki Çekirge, Muradiye, Hürriyet, Çirışhane gibi yoğun yerleşme merkezlerini de içine alan bir sahayı içermektedir.

#### 3.1. Hidrojeoloji ve Jeotermal Sistem

##### 3.1.1. Akarsular

Etüt sahasının tek akarsuyu Nilüfer çayı ve kollarıdır. DSİ tarafından yapılan ölçümlere göre Nilüfer çayının azami debisi  $355 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Düşündürücü boyutlara ulaşmış kirliliğiyle Nilüfer çayında bu debiye bugün ulaşmak mümkün değildir.

##### 3.1.2. Adi Su Kaynakları

Etüt sahasındaki adi soğuk su kaynakları, Uludağ metamorfik şistlerinden, Karakaya formasyonundan, Kalabakkaya formasyonundan, neojenin kumtaşı, konglomera (çakıllı kaya) ve gölsel kireçtaşı seviyelerinden, kuvaternere ait travertenlerden birikinti konilerden ve yamaç molozlarından yüzeye çıkarlar. Yapılan analizlerden  $\text{Ca-HCO}_3$  içerdikleri anlaşılan bu soğuk su kaynaklarının debileri 0.1-50 lt/s arasında değişmektedir.

##### 3.1.3. Sığ Kuyular ve DSİ Sondaj Kuyuları

Bursa ovasının büyük kısmı artezyen sahasıdır. Ovada halk tarafından basit usullerle açılan kuyuların derinlikleri 5-150 m arasında değişmektedir. Artezyen basıncına genel olarak 50 m'den derin kuyularda erişilmektedir. Bursa ovasında 1966 yılında 2.4-5.1 lt/s debilerinde ve derinlikleri 20-300 m arasında değişen kuyular açılmıştır. Bu kuyulardan elde edilen sular merkezi bir üniteden Çekirge'nin güneyindeki depolara sevk edilmekte ve buradan şehre verilmektedir. Şehrin temiz su ihtiyacı büyük oranda Doğancı, Demirtaş ve Hasanağa Barajlarından sağlanmaktadır.

### 3.1.4. Sıcak Su Kaynakları

Etüt sahasındaki sıcak su kaynakları üç grupta toplanabilir:

#### 1. Çekirge Grubu Sıcak Su Kaynakları

Bu kaynakların suları Çekirge bölgesinde resmi ve özel kuruluşlara ait otel, hastahane ve banyolarda kullanılmaktadır. Vakıfbahçe kaynağından alınan sıcak su 2 km'den fazla izole edilmiş bir boru ile Çelik Palas oteline verilmektedir. Bu boru hattı boyunca sıcaklık kaybının 4°C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgede özel şahıslarca yaptırılan ve 60 m derinliğe kadar inen sondajlardan elde edilen sıcak sular banyolarda ve binaların kalorifer sistemlerinde kullanılmaktadır. Çekirge grubu sıcak su kaynaklarının sıcaklıkları Tablo 2'de görüldüğü gibi düşüktür. Bu bölümdeki hesaplamalarda 26.04.2005 tarihli birim fiyatlar ve değerler kullanılmış, ayrıca bir evin ısı ihtiyacı olarak yaklaşık 10000 kcal/h kabul edilmiştir.

**Tablo 2.**  
**Çekirge Grubu Sıcak Su Kaynaklarına Ait Değerler ve Ekonomik Katkı Miktarı**

| Kaynak        | Sıcaklık<br>°C | Debi<br>lt/s | Isıl Kapasite<br>kcal/h | Yıllık Yakıt Eşdeğeri<br>m <sup>3</sup> /yıl | Yıllık Kazanç<br>YTL/yıl | Isıtılabilecek<br>Konut Sayısı |
|---------------|----------------|--------------|-------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Vakıfbahçe    | 49,5           | 2,00         | 140400                  | 65876,83                                     | 20388,88                 | 14                             |
| Zeyni Nine    | 46,0           | 2,33         | 134200                  | 62967,74                                     | 19488,52                 | 13                             |
| Küplüce       | 42,0           | 0,30         | 12960                   | 6080,94                                      | 1882,05                  | 1                              |
| Garıpler Altı | 39,0           | 1,70         | 55080                   | 25843,99                                     | 7998,71                  | 6                              |
| Rıfat Bey     | 33,0           | 2,50         | 72000                   | 33782,99                                     | 10455,84                 | 7                              |
| Aydın Sülmen  | 28,0           | 0,30         | 8640                    | 4053,96                                      | 1254,70                  | ---                            |
| SSK           | 33,0           | 1,00         | 46800                   | 21958,94                                     | 6796,29                  | 5                              |
| Horhor        | 42,0           | 2,50         | 159000                  | 74604,11                                     | 23089,97                 | 16                             |
| Ethem Efendi  | 36,0           | 2,35         | 93060                   | 43664,52                                     | 13514,17                 | 9                              |
| Havuzlu Park  | 38,0           | 6,50         | 304200                  | 142733,14                                    | 44175,91                 | 30                             |
|               |                |              |                         | TOPLAM                                       | 149045,03                | 101                            |

Bu hesaplamalar neticesinde Çekirge grubu sıcak su kaynaklarından yılda yaklaşık 150000 YTL ekonomik değer elde edilebileceği tespit edilmiştir.

#### 2. Kaynarca Grubu Sıcak Su Kaynakları

Bu kaynaklarda benzer olarak kaplıca otellerinde banyolarında ve kalorifer sistemlerinde kullanılmaktadır. Tablo 3'ten görülebileceği gibi bu grubun kaynak sıcaklıkları ve debileri oldukça yüksek olup yaklaşık yıllık 351000 YTL ekonomik değer elde edilebilecektir.

**Tablo 3.**  
**Kaynarca Grubu Sıcak Su Kaynaklarına Ait Değerler ve Ekonomik Katkı Miktarı**

| Kaynak          | Sıcaklık<br>°C | Debi<br>lt/s | Isıl Kapasite<br>kcal/h | Yıllık Yakıt Eşdeğeri<br>m <sup>3</sup> /yıl | Yıllık Kazanç<br>YTL/yıl | Isıtılabilecek<br>Konut Sayısı |
|-----------------|----------------|--------------|-------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Kaynarca        | 82,5           | 8,50         | 1453500                 | 681994,13                                    | 211077,18                | 145                            |
| Kara Mustafa    | 59,0           | 3,50         | 302400                  | 141888,56                                    | 43914,51                 | 30                             |
| Kükürtü         | 79,0           | 2,00         | 316800                  | 148645,16                                    | 46005,68                 | 32                             |
| Muhittin Baha   | 79,0           | 0,80         | 126700                  | 59448,68                                     | 18399,37                 | 13                             |
| Eşref Efendi    | 56,0           | 1,00         | 75600                   | 35472,14                                     | 10978,63                 | 8                              |
| Mevlevi Şeyhi   | 35,0           | 1,00         | 36000                   | 16891,50                                     | 5227,92                  | 4                              |
| Bekarlar Hamamı | 51,5           | 1,00         | 59400                   | 27870,97                                     | 8626,06                  | 6                              |
| Sıcaksu Çeşmesi | 48,0           | 1,00         | 46800                   | 21958,94                                     | 6796,29                  | 5                              |
|                 |                |              |                         | TOPLAM                                       | 351025,64                | 243                            |

### 3. Bursa Çevresindeki Sıcak Su Kaynakları

Tablo 4'ten görüldüğü gibi Bursa ve çevresinde oldukça zengin jeotermal enerji kaynakları vardır. Özellikle Yalova ve Oylat (İnegöl)'de bulunan sıcak sudan yeterince yararlanılamamaktadır. Bu grup üzerinde detaylı çalışma yapılmalıdır.

**Tablo 4.**  
**Kaynarca Grubu Sıcak Su Kaynaklarına Ait Değerler ve Ekonomik Katkı Miktarı**

| Kaynak           | Sıcaklık<br>°C | Debi<br>lt/s | Isıl Kapasite<br>kcal/h | Yıllık Yakıt Eşdeğeri<br>m <sup>3</sup> /yıl | Yıllık Kazanç<br>YTL/yıl | Isıtılabilecek<br>Konut Sayısı |
|------------------|----------------|--------------|-------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| Armutlu (Gemlik) | 75,0           | 4,16         | 599040                  | 281074,49                                    | 86992,55                 | 60                             |
| Gemlik Ilıca     | 36,0           | 8,63         | 32868                   | 15421,94                                     | 4773,09                  | 3                              |
| Yalova           | 65,0           | 20,30        | 2249640                 | 1055549,56                                   | 326692,59                | 225                            |
| Oylat (İnegöl)   | 40,5           | 50,00        | 1890000                 | 886803,52                                    | 274465,69                | 189                            |
|                  |                |              |                         | TOPLAM                                       | 692923,92                | 477                            |

Diğer taraftan, etüt sahasının jeotermal enerji sahası olduğunu gösteren ısıtıcı bir kaynak, rezervuar kayaç ve örtü kayaç gibi üç temel unsurda bölgede bulunmaktadır. Sahadaki sıcak su kaynakları ve bunlara bağlı oluşan traverten sinter gibi çökeltiler ve sıcak suların jeokimyasal analizleri etüt sahasında derin orijinli bir ısıtıcının ve jeotermal bir aktivitenin varlığını göstermektedir. Etüt Geoscience firmasına ait (ABD) 5 kW'lık bir transmitter, TOA (Japonya) firmasına ait bir kaydedici ve bir jeneratörden oluşan rezistivite cihazıyla başlatılmış, daha sonra MTA Enstitüsü jeofizik laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan DR-5 derin rezistivite cihazıyla tamamlanmıştır (Erişen ve Öngör, 1976).

### 4. İKİNCİ KANUN İLE JEOTERMAL KAYNAKLARIN ANALİZİ

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin niceliğiyle ilgilidir. Bu kanun, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve enerjinin var veya yok edilemeyeceğini belirtir. Termodinamiğin ikinci kanunu ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir. Bir hal değişimi sırasında enerjinin mevcut niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma imkanının değerlendirilememesi bu yasanın inceleme alanı içindedir. Proses analizlerinde termodinamiğin birinci kanununun yukarıda belirtilen yetersizliği, ikinci kanuna dayanan ekserji (kullanılabilir enerji miktarı-kullanılabilirlik) analizlerini önemli kılmakta ve dolaşısıyla, termodinamiğin ikinci kanunu, sistemlerin optimizasyonu için güçlü bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kullanılabilirlik, bir sistemin sahip olduğu enerjisiyle iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilmektedir. Bir sistemden mümkün olan en yüksek işi elde edebilmek için, sistemin sabit olan ilk halinden, hal değişimi sonunda, sistemin ölü noktasına gelmesi gereklidir. Ölü hal, sistemin çevresiyle termodinamik açıdan denge durumunda bulunması demek olup, ölü haldeyken sistemlerden elde edilebilecek yararlı iş potansiyelinin sıfır olduğu açıktır. Dolayısıyla, bir sistem, doğal çevrenin temel elemanları ile tersinir bir hal değişimi sonucu termodinamik denge durumuna (ölü hale) getirildiğinde elde edilebilecek iş miktarı, o sistem için ekserji değerine karşılık gelmektedir. Bu tanım, bir cihazın termodinamik yasalara karşı gelmeden yapabileceği işin üst sınırını belirler. İkinci yasa verimi, sürecin, tersinir hal değişimine ne kadar yakın olduğunu belirleyen bir kriterdir. Bu tanıma bağlı olarak, ikinci yasa verimi,

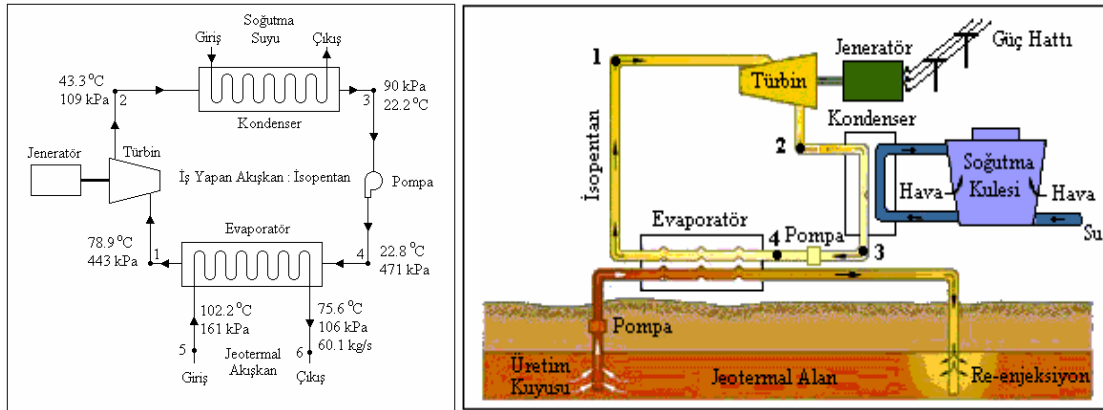
$$\eta_{II} = \frac{\text{Sistemden elde edilen kullanılabilirlik}}{\text{Sistemdeki kullanılabilir enerji miktarı}} \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir.

Ekserji analizi, ısı sistemlerinin tasarım, analiz, seçim ve sınıflandırmasında katkıda bulunacak etkin bir araçtır. Bu araçla elde edilebilecek yüksek verim, doğrudan işletme giderlerini azaltarak ekonomik katkı sağlayacaktır.

1960'ların başından beri Rankine çevrimleri aracılığıyla jeotermal kaynaklardan faydalanılarak elektrik üretilmektedir. Türkiye'deki büyük potansiyel düşünülerek, bu çalışmada, bir organik Rankine çevrimi (ORÇ) ile elektrik üretimi ele alınmıştır. Batı Anadolu'daki jeotermal kaynaklar sıcaklıklarına göre

ele alındığında %31'lik kısmı 90-120°C aralığındadır (Batık ve diğ., 2000). Bu sebeple analizde, sözkonusu sıcaklıklar aralığında çalışan bir tesis incelenmek üzere seçilmiştir. Türkiye'de bu şartlar altında çalışan bir tesisin bulunmaması nedeniyle Nevada, ABD'de faaliyet gösteren gerçek bir jeotermal tesisin verileri kullanılmıştır. Tesis verileri Kanoğlu ve Çengel (1998)'in yaptığı çalışmadan alınmıştır. Tesis şeması ve termodinamik özellikler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1.  
Güç Santralinin Şematik Görünümü

Rankine çevrimini oluşturan tüm elemanlar sürekli akışlı sürekli açık sistem (SASA) örnekleridir. SASA sistemleri için sürekli-rejim halinde tersinmezlik ya da diğer bir ifadeyle yitirilen iş yapabilme oranı ( $I$ ), tersinir iş ( $W_{tr}$ ) ile faydalı net iş ( $W_{net}$ ) arasındaki fark olarak

$$I = W_{tr} - W_{net} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot Q_j - W + \sum_g \dot{m}_g e_g - \sum_\varphi \dot{m}_\varphi e_\varphi \quad (2)$$

ifadesiyle hesaplanabilir (Çengel ve Boles, 1989; Moran ve Shapiro, 1995). Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmek şartıyla, herhangi bir haldeki özgül ekserji ( $e$ ) değeri ise

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada;  $h$  özgül entalpi (kJ/kg),  $s$  özgül entropi (kJ/kgK),  $T$  ise sıcaklık (K) olup,  $0$  indisi ölü şartları ifade etmektedir. Birim zamandaki ekserji ( $E$ ) değeri ise özgül ekserji ile kütleli debi çarpılarak bulunabilir.

$$E = \dot{m} \cdot e \quad (4)$$

Ele alınan iki kaynak arasında çalışabilecek en verimli makine Carnot makinesidir. Buradan hareketle, ikinci kanun (ekserji-kullanılabilirlik) verimi ( $\eta_{II}$ ) ise

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{W_{tr}} = \frac{\eta}{\eta_C} \quad (5)$$

olarak bulunabilir (Annamalai ve Puri, 2002).

Analizde, ölü hal şartı olarak, jeotermal tesisin kurulu olduğu bölgenin yıllık ortalama meteorolojik değerleri olan 13°C ve 84 kPa alınmıştır. Türbinden çevreye olan ısı geçişi miktarı ise 322 kW olarak kullanılmıştır (Kanoğlu ve Çengel, 1998). Tüm sistemlerin sürekli-rejimde çalıştığı, kimyasal reaksiyonların olmadığı, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ise ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edilmiştir. Tesisin ana noktalarındaki termodinamik özellikler ve ekserji değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Termodinamik özellikler, Engineering Equation Solver (EES) programı aracılığıyla belirlenmiştir.

Bu şartlar altında çalışan jeotermal kaynak destekli ORÇ sisteminin ana ünitelerinin tersinmezlik miktarları Denklem 2 aracılığıyla hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da ayrıca sistem elemanlardaki tersinmezlik miktarlarının toplam tersinmezliğe olan oranı da görülmektedir. Bu yolla, ORÇ sisteminin toplam tersinmezlik değerinde baskın olan sistem elemanları açıkça gözlenebilmektedir. Buharlaştırıcıda iş yapabilme kabiliyetinin diğer elemanlara göre daha fazla yitirildiği ve toplam içinde %43'lük bir paya sahip olduğu görülmektedir.

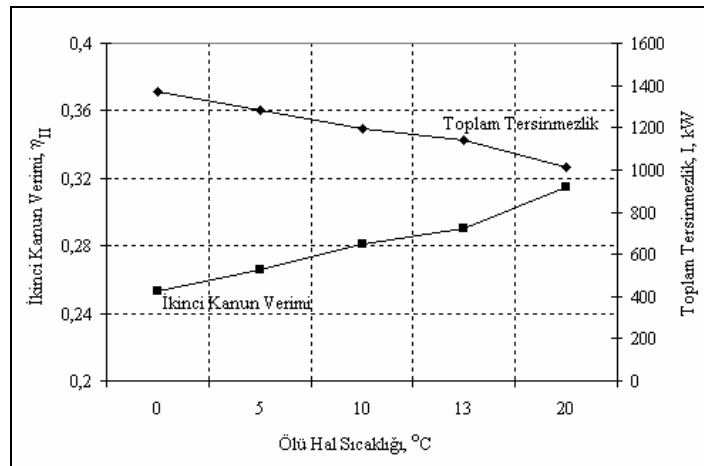
**Tablo 5.**  
**ORÇ Sisteminin Ekserji Değerleri**

| No | Akışkan      | P<br>(kPa) | T<br>(°C) | s<br>(kJ/kgK) | h<br>(kJ/kg) | e<br>(kJ/kg) | m<br>(kg/s) | E<br>(kW) |
|----|--------------|------------|-----------|---------------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| 0  | jeotermal su | 84         | 13        | 0.1951        | 54.63        | -            | -           | -         |
| 0  | isopentan    | 84         | 13        | -1.782        | -376.80      | -            | -           | -         |
| 1  | isopentan    | 443        | 78.90     | -0.4456       | 77.70        | 72.20        | 15.60       | 1126.00   |
| 2  | isopentan    | 109        | 43.30     | -0.452        | 25.69        | 22.03        | 15.60       | 343.70    |
| 3  | isopentan    | 90         | 22.2      | -1.711        | -356.40      | 0.3327       | 15.60       | 5.19      |
| 4  | isopentan    | 471        | 22.80     | -1.708        | -354.70      | 0.9838       | 15.60       | 15.35     |
| 5  | jeotermal su | 161        | 102.20    | 1.332         | 428.40       | 48.54        | 60.10       | 2917.00   |
| 6  | jeotermal su | 106        | 75.60     | 1.023         | 316.50       | 25.08        | 60.10       | 1507.00   |

**Tablo 6.**  
**ORÇ Sisteminin Tersinmezlik Değerleri**

| Ünite               | Isı Transferi/Güç (kW) | Tersinmezlik (kW) | Oran (%) |
|---------------------|------------------------|-------------------|----------|
| Buharlaştırıcı      | 6745                   | 492.0             | 43       |
| Türbin              | 489.3                  | 293.2             | 26       |
| Yoğuşturucu         | -5960                  | 338.6             | 30       |
| Pompa               | -26.04                 | 15.9              | 1        |
| Toplam Tersinmezlik |                        | 1139.7            |          |

İkinci kanun verimi, sistemden elde edilen net işin, o sistemden elde edilebilecek en yüksek iş oranı olarak tanımlıdır. Elde edilebilecek en yüksek iş miktarı ise sistem özelliklerinin yanı sıra çevre koşullarına başka bir ifadeyle ölü hal değerlerine bağlıdır. Dolayısıyla çevre şartlarındaki değişiklik ele alınan bir ısıl sistemin kullanılabilirliğini ve dolayısıyla ikinci kanun verimi değerlerini değiştirebilecek bir parametredir. Bir sistemden elde edilebilecek en yüksek miktardaki iş, o sistemin, bulunduğu belli bir başlangıç halinden, tersinir olarak çevre şartlarına (ölü hale) getirilmesiyle elde edilebilir. Ölü hal özelliklerine bağlı olarak ORÇ sisteminin ikinci kanun veriminin değişimi Şekil 2’de görülmektedir. Beklendiği üzere, aynı basınç değeri için ölü hal sıcaklığı arttıkça, tersinmezlik değerleri azalmakta ve buna bağlı olarak ikinci kanun verimi artmaktadır.



**Şekil 2.**  
**ORÇ Sistemi İkinci Kanun Verimi ve Toplam Tersinmezlik Değerleri**

Jeotermal bir kaynaktan beslenen ORÇ sisteminin ısıl verimi ( $\eta$ ), sistemdeki net iş alışverişinin, sisteme jeotermal kaynaktan sağlanan ısı enerjisine oranı olarak tanımlıdır. Bu tanıma göre ve Tablo 6’da hesaplanan değerlere bağlı olarak ORÇ ısıl verimi ( $\eta$ ) %7 ve denklem 5 ile sistemin ikinci kanun verimi ( $\eta_{II}$ ) ise %29 olarak hesaplanmıştır.



Ele aldığımız bu kaynaktan buharlaştırıcıda isopentana aktarılan enerji değeri 6745 kW olarak bulunmuştur. Bu değer, eğer verimi %90 olan bir kazan ile doğalgaz kullanılmak suretiyle sağlanmak istenseydi bunun için yaklaşık 0.217 m<sup>3</sup>/s debiyle doğalgaz kullanılması gerekecekti. Doğalgazın birim fiyatı 0.3095 YTL/m<sup>3</sup> olarak alınırsa, bu değerın yıllık ekonomik karşılığı 2118000 YTL/yıl olduğu görülür. Bu sonuç, kendi öz varlığımız olan jeotermal enerjinin kullanılmasıyla, ülkemizin enerji ithalatının azalacağını göstermekte ve bu çalışmada ele alınan sisteme ait hesaplanan düşük verime karşılık, jeotermal destekli proseslerin geliştirilmesine ait çalışmaların ekonomik açıdan anlamlı sonuçlar sağlayacağını kanıtlamaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tahmini jeotermal enerji potansiyeli 31500 MW olan ülkemizde mevcut jeotermal enerjiden yeterince yararlanılamamaktadır. Romanya'da 1100 civarında olan jeotermal sondaj kuyusu sayısı, potansiyeli itibarıyla dünya sıralamasında 7. olan ülkemizde yaklaşık 170 olup konu üzerindeki çalışmaların artırılması gerektiği açıktır. Özellikle jeotermal potansiyelin bulunduğu bölgelerde başta MTA, yerel yönetimler, üniversiteler, DSİ, ilgili diğer kurumların ortaklaşa ve koordineli olarak çalışmaları hızla yürütmeleri gereklidir.

Jeotermal enerji sistemleri ucuz, karlı ve yatırımı karşılama süresi oldukça düşük olan sistemlerdir. Bursa'da bu çalışmada ele alınan kaynakların doğalgaz eşdeğeri ekonomik değeri yaklaşık olarak yılda 1200000 YTL'dir.

Kendi öz varlığımız olan, dışa bağımlı olmayan, teknik ve ekonomik avantajlara sahip olan, çevre dostu jeotermal kaynakların maksimum ölçüde değerlendirilmesi enerji ekonomisi çalışmalarında önemli yer tutmaktadır. Bu doğrultuda, tüm diğer ısı sistemlerinde olduğu gibi termodinamiğin ikinci kanununun jeotermal kaynaklar için uygulanması, sistem verimliliği, kullanılabilirliği ve sınıflandırılması için sağlam bir temel oluşturur.

Bu çalışmada, bölgemizde kurulabilecek bir jeotermal tesisle elektrik üretiminin sağlayacağı avantajlar sunulmuştur. Ele alınan tesiste, ikinci kanun analizi ile yitirilen iş yapabilme miktarları tespit edilerek, verim artırma çalışmalarında dikkatin odaklanması gereken tesis noktaları tespit edilmiştir. Ayrıca, jeotermal akışkanın re-enjeksiyonu sırasında önemli miktarda iş yapabilme kabiliyetine hala sahip olduğu ve değerlendirilmesi gerektiği de belirlenmiştir.

Son olarak, sabit basınç altında ölü hal sıcaklığının artmasıyla toplam tersinmezlik değerlerinin azaldığı ve sistemin ikinci kanun veriminin arttığı tespit edilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Annamalai, K., Puri, I.K. (2002) *Advanced Thermodynamics Engineering*, CRC Press.
2. Akkuş, I., Koçak, A., Batık, H. (1998) Geothermal energy and MTA, *4th National Balneology Congress*, İstanbul.
3. Anonim (1996) *Madencilik özel ihtisas komisyonu-endüstriyel hammaddeler alt komisyonu-jeotermal enerji çalışma grubu raporu*, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayın No: DPT:2441-ÖİK:497.
4. Anonim (2001) *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu-enerji hammaddeleri alt komisyonu-jeotermal enerji çalışma grubu*, T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayın No: DPT:2609-ÖİK:620.
5. Batık, H., Koçak, A., Akkuş, I., Şimşek, S., Mertoğlu, O., Dokuz, İ., Bakır, N. (2000) Geothermal energy utilisation development in Turkey-present geothermal situations and projections, *Proc. World Geothermal Congress*, Japan, 85-91.
6. Bodvarsson, G. and Eggers, D.E. (1972) The exergy of thermal waters, *Geothermics*, 1, 93-95.
7. Brook, C.A., Mariner, R.H., Makey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti, M. and Muffler, L.J.P. (1979) Hydrothermal Convection Systems With Reservoir Temperature  $\geq 90^{\circ}\text{C}$ , L.J.P.Muffler (Eds.), *Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978*, US Geological Survey Circular 790, Library of Congress Card No: 79-600006, 18-85.
8. Can, M. (1994) Bursa'da jeotermal enerjinin merkezi ısıtma sistemlerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi, *Ekoloji*, 13, 44-49.
9. Çengel, Y., Boles, M.A. (1989) *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw Hill, Singapore.
10. Çerci, Y. (2003) Performance evaluation of a single-flash geothermal power plant in Denizli, Turkey, *Energy*, 28(1), 27-35.
11. Dağdaş, A., Öztürk, R. and Bekdemir, Ş. (2005) Thermodynamic evaluation of Denizli Kızıldere geothermal power plant and its performance improvement, *Energy Conversion and Management*, 46(2), 245-256.

12. Dickson, M.H., Fanelli, M. (1995) *Geothermal Energy*, John Wiley and Sons, West Sussex, England.
13. Anonim (2004-2005) *Engineering Equation Solver*, McGraw Hill.
14. Erişen, B. ve Öngör, T. (1976) *Bursa Kenti Sıcaksu Kaynakları ve Hidrojeoloji*, MTA Raporu.
15. Hepbaşlı, A. and Akdemir, O. (2004) Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system, *Energy Conversion and Management*, 45, 737–753.
16. Kanoğlu, M. and Çengel, Y.A. (1998) Incorporating cogeneration into a geothermal power plant to enhance utilization and profitability, *Proc. of the ASME Advanced Energy Systems Division (AES)*, 38, 41-46.
17. Kanoğlu, M. (2002) Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant, *Geothermics*, 31(6), 709-724.
18. Lund, J.W., Lienau, P.J. and Lunis, B.C. (1998) *Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook*, United States Department of Energy, Idaho.
19. Moran, M.J., Shapiro, H.N. (1995) *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley and Sons.
20. Özgener, L., Hepbaşlı, A. and Dinçer, İ. (2005) Energy and exergy analysis of geothermal district heating systems: an application, *Building and Environment*, Available online 28 January 2005.