

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOTERMAL SİSTEMLERİN EKSERJİ ANALİZİ:
KIZILDERE ÖRNEĞİ**

Öner ATALAY

Yüksek Lisans Tezi

DENİZLİ - 2004

JEOTERMAL SİSTEMLERİN EKSERJİ ANALİZİ: KIZILDERE ÖRNEĞİ

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarafından Kabul Edilen
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Öner ATALAY

Tez Savunma Tarihi : 02 Ağustos 2004

DENİZLİ - 2004

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

Bu tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. H. Kemal ÖZTÜRK

(Yönetici)

Prof. Dr. Rasim KARABACAK

(Jüri Üyesi)

Doç. Dr. Arif HEPBAŞLI

(Jüri Üyesi)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

01.09.2004.. tarih ve 19/7.. sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. M. Ali SARIGÖL

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde maddi ve manevi her türlü yardımlarından dolayı tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK'e, benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet ATILGAN'a, her zaman yanımda hissettiğim oda arkadaşım Araş. Gör. Ahmet YILANCI'ya ve jeotermal santral ile gerekli olan bilgileri temin etmemde yardımlarından dolayı Kızıldere Jeotermal Santrali yetkililerine sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak da, beni bu yaşıma kadar her türlü fedakarlığı göstererek yetiştiren aileme sonsuz sabırlarından dolayı çok teşekkür ediyorum.

Öner ATALAY



ÖZET

Geçmişte ve günümüzde yaşanan petrol krizleri göstermektedir ki, dünya ekonomisi açıkça fosil yakıtlara bağlıdır. Bu nedenle, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç daha bir önem kazandı. Şu bir gerçektir ki, yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara göre, tükenmez ve çevreye olan daha az zararları nedeniyle iyi bir çözümdür. Jeotermal enerji en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olup, dünyanın birçok yerinde elektrik üretimi ve doğrudan kullanım olarak yararlanılmaktadır. Jeotermal enerji potansiyeli olarak Türkiye, kaynak bakımından yedinci, doğrudan kullanımda beşinci sırada bulunması nedeniyle dünyada jeotermal enerjiye sahip önemli ülkelerden birisidir. Türkiye’de jeotermal enerji genellikle, alan ve bölge ısıtmasında, sera ısıtmasında ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye’de sadece Denizli Kızıldere’de elektrik güç santrali olup tek buharlaştırmalı sistem esasına göre çalışmaktadır. Bir çok araştırmacı ve uygulama mühendisleri, sistemlerin veya proseslerin termodinamik verimliliğinin ve kayıplarının belirlenmesinde ekserji analizinin en iyi yöntem olduğuna inanmaktadırlar. Ekserji analizi aynı zamanda, jeotermal güç santrali gibi kompleks termal sistemlerin optimum dizaynı ve çalışması için bir araçtır. Yapılan bu çalışmada, Kızıldere güç santralinin performansının optimize edilmesi için enerji ve ekserji analizi uygulandı. Çalışmada, sistemin farklı bileşenlerindeki kayıpların nitelik olarak değerlendirilmesi, kuyuların gerçek enerji değerleri esas alınarak Termodinamiğin I. ve II. Kanunu temelinde incelendi. Ekserji analizi hem güç santralin tamamı hem de her bir bileşen için ele alındı. Çalışmada, santralin ekserji kayıpları belirlenip, ekserji akış diyagramında gösterildi. Çevre sıcaklığının ekserji verimliliği üzerindeki etkisini göstermek için, 0 °C, 16 °C ve 30 °C çevre sıcaklığı için analiz yapıldı. Sonuçlar tablolar halinde verildi. En büyük ekserji kaybının separatörlerde ayrıştırılan buhardan sonra , geri kalan suyun Menderes nehrine atılmasıyla gerçekleştiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal, ekserji, Kızıldere jeotermal güç santrali, ekserji analizi, ekserji verimliliği..

Öner ATALAY

ABSTRACT

It has been seen with the oil crises in the past years and at the present that the world economy is obviously dependent on fossil fuels. Therefore, the need for new and renewable energy sources became more important. It is clear that renewable energy sources could provide a solution to the problem, as they are inexhaustible and have less adverse impacts on the environment than fossil fuels. Geothermal energy is one of the most important renewable energy sources and currently being used in various locations around the world to produce electricity and provide energy directly usage. As a potential of geothermal energy, Turkey is one of the most important countries in the area of the geothermal energy in the world and occupies seventh place in the resource and fifth place in direct use. Mainly geothermal energy is used in Turkey for the space and district heating, greenhouse heating, electricity production. In Turkey, there is only one geothermal power plant that is flash steam type and located in Kızıldere, Denizli. It is widely believed by many researchers and practicing engineers that exergy analysis is a powerful tool for assessing the thermodynamic efficiencies and losses of systems and processes. Also, exergy analysis provides a tool for the optimum design and operation of complex thermal systems such as geothermal power plant. In this study, exergy and energy analyses are performed in order to optimize the performance of the Kızıldere geothermal power plant. In the study, energy use of the different components of the system is discussed based on the first and second law of thermodynamics. The exergy analysis have been carried out for the power plant as a whole and for the each component. In the study, exergy destruction of the plant is quantified and illustrated using an exergy flow diagram. The analysis has been performed for 0 °C, 16 °C and 30 °C in order to show the effect of the ambient temperature on exergy efficiency. The results have been given in Tables. It has been seen that major exergy destructions occurred due to the separation of steam from the geothermal fluid in the separator during exhausting the hot water into the Menderes River.

Keywords: Geothermal, exergy, Kızıldere geothermal power plant, exergy analysis, exergy efficiency.

Öner ATALAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İçindekiler	VII
Şekiller Dizini	XI
Çizelgeler Dizini	XII
Semboller Dizini	XIII

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

GİRİŞ.....	1
------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

ENERJİ

2.1. Enerjinin Tanımı.....	6
2.2. Enerji Kaynakları.....	6
2.3. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması	9
2.3.1. Birincil Enerji Kaynakları	9
2.3.2. İkincil Enerji Kaynakları.....	9
2.4 Dünya’da Enerjinin Genel Durumu.....	10
2.4 Türkiye’de Enerjinin Genel Durumu.....	12

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

JEOTERMAL ENERJİ

3.1. Jeotermal Enerjinin Tanımı	15
3.2. Jeotermal Enerjinin Tarihçesi.....	17
3.3. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları	20
3.4. Dünyadaki Önemli Jeotermal Kuşaklar.....	21
3.5. Türkiye’deki Jeotermal Alanlar Ve Uygulamaları	22
3.6. Jeotermal Enerji İle Elektrik Üretimi.....	26
3.6.1 Kuru Buharlı Sistemler	26
3.6.2 Buharlaştırmalı Sistemler	27
3.6.3 Binary (İkili) Sistemler	30
3.6.4 Güç Santralleri Maliyetlerinin Karşılaştırması	31
3.7 Jeotermal Enerji ve Çevre	32
3.7.1 Fiziksel Etkiler	34
3.7.1.1 Sondaj.....	34
3.7.1.2 Boru Hattı	35
3.7.1.3 Su	35
3.7.1.4 Yüzey Çökmesi	35
3.7.1.5 Mikrodepremler	36
3.7.1.6 Gürültü	36
3.7.2 Kimyasal Etkiler	36
3.7.2.1 Gaz Emisyonu.....	36
3.7.2.2 Kuyu ve Soğutma Suları.....	37
3.7.3 Biyolojik Etkiler	38
3.8 Re-enjeksiyon	38

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

EKSERJİ ANALİZİ

4.1. Ekserjinin Tanımı	40
4.2. Ekserji Kavramının Önemli Boyutları	42
4.3. Ekserjinin Önemi	43
4.4. Ekserji Ve Çeşitleri.....	46
4.4.1. Ölü Hal.....	46
4.4.2. Fiziksel Ekserji.....	47
4.4.3. İdeal Gazların Fiziksel Ekserjileri	48
4.4.4. Katı ve Sıvıların Fiziksel Ekserjileri.....	48
4.4.5. Kimyasal Ekserji.....	49
4.4.6. Standart Kimyasal Ekserji.....	49
4.4.7. Gaz Karışımlarının Kimyasal Ekserjileri	50
4.4.7.1. Yakıtların Kimyasal Ekserjilerinin Hesaplanması	51
4.4.8. Isıl Ekserji.....	52
4.4.9. İş Ekserjisi.....	52
4.4.10. Isı Transferinin Ekserjisi.....	53
4.5. Ekserji Kaybı.....	53
4.5.1. Kısmi Olayında Meydana Gelen Ekserji Kaybı.....	53
4.5.2. Sürtünmeden Dolayı Ekserji Kaybı.....	54
4.5.3. Sonlu Sıcaklık Farkındaki Isı Transferinde Ekserji Kaybı.....	54
4.5.4. Çeşitli Termal Prosesler İçin Ekserji Kayıplarının Karşılaştırılması..	55
4.6. Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması.....	56

BEŞİNCİ BÖLÜM

KIZILDERE JEOTERMAL SANTRALİN EKSERJİ ANALİZİ

5.1. Kızıldere Jeotermal Sahası	61
5.2. Kızıldere Jeotermal Santrali	62
5.2.1 Santral Çalışma Prensibi	66
5.4 Santralin Ekserji Analizi	69

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç ve Öneriler	85
Kaynaklar	87
Özgeçmiş	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1: Jeotermal enerjinin kaynağı ve oluşumu.....	15
Şekil 3.2: Sıcaklığa göre jeotermal enerjinin kullanım alanları	20
Şekil 3.3: Dünyada'ki jeotermal bölgeler	21
Şekil 3.4: Türkiye'nin volkanik etkinliği ve jeotermal alanlar	23
Şekil 3.5: Kuru buharlı sistem akış şeması	27
Şekil 3.6: Tek buharlaştırmalı sistem akış şeması.....	28
Şekil 3.7: Tek buharlaştırmalı bir santral örneği: Kızıldere sahası.....	29
Şekil 3.8: Çift Buharlaştırmalı sistem akış şeması.....	30
Şekil 3.9: İkili (binary) sistem akış şeması.....	31
Şekil 4.1: Bir prosesin ekserji verimi ile yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları arasındaki ilişki	44
Şekil 4.2: Verilen durumla çevre arasında çalışan tersinir bir ısı makinesinin gösterimi	47
Şekil 4.3: Çeşitli termal prosesler için ekserji kayıpları.....	55
Şekil 5.1: Kızıldere sahası ve jeotermal güç santrali	62
Şekil 5.2: Santralin şematik gösterimi.....	65
Şekil 5.3: Kızıldere Jeotermal Santrali'nin ekserji akış diyagramı	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Dünya fosil türevli kaynak rezervleri, bölgelerin payları ve rezerv ömürleri	11
Çizelge 2.2: Türkiye'nin Yıllara Göre Birincil Enerji Üretimi	13
Çizelge 2.3: Türkiye'nin yıllara göre birincil enerji tüketimi	14
Çizelge 3.1: Dünya'da jeotermal enerjinin kullanım yöntemleri	22
Çizelge 3.2: Ülkemizdeki ısıtma sistemleri ve kapasiteleri	23
Çizelge 3.3: Jeotermal sahalar ve sıcaklıkları	24
Çizelge 4.1: Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması	44
Çizelge 4.2: Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri	50
Çizelge 4.3: Bazı Yakıtların Kimyasal Ekserjilerinin Alt ve Üst Isıl Değere Oranı	52
Çizelge 5.1: Kızıldere sahasının bazı karakteristik özellikleri	63
Çizelge 5.2: Üretim kuyusu bilgileri	63
Çizelge 5.3: Enjeksiyon kuyusu bilgileri	64
Çizelge 5.4: Denizli Kızıldere jeotermal güç santraline ait karakteristik bilgiler	67
Çizelge 5.5: Kızıldere türbin-jeneratör ünitesine ait bilgiler	68
Çizelge 5.6: Kızıldere jeotermal güç santralindeki kompresörlere ait bilgiler	68
Çizelge 5.7: Santrale ait hesaplanan enerji ve ekserji değerleri	70
Çizelge 5.8: Dış ortam sıcaklığı 30 °C için enerji ve ekserji değerleri	83
Çizelge 5.9: Dış ortam sıcaklığı 0 °C için enerji ve ekserji değerleri	84

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Alan (m^2)
B	Ekserji (kW)
B_K	Kinetik Ekserji (kW)
B_P	Potansiyel Ekserji (kW)
B_{fiz}	Fiziksel Ekserji (kW)
B_{ısı}	Isıl Ekserji (kW)
B_{kim}	Kimyasal Ekserji (kW)
c	Yakıt İçerisindeki Karbon Kütlesel Oranı
C	Özgül Isı (kJ/kgK)
COP	Etkinlik Katsayısı
g	Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
H	Entalpi (kJ/kg)
H_u	Yakıtın Alt Isıl Değeri (kJ/kg)
H	Yakıtın İçerisindeki Hidrojen Kütlesel Oranı
I	Tersinmezlik
n	Yakıt İçerisindeki Azot Kütlesel Oranı
o	Yakıt İçerisindeki Oksijen Kütlesel Oranı
P	Basınç (Pa)
R	Gaz Sabiti
R	Üniversal Gaz Sabiti
S	Entropi (kJ/kgK)

s	Yakıt İçerisindeki Kükürt Kütlesel Oranı
T	Sıcaklık (K, °C)
U	İç Enerji (kJ/kg)
V	Hız (m/s)
v	Özgül Hacim (m^3 / kg)
Q	Isı (kJ)
W	İş (kJ)
W_{tr}	Tersinir İş (kJ)
W_y	Yararlı İş (kJ)
X	Baca Gazı Bileşenleri Hacimsel Oranı
η	Verim (%)

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Gün geçtikçe birincil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve enerji maliyetlerinin artışı sebebiyle enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserjetik analizler büyük önem kazanmaya başlamıştır. Ekserjinin temeli 1870’li yıllara uzanmaktadır. İlk olarak J.W. Gibbs tarafından 1878 yılında ortaya çıkmıştır (Kestin ve diğ., 1980). “Ekserji” kavramı kelime olarak ilk defa 1953 yılında Z. Rant tarafından kullanılmıştır (Lee, 2001). Ekserji ile eş anlamlı olarak, kullanılabilir enerji (Bruges, 1959), kullanılabilir iş (Kestin ve diğ., 1980) ve kullanılabilirlik veya maksimum yararlı iş (Rogers ve Mayhew, 1993) kavramları ortaya çıkmıştır.

Bodvarsson ve Eggers (1972), ilk ekserji analizini bir jeotermal güç santraline uygulamışlardır. Çalışmalarında tek ve çift buharlaştırmalı iki ayrı sistemi karşılaştırmışlardır. Santral genelinde ekserji verimliliğini tek buharlaştırmalı için % 38,7 ve çift buharlaştırmalı için % 49 olarak hesaplamışlardır.

1970’li yıllarda meydana gelen petrol krizinden sonra, enerji veriminin, tek başına enerjinin ne kadar etkin kullanıldığını ortaya koyamayacağı anlaşıldı. İleri ve Güner (1998), Türkiye’nin 1995’li yıllara kadar olan enerji kullanımının yanı sıra ekserji kullanımını da gündeme getirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda verimli gibi görünen sistemlerin ekserji analizi yapıldığında aslında ne kadar verimsiz olduklarını ortaya koydular.

Enerjinin gün geçtikçe daha değerli hale gelmesi, Avrupa ve Amerika’da kojenerasyon santrallerinin artmasına neden olmuştur. Pak ve arkadaşları (1997), çalışmalarında farklı tip kojenerasyon sistemlerini ele alarak, bölgesel

ısıtma ve soğutmada değişken talepler karşısında ekserjetik değerlendirme yaparak hangi sistemin daha verimli olduğunu incelemişlerdir. İkili akışkan çevrimli kojenerasyon güç sistemi ile kombine çevrimli bir güç santralini karşılaştırmışlar ve ekserji verimlerini deneysel olarak ortaya koymuşlardır

Doldersum (1998), rafineride meydana gelen ekserji kayıplarını inceleyerek, yapılan iyileştirmelerin bu kayıpları ne kadar minimize ettiğini ortaya koymuştur. En çok ekserji kaybının ocaklarda ve damıtma ünitelerinde meydana geldiğini göstermiştir. Bunu göz önüne alarak yaptığı iyileştirmeler sonucunda toplam ekserji kayıplarının % 70'e varan oranlarda düşebileceği üzerinde durmuştur.

Kanoğlu (2000), ABD'nin Kuzey Nevada bölgesinde inceleme yaptığı 12,9 MW'lık ikili jeotermal güç santralini, ekserji analizi uygulanarak santral performansını değerlendirmiştir. Araştırmasında santraldeki ekserji kayıplarına, türbin, aracı akışkanın yoğunlaştırılması, re-enjeksiyon ve buharlaştırıcı-önısıtıcının etki ettiğini göstermiştir. Çalışmanın sonucunda en büyük kaybın türbinden kaynaklandığı görülmüştür.

Dincer ve Al-Muslim (2001), çift kademeli buhar güç santralini termodinamik analizini yaptıkları çalışmalarında, santrale ait birinci ve ikinci yasa verimlerini Spreadsheet Hesaplama Tekniği kullanarak bulmuşlardır. Kızdırıcı sıcaklığı, kızdırıcı basıncı, kütle oranı ve elde edilen iş gibi parametreleri değiştirerek sisteme ait verimleri karşılaştırmışlardır. Hesaplanan değerlerle, gerçek değerleri ve literatür çalışmalarını karşılaştırdıklarında bir uyum olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmalarının sonucunda, ekserji analizinin optimum dizaynın gerçekleştirilmesinde büyük rolü olduğunu savunmuşlardır.

Lee (2001), jeotermal kaynakların rezervuar akışkanının sıcaklığına göre sınıflandırılmasının kesin bir sınıflandırma olamayacağını belirtmiştir. Bunun yerine jeotermal kaynakların entalpi değil de, ekserji indekslerine (SExI) göre sınıflandırılmasının daha uygun olacağını savunmuştur.

Rosen ve Dinçer (2001), yaptıkları çalışmada ekserjinin, bir maddenin veya enerji formunun yararlılığını veya kalitesin ya da potansiyelinin belirlenmesinde bir ölçü olduğunu belirtmişlerdir. Bilim adamlarının veya mühendislerin ekserjiyi kullanarak enerji sistemlerinin verimlerini, çevresel etkileri ve sistemin sürdürülebilirliğini daha net anlayabileceklerini ortaya koymuşlardır. Geçen 10 yıl içinde enerji ve ekserji ilişkisinin, sürdürülebilir gelişmenin ve çevresel etkilerin hızla önem kazandığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak ekserjinin potansiyelin belirlenmesinde etkili bir ölçüm olduğunu savunmuşlardır.

Çerçi (2002), Denizli Kızıldere’de yer alan tek buharlaştırmalı 11.4 MW’lık güç santralının performans analizini gerçekleştirerek, en büyük ekserji kaybının suyun nehre atılması esnasında meydana geldiğini işaret etmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda santralin ikinci yasa veriminin diğer santrallerle karşılaştırıldığında çok düşük olduğunu göstermiştir. Çift buharlaştırmalı veya iki akışkanlı bir çevrimin daha verimli olabileceği sonucuna varmıştır.

Koroneos (2003), petrol krizlerinin insanları yeni enerji kaynaklarına yönlendirdiğinin altını çizmiştir. Fakat varolan teknolojiye rağmen, yenilenebilir enerji kaynaklarının henüz fosil yakıtların seviyesine çıkılamadığını göstermiştir. En önemli kaynaklar olarak gördüğü güneş, rüzgar ve jeotermal enerjiyi karşılaştırarak bunların ekserji analizini yapmıştır.

Çomaklı ve arkadaşları (2004), termal sistemlerin verimlerini ekserji analizi kullanarak incelemişler ve çeşitli süreçlerdeki ekserji kayıplarını ele almışlardır. Yaptıkları çalışmalarında, bir termal sistemin gerçek performansının, ekserji kaybı ve sistemden elde edilebilecek maksimum iş hesaplanarak bulunabileceğini savunmuşlardır.

Ünal ve arkadaşları (2004) , jeotermal kaynakları ekserji ile sınıflandırmaya çalışmışlar, Türkiye'deki jeotermal sahaların ekserjilerini hesaplayarak onları kategorize etmişlerdir. Bu çalışma ile, Türkiye 'deki jeotermal sahaların ekserjilerini ve özgül ekserji indekslerini (SExI) hesaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda SExI < 0,05 olan sahaların düşük, SExI > 0,5 olan sahaların yüksek ve arasında kalan sahaların da orta dereceli ekserjiye sahip olduklarını ortaya koymuşlardır.

Koroneos ve arkadaşları (2004), yaptıkları çalışmada Yunanistan'ın çok miktarda jeotermal kaynağa sahip olduğunu belirterek, Kavala bölgesinde kurulması mümkün bir santralin değerlendirmesini yapmışlardır. Sıcak su ve elektrik üretilen bir kojenerasyon santralini Eratino'da kurulabileceğini, düşük entalpiye sahip kaynakların araştırmalar sonucunda gelişmiş teknikler kullanarak en iyi şekilde değerlendirilebileceğini savunmuşlardır. Santralin değerlendirilmesini yaparken ekserji analizi uygulamışlar ve aynı zamanda çevre etkilerini de göz önünde bulundurmuşlardır.

Rosen ve arkadaşları (2004), yaptıkları çalışmada Kanada'nın Edmonton şehrinde kojenerasyon destekli bölge enerji sisteminin verim analizini incelemişlerdir. Mevcut chillerlerin dışında tek ve çift etkili absorpsiyonlu chillerleri de kullanılması halinde enerji veriminin % 83 ile % 94, ekserji verimliliğinin ise % 28 ile % 29 arasında değiştiğini hesaplamışlardır. Genel anlamda sistemi incelediklerinde ekserji veriminin sistem için daha anlamlı olduğunu savunmuşlardır.

DiPippo (2004), yaptığı çalışmasında İkili (binary) çevrim enerji sistemlerini ele alarak, bu sistemlerde en çok kullanılan çevrim olan Organik Rankin Çevrimi (ORC) ve Kalina Çevrimini incelemiştir. Yaptığı çalışmada bu iki çevrimin arasındaki karşılaştırmalarda ikinci kanunun en iyi yol olduğunu savunmuştur. Çalışmasını yaparken, çevre şartlarını göz önünde bulundurmuş, çevrim akışkanının tipini değiştirerek sistemleri karşılaştırmıştır.



İKİNCİ BÖLÜM

ENERJİ

2.1. Enerjinin Tanımı

Enerji bilimsel anlamda bir maddenin veya maddeler sisteminin iş yapabilme yeteneğidir. Bir insanda, bir maddede, hareket eden bir cisimde her an iş yapabilme gücü olduğuna göre, bunlardan enerji elde etmek mümkündür.

2.2. Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları, sanayileşme süreci içindeki ülkelerin ekonomilerinde önemli bir yer tutmaktadır. Enerjinin hem sanayi hammaddesi olması, hem de ısıtıcı ve çevirici güç olarak kullanılması dolayısıyla enerji sektöründeki gelişmeler, diğer sektörlerdeki gelişmelere bağlı bulunmaktadır. Bir ulusun varlığını sürdürebilmesi ve geleceğini güven içinde bulundurması, güçlü bir sanayiye sahip olmasını gerektirir. Sanayileşme için ana unsur ise enerjidir.

Türkiye'nin 2001 verilerine göre, birincil enerji kaynakları üretimi 26,2 MTEP (Milyon ton eşdeğer petrol) olmasına rağmen tüketimi 77 MTEP olarak gerçekleşmiştir, oransal olarak üretimin tüketimi karşılaması %34 civarındadır. 1970'li yıllara bakıldığında üretimin tüketimi karşılama oranının %75 dolaylarında olduğu görülmektedir. Bu yüzden sürdürülebilir bir gelişme için enerji politikalarının belirlenmesinde çok dikkatli davranılması gerektiği açıktır. Türkiye'nin ekonomik gelişmesine bakılacak olunursa yaşanan 2000 ekonomik krizinde GSMH (Gayri Safi Milli Hasıla)'da %9,4'lük küçülme gerçekleşmesinin birincil enerji tüketiminde de bir azalma meydana getirdiği görülecektir (Öztürk, 2003).

Günümüzde enerji tüketimi, ekonomik gelişmenin, sanayileşmenin, çağdaş bir toplum olmanın önemli bir göstergesidir. Ama bugün kişi başına enerji tüketimine bakıldığında, gelişmiş ülkeler ile gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkeler arasında bir uçurum vardır. Bu gün için Türkiye’de kişi başına enerji tüketimi dünya ortalamasının oldukça altındadır. Türkiye’nin sanayileşmesi enerji tüketiminin de artmasına neden olacak, bu da enerjide dışa bağımlılığı artıracaktır.

Dünya enerji sektöründe, önceleri petrol krizinden kaynaklanan arz kısıtlamaları, şimdilerde ise çevresel baskılardan kaynaklanan büyük maliyet artışları söz konusudur. Enerji sektörü artık ülke sınırlarını aşmış, uluslar arası boyutları ile irdelenir hale gelmiştir.

Gelişmiş ülkelerin, sektör politikaları konusunda benimsedikleri prensipler enerji güvenliği ve sürdürülebilir çevre kapsamında ekonomik kalkınma olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda ana kriterler ise serbest ve açık piyasalar, müdahalesiz fiyatlar, enerjinin tasarruflu kullanımı, arz çeşitlendirmesi ve esnekliği olarak tespit edilmiştir.

Son dönemde gerek gelişmiş, gerekse gelişmekte olan ülkelerde, tasarruf, çevre, güvenlik kavramlarının yanı sıra “özelleştirme” ve “yeniden yapılanma” enerji sektörlerinin gündemine ağırlıklı olarak girmektedir.

Halen tükettiği enerjinin yarısından fazlasını ithal etmekte olan ülkemizde uygulanmakta olan politikalar, dünya enerji sektörünün gelişiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Ülkemizde enerji sektöründe uygulanması benimsenen politikalar; enerji güvenliği, çevrenin korunması ve tasarruf olarak özetlenebilir.

Geçmiş yıllarda enerji üretim miktarlarındaki artışların talep artışlarından daha düşük seviyelerde seyretmesi nedeniyle aradaki farkın ithalatla karşılanması yoluna gidilmiştir. Başta petrol olmak üzere doğal gaz ve kömür ithalatının % 40'ı, ihracat gelirlerinin % 40-50 oranındaki bölümünü götürmektedir. Kömür, petrol, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere bütün enerji türlerinde arama, bulma ve üretim faaliyetleri artarak sürdürülmektedir.

Günümüzde üretilen enerjinin ekonomik ve çevre dostu olması zorunludur. Olaya çevre kirliliği açısından bakıldığında, çağımızda en önemli atmosferik çevre sorunlarından sera etkisi, ozon tabakasının delinmesi veya incilmesi, asit yağmurları gibi olayların meydana gelişinde enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların payı yüksektir. Ayrıca fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan SO_x , NO_x katı maddelerde de toksik maddeler çeşitli hava kirliliği sorunları yaratmaktadır.

2020 yılında dünya nüfusu 8,9 milyona, enerji ihtiyacı ise 497,2-758,6 EJ civarında olacağı tahmin edilmektedir. Tahmin edilen bu koşullar sağlarsa atmosfere 21,9 Gt CO_2 verilecektir. Sanayi ve teknolojiye ve tüketici alışkanlıklarındaki hızlı gelişme ile bu rakam 39,7 Gt'a kadar çıkabilecektir. 497,2 EJ'lik enerji ihtiyacının 57,2 EJ'si yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanacaktır. Aşırı fosil yakıt kullanımının CO_2 emisyonu ile ortaya çıkardığı ve çıkarabileceği zararlar bir yana, dünyanın bilinen fosil yakıt rezervinin enerji ihtiyacının uzun vadeli karşılayamayacağı bir gerçektir.

Hemen hemen tüm konvansiyonel enerji kaynaklarına sahip olan ülkemiz, hidrolik ve linyit kaynakları açısından zengin ülkeler arasında sayılmaktadır. Bu kaynakların daha yüksek oranda değerlendirilmesine yönelik geliştirme programları çeşitli tedbirlerle desteklenmekte ve uygulama çalışmaları sürdürülmektedir.

2.3. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

Enerjiden yararlanma, insanlık tarihi ile başlamıştır. Sanayi devrimi ile beraber giderek gelişen ülkeler, önceleri sulardan, rüzgardan ve bunların gücünden faydalanmış, daha sonraları petrol, doğal gaz, nükleer enerji, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi kaynaklardan yararlanarak, başka bir ifadeyle enerji kaynaklarını çeşitlendirmişlerdir.

Enerji kaynakları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

2.3.1. Birincil Enerji Kaynakları

a-) Fosil yakıtlar

- Petrol
- Doğal Gaz
- Taşkömürü ve Linyit

b-) Hidrolik Enerji

c-) Nükleer Enerji

d-) Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

- Jeotermal Enerji
- Güneş Enerjisi
- Rüzgar Enerjisi
- Biyomas

2.3.2. İkincil Enerji Kaynakları

a-) Elektrik

b-) Biyogaz

c-) LPG

2.4 Dünya’da Enerjinin Genel Durumu

1900 yılında nüfusu 1,6 milyar, birincil enerji tüketimi yaklaşık 1000 MTEP olan dünyamızda 2001 yılında nüfus 6 milyar 250 milyona ulaşmış, birincil ticari enerji tüketimi 9124 MTEP düzeyine çıkmıştır. Böylece bir yüzyıl içinde dünyanın birincil enerji tüketimi 8 katın üzerinde artış göstermiş bulunmaktadır (Öztürk, 2003).

2001 yılında dünya, birincil enerji üretiminin % 88’i fosil yakıtlardan sağlamıştır. Birincil enerji üretiminde kömürün payı % 26, petrolün payı % 39, doğal gazın payı % 23, hidrolik enerjinin payı % 2 ve nükleer enerjinin payı % 7’dir (Öztürk, 2003).

Çizelge 2.1’de fosil türevli kaynak rezervleri, bölgelerin payları ve rezerv ömürleri verilmiştir. 1990 yılına göre kömür üretimi % 1,3 düşmesine rağmen, petrol üretimi % 11, doğal gaz üretimi % 23 artış göstermiştir. En önemli ikincil enerji kaynaklarından elektrik üretimi 1990 yılında 11899 GWh iken 2001 yılında %31,8’lik artışla 15684 GWh olarak gerçekleşmiştir.

2001 yılında dünya petrol üretimi bir önceki yıla göre % -0,3’lük düşüşle 3584,9 Milyon Ton olmuştur. Üretimin % 30’u Orta Doğu’da (% 11,8 ile en büyük payı Suudi Arabistan’da) gerçekleşmiş, bunu % 9,8 payla ABD ve % 9,7 payla Rusya Federasyonu izlemiştir. 2001 yılında doğal gaz üretiminde % 1,7’lik bir artış kaydedilmiştir. Doğal gazın % 22,5’u ABD’de, % 22’si Rusya Federasyonu’nda üretilmiştir. Kömür üreticisi ülkelerin başında ise % 23,9 payla Çin, % 22,3 payla ABD, % 7,5 payla Hindistan ve % 4,9 payla Güney Afrika Cumhuriyeti yer almıştır (Öztürk, 2003).

2001 yılında dünyada birincil enerji tüketimi ise 9124 TEP civarındadır. Birincil enerji tüketiminde kömürün payı % 25, petrolün payı % 37, doğal gazın payı % 24, hidrolik enerjinin payı % 7 ve nükleer enerjinin payı % 7'dir. Enerji tüketiminin yaklaşık % 70'i, dünya nüfusunun % 15'ini oluşturan sanayileşmiş ülkelerin 1 milyar insanı, kalan % 30'si ise, dünya nüfusunun % 85'ini oluşturan gelişmekte olan ülkelerin 5 milyar insanı tarafından gerçekleştirilmiştir. ABD enerji tüketiminde % 24,5 paya sahiptir. Bu rakam dünya nüfusunun % 1,1'lik payına sahip olan Türkiye için % 0,86 civarındadır (Öztürk, 2003).

Çizelge 2.1: Dünya fosil türevli kaynak rezervleri, bölgelerin payları ve rezerv ömürleri (BP, 2002)

Bölgeler	Petrol			Doğal Gaz			Kömür		
	Rezerv (Milyar Ton)	Pay (%)	Ömür (Yıl)	Rezerv (Trilyon m ³)	Pay (%)	Ömür (Yıl)	Rezerv (Milyan Ton)	Pay (%)	Ömür (Yıl)
Kuzey Amerika	8,4	6,1	13,5	7,55	4,9	10,0	257783	26,2	234
Güney ve Orta Amerika	13,7	9,1	38,8	7,16	4,6	71,6	21752	2,2	381
Avrupa	2,5	1,8	7,8	4,86	3,1	16,1	125395	12,7	167
Eski Sovyet Ülkeleri	9,0	6,2	21,1	56,14	36,2	78,5	229975	23,4	>500
Ortadoğu	93,4	65,3	86,8	55,91	36,1	>100	1710	0,2	>500
Afrika	10,2	7,3	27,4	11,18	7,2	90,2	55367	5,6	250
Asya-Pasifik	5,9	4,2	15,6	12,27	7,9	43,8	292471	29,7	147
Toplam Dünya	143,0	100	40,3	155,08	100	61,9	984453	100	216

2.4 Türkiye’de Enerjinin Genel Durumu

Türkiye’de enerji üretim ve tüketim gelişme trendleri farklı olmuş, 1990 yılında % 48 olan üretimin tüketimi karşılama oranı, 2001 yılında % 34’e düşmüştür. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan geleceğe yönelik projeksiyonlarda bu oran düşme trendi içinde görülmektedir. 1998 yılında üretimin tüketimi karşılama oranı % 39 iken 2020 yılında üretimin tüketimi karşılama oranının % 25 olması beklenmektedir. 1997 yılında enerji talebi 73,7 Milyon TEP iken, üretim 28,2 Milyon TEP, 2001 yılında talep 77,1 Milyon TEP iken, üretim 26,2 Milyon TEP değerine ulaşmış ve 2020 yılında ise talep edilen enerji miktarının 318 Milyon TEP, üretiminde 78,5 Milyon TEP olması beklenmektedir. Belirtilen bu değerlere göre enerji talebinde hızlı bir artış olurken, üretimdeki artış bu talebi karşılayabilecek kadar artamayacaktır (Altan ve diğ., 2003).

Çizelge 2.2 ve 2.3’te Türkiye’nin yıllara göre birincil enerji üretim ve tüketim değerleri verilmiştir. 1990 yılında toplam enerji tüketim değeri 52987 TEP iken, 2001 yılında toplam enerji tüketimi 77044 TEP değerine ulaşmıştır. Bu da % 45’lık bir artışa denk gelmektedir. Kalkınma ve nüfus artışına paralel olarak toplam enerji ihtiyacı son yıllarda hızla artarken, toplam enerji üretimi aynı hızla artamamıştır. Dolayısıyla üretim ve tüketim arasındaki fark giderek büyümüştür. Türkiye toplam üretim değeri ile karşılayamadığı enerji ihtiyacını, karşılamak için ithal etmek yoluna gitmiştir. Bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma göstergesi olan enerjinin, büyük ölçüde dış kaynaklara bağımlı olmasının riskleri düşünüldüğünde enerji ihtiyacını yerli kaynaklardan karşılamanın büyük önem taşıdığı açıktır. Yerli üretim kaynaklarının artırılması, mevcut sahalardaki potansiyelin faaliyete geçirilmesi ve yeni sahaların keşfedilerek bir an önce üretime geçirilmesi dışa bağımlılığı azaltacaktır (Altan ve diğ., 2003).

Çizelge 2.2: Türkiye'nin yıllara göre birincil enerji üretimi (ETKB, 2004)

Yıllar	Taşkömürü (Bin Ton)	Linyit (Bin Ton)	Asfaltit (Bin Ton)	Doğalgaz (Milyon m ³)	Petrol (Bin Ton)	Hidrolik (GWh)	Rüzgar-Jeotermal Elektrik Isı (GWh) (Bin TEP)	Oduun (Bin Ton)	Hay. ve Bitki Art. (Bin Ton)	Güneş (Bin TEP)	Toplam (Bin TEP)
1990	2745	44407	276	212	3717	23148	80	17870	8030	28	25478
1991	2762	43207	139	203	4451	22683	81	17970	7918	41	25501
1992	2830	48388	213	198	4281	26568	70	18070	7772	60	26794
1993	2789	45685	86	200	3892	33951	78	18171	7377	88	26441
1994	2839	51553	0	200	3687	30586	79	18272	7074	129	26511
1995	2248	52758	67	182	3516	35541	86	18374	6765	143	26719
1996	2441	53888	34	206	3500	40475	84	18374	6666	159	27386
1997	2513	57387	29	253	3457	39816	83	18374	6575	179	28209
1998	2156	65204	23	565	3224	42229	91	18374	6396	210	29324
1999	1990	65019	29	731	2940	34678	102	17642	6184	236	27659
2000	2259	60854	22	639	2749	30879	109	13938	5981	262	26825
2001	2357	63445	31	312	2551	24010	152	16263	5790	287	26266

Çizelge 2.3: Türkiye'nin yıllara göre birincil enerji tüketimi (ETKB, 2004)

Yıllar	T.kömürü (Bin Ton)	Linyit (Bin Ton)	Asfaltit (Bin Ton)	Doğalgaz (Milyon m ³)	Petrol (Bin Ton)	Hidrolik (GWh)	Rüzgar-Jeotermal Elektrik Isı (GWh) (Bin TEP)	Odun (Bin Ton)	Hayvan ve Bitki.Art. (Bin Ton)	Güneş (Bin TEP)	Toplam(*) (Bin TEP)
1990	8191	45891	287	3418	22700	23148	80	17870	8030	28	52987
1991	8824	48851	139	4205	22113	22683	81	17970	7918	41	54278
1992	8841	50659	197	4612	23660	26568	70	18070	7772	60	56684
1993	8844	46086	102	5088	27074	33951	78	18171	7377	88	60265
1994	8192	51178	0	5408	25859	30586	79	18272	7074	129	59127
1995	8548	52405	66	6937	27918	35541	86	18374	6765	143	63679
1996	10892	54961	34	8114	29604	40475	84	18374	6666	159	69862
1997	12537	59474	29	10072	29176	39816	83	18374	6575	179	73779
1998	13146	64504	23	10648	29022	42229	91	18374	6396	210	74709
1999	11362	64049	29	12902	28862	34678	102	17642	6184	236	74275
2000	15393	64394	22	15086	31072	30879	109	16938	5981	262	81221
2001	11039	64883	31	16339	29661	24010	152	16263	5790	287	77044

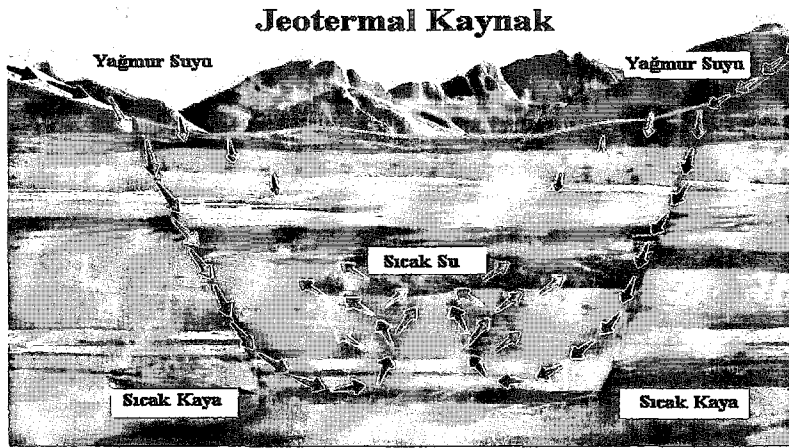
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

JEOTERMAL ENERJİ

3.1. Jeotermal Enerjinin Tanımı

Jeotermal enerji, yerkabuğunun derinliklerinde birikmiş basınç altındaki sıcak su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaçların içerisindeki ısı enerjisidir. Jeotermal enerji aşırı ısınmış akışkanın ya kendiliğinden yeryüzüne gelerek ya da sondajla çıkarılarak taşıdıkları enerjinin kullanıma dönüştürülmesi olarak da tanımlanabilir.

Dolayısıyla jeotermal enerji yerkürenin ısısı olduğundan doğal ve tükenmez bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Yerkürenin merkezi çok sıcak olduğundan yüzeyden derine doğru inildikçe sıcaklık artmakta, yer yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkından dolayı ısı yüzeye doğru akmaktadır. Yerkürenin saklı enerjisinin küçük bir bölümü dünyanın sonsuza kadar ihtiyacı olan enerjiyi karşılamaya yetebilecek büyüklüktedir. Ancak bu olay pratikte gerçekleştirilemez, çünkü yerkürenin ısısı çok dağınık ve yoğunluğu da düşüktür. Bu nedenle topraktan ısı üretmek ve bunun kullanılması pratikte imkansızdır (Yolcu, 2003).



Şekil 3.1: Jeotermal enerjinin kaynağı ve oluşumu

Isınmış bölgelerdeki yer altı suları, hidrotermal kaynaklar olarak sıcaklıkları bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yer altı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su veya buhar şeklinde görülür. Jeotermal akışkanı oluşturan sular meteorik kökenli olduklarından rezervuar sürekli olarak beslenmekte ve kaynak yenilenebilmektedir. Bu yüzden beslenmenin üzerinde tüketim olmadıkça jeotermal kaynakların tükenmesi mümkün değildir (Yolcu, 2003).

Yerkürede sıcaklık her kilometre derine indikçe 8°C 'den 50°C 'ye kadar değişen değerlerde (ortalama $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$) artar. Ancak bazı jeolojik yapılarda $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ' ye varan sıcaklık değişimi görülebilir. Böyle yapılarda 300°C sıcaklığa 4 km' den daha az derinliklerde ulaşılabilir (Lineau ve Lunis,1991).

Çevre kirliliği yaratmayan, temiz ve sürekli bir enerji kaynağı olan jeotermal enerjinin başlıca avantajları şöyle sıralanabilir:

-Yenilenebilir oluşu

-Çok amaçlı hizmet verebilir olması, gerekirse aynı anda farklı amaçlarla yararlanılabilme olanağının bulunması,

-Diğer enerji kaynaklarına göre ekonomik oluşu,

-Gerekli teknoloji düzeyinin çok yüksek olmayışı,

-Çevre kirliliği yaratmamasıdır

(Mertoğlu, 1994).

3.2. Jeotermal Enerjinin Tarihçesi

Bilinen tarihi kayıtlar Türklerin, Romalıların, Japonların, İzlandalıların ve merkezi Avrupalıları jeotermal enerjiyi yıkanma, ısınma ve pişirme amaçlı olarak kullandıklarını göstermektedir (Alpman, 2004). Jeotermal enerjinin tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Aşağıda en eski tarihten günümüze jeotermal enerjinin kullanımı özetlenmiştir.

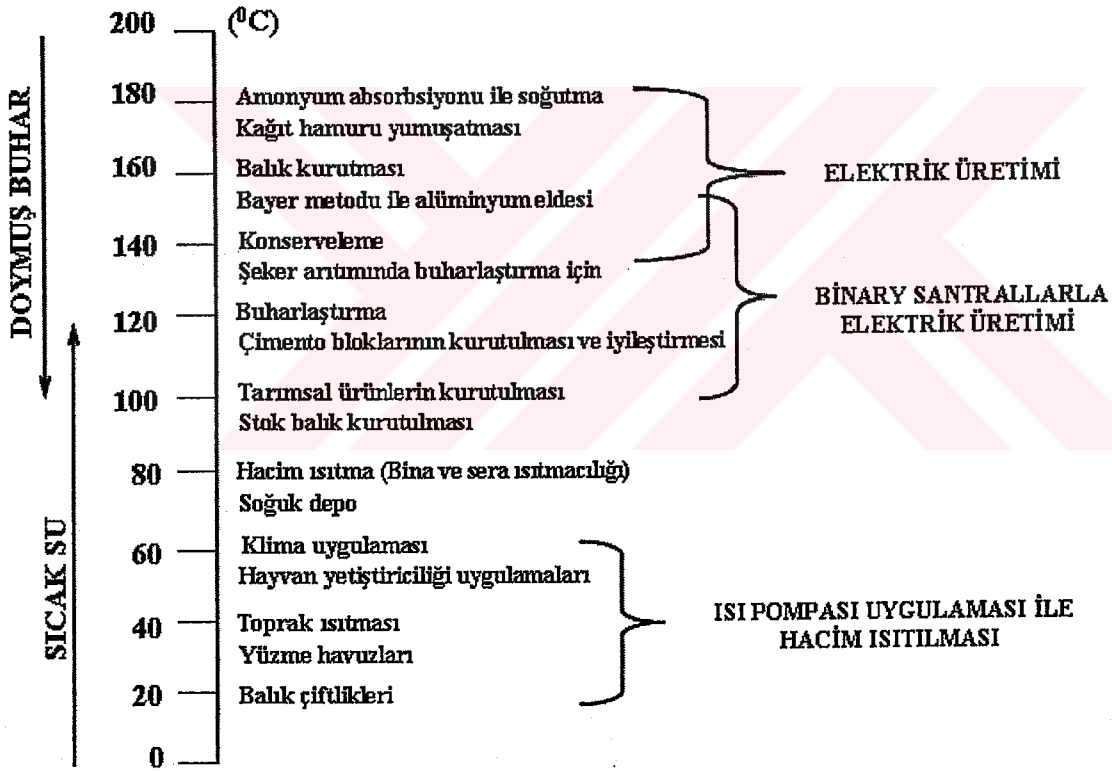
- M.Ö. 10000 Jeotermal akışkan Akdeniz Bölgesi'nde çanak, çömlek, cam, tekstil, krem imalatında kullanılmıştır.
- M.Ö. 1500 Romalılar ve Çinliler doğal jeotermal kaynakları banyo, ısınma ve pişirme amaçlı olarak kullanmışlardır.
- 630 Japon İmparatorluğu'nda kaplıca geleneği yaygınlaşmıştır.
- 1200 Jeotermal enerji ile mekan ve su ısıtması yapılabileceği Avrupalılar tarafından keşfedilmiştir.
- 1322 Fransa' da köylüler doğal sıcak su ile evlerini ısıtmaya başlamışlardır.
- 1800 yine Fransa' da yerleşim birimlerinin jeotermal enerji ile ısıtılması yaygınlaşmıştır.
- 1800 ABD' de kaplıcacılık hızla yaygınlaşmaya başlamıştır.
- 1818 F. Larderel ilk defa jeotermal buhar kullanarak Borik Asit elde etmiştir.
- 1833 P. Savi tarafından İtalya'daki Larderello Bölgesi'nin altındaki jeotermal rezervuarın yayılımı araştırılmıştır.
- 1841 İtalya (Larderello)' da yeni teknikler kullanılarak jeotermal kuyularının açılmasına başlanmıştır.
- 1860 ABD (California)' da "The Geysers" tesisleri açılmıştır.
- 1870 ABD' de kaplıca ve benzeri yerlere büyük talep doğmuştur.

- 1891 ABD (Boise Idaho)' de ilk jeotermal bölge ısıtma sistemi uygulaması gerçekleştirilmiştir.
- 1900 California (Calistoga)' da otuzdan fazla kaplıca merkezi açılmıştır.
- 1904 İtalya'da Larderello jeotermal buhardan ilk elektrik üretimi sağlanmıştır.
- 1920 California (The Geysers)' da ilk jeotermal kuyular açılmıştır.
- 1929 Oregon (KlamathFalls)' da evler jeotermal enerji ile ısıtılmıştır.
- 1930 İzlanda'da büyük ölçekli merkezi ısıtma projesi çalışmaları başlanmıştır.
- 1930 İzlanda, ABD, Japonya ve Rusya'da jeotermal akışkanın kullanımı yaygınlaşmıştır.
- 1943 İtalya (Larderello) jeotermal sahasından elektrik üretimi 132 MW kapasiteye erişmiştir.
- 1945 Süt pastörizasyonunda ilk kez jeotermal akışkandan yararlanılmıştır.
- 1945 ABD'de buzlanmaya karşı yer ısıtmasında, hacim ısıtmasında ve sera ısıtmacılığında jeotermal ısı kullanılmıştır.
- 1958 Yeni Zelanda'da "Flash Metodu" ile jeotermal elektrik üretimine başlanmıştır.
- 1960 California (The Geysers) jeotermal alanında ticari elektrik üretimi için ilk kez kuru buhar kullanıldı.
- 1963 Türkiye'de ilk jeotermal sondaj kuyusu İzmir (Balçova)' de açılmıştır.
- 1966 Japonya'da ilk jeotermal elektrik santrali kurulmuştur.
- 1968 Türkiye'de elektrik üretimi amaçlı ilk jeotermal kuyu Denizli (Kızıldere)' de açılarak, Denizli (Kızıldere) jeotermal alanı keşfedilmiştir.
- 1969 İkincil çevrim jeotermal teknolojiler ABD (Califomia)' de başarı ile uygulanmıştır.
- 1969 Fransa'da büyük jeotermal ısıtma projeleri başlanmıştır.
- 1970 Çin'de ilk kez elektrik üretiminde jeotermal akışkandan yararlanılmıştır.

- 1975 ABD (Califomia)'de "The Geysers" jeotermal alanındaki kaynaklardan 500 MW'lık elektrik üretimi kapasitesine ulaşılmıştır.
- 1978 ABD (Nevada)'de ilk jeotermal gıda kurutma tesisi kurulmuştur.
- 1978 Meksika (New Mexico)'da kızgın kuru kayada jeotermal rezervuar oluşturulup test edilmeye başlanmıştır.
- 1979 Endonezya'da ilk jeotermal elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir.
- 1980 Batı Amerika'da bazı jeotermal elektrik santralleri kurulmuştur.
- 1981 Hawaii (Puna)'de kurulan jeotermal tesisler faaliyete geçmiştir.
- 1982 Türkiye'de Aydın (Germencik) jeotermal alanı keşfedilmiştir.
- 1983 Türkiye'de kuyu içi eşanjörlü ilk jeotermal ısıtma sistemi İzmir (Balçova)'de kurulmuştur.
- 1984 Türkiye'nin ilk ve Avrupa'nın İtalya'dan sonra ikinci jeotermal enerji santrali (20.4 MW kapasiteli) Denizli (Kızıldere)'de hizmete açılmıştır.
- 1984 ABD (Oregon)'de mantar yetiştiriciliğinde jeotermalden yararlanıldı.
- 1985 Jeotermal elektrik santrallerinde yaklaşık 2000 MW'lık elektrik üretim kapasitesine ulaşılmıştır.
- 1987 ABD (Nevada)'de jeotermal akışkan altın üretiminde kullanılmıştır.
- 1987 Türkiye'nin ilk jeotermal merkezi ısıtma sistemi Balıkesir (Gönen)'de işletmeye açılmıştır.
- 1992 Dünyada 21 ülkede jeotermal elektrik üretimi yaklaşık 6000 MW'a ulaşmıştır.
- 1996 Türkiye'de 15000 konut ana kapasiteli İzmir (Balçova) jeotermal merkezi ısıtma sistemi devreye girmiştir.
- 2000 Tüm Dünya'da jeotermalden yaklaşık 8000 MW jeotermal elektrik ve 17.000 MW civarında jeotermal doğrudan kullanım gerçekleştirilmiştir.
- 2001 Türkiye'nin jeotermal kurulu ısıtma gücü 493 MW'a ulaştı. Türkiye böylece jeotermal elektrik dışı uygulamalarda Dünyanın 5. büyük ülkesi durumuna gelmiştir.

3.3. Jeotermal Enerjinin Kullanım Alanları

Jeotermal enerjinin kullanıldığı alanlardaki akışkan sıcaklıkları farklıdır. Şekil 3.2’de farklı sıcaklıklar için jeotermal enerjinin kullanım alanları gösterilmiştir. Sıcaklıklar 180-380 °C arasında olan yüksek entalpili sular elektrik üretiminde (diğer entegre kullanımlarda yapılabilir), 25-180 °C arasındaki düşük entalpili olanlarda ısıtma, endüstri uygulamaları, bazı kimyasalların elde edilmesi gibi çeşitli amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır (Mertoğlu,1994).



Şekil 3.2: Sıcaklığa göre jeotermal enerjinin kullanım alanları

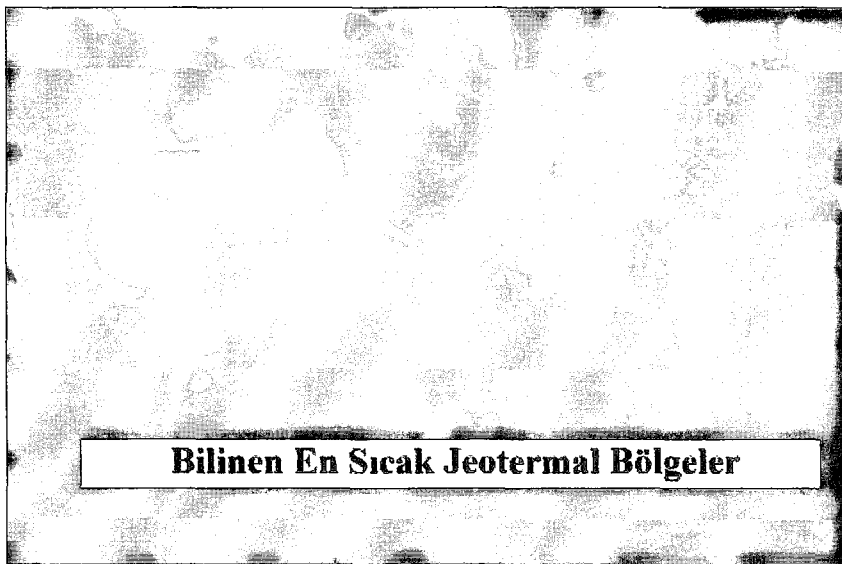
(Yılancı, 2003)

3.4. Dünyadaki Önemli Jeotermal Kuşaklar

Jeotermal enerji kaynaklarının Dünyadaki dağılımı yer kabuğunun hareketlerine bağlı olarak tektonik ve volkanik yönlerden aktif olan kıta kenarları, ada yayları, okyanus ortası sırtlarda yoğunudur ve birçok jeotermal kuşak bulunmaktadır. Şekil 3.3 dünya üzerindeki bu kuşakları göstermektedir.

And Volkanik kuşağı; Güney Amerikanın batı sahillerini kapsar. Volkanik olayların aktifliği yüzünde yüksek sıcaklıklı kaynakların bulunduğu bir kuşaktır. Ancak bu kuşaktaki jeotermal kaynaklar çok az sayıda değerlendirilmiştir. Çizelge 3.1’de dünyada jeotermal enerjinin kullanım amacına göre dağılımı belirtilmiştir.

Dünyadaki en büyük kuşaklar arasında yer alan Alp-Himalaya kuşağı Hindistan Plakası ile Avrasya Plakasının çarpışması sonucunda oluşmuştur. 150 km genişliğinde 3000 km uzunluğundadır. İtalya, Yugoslavya, Yunanistan, Türkiye, İran, Pakistan, Hindistan, Tibet, Çin ve Tayland’ı içine almaktadır (Yolcu, 2003).



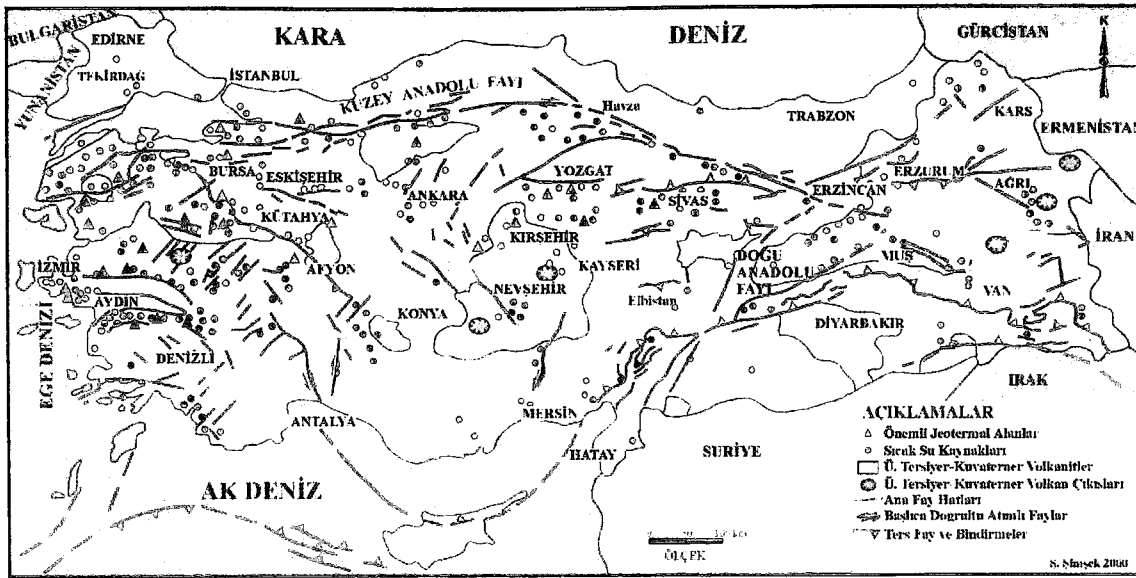
Şekil 3.3: Dünyada’ki jeotermal bölgeler (Yılancı, 2003)

Çizelge 3.1: Dünya’da jeotermal enerjinin kullanım yöntemleri (Yılancı, 2003)

	ELEKTRİK ÜRETİMİ			DOĞRUDAN KULLANIM		
		Toplam Üretim			Toplam Üretim	
	Kurulu Güç MWe	GWh/yıl	%	Kurulu Güç MWt	GWh/yıl	%
<i>Afrika</i>	54	397	1	125	504	1
<i>Amerika</i>	3390	23342	47	4355	7270	14
<i>Asya</i>	3095	17510	35	4608	24235	46
<i>Avrupa</i>	998	5745	12	5714	18905	35
<i>Okyanusya</i>	437	2269	5	342	2065	4
TOPLAM	7974	49263	100	15144	52979	100

3.5. Türkiye’deki Jeotermal Alanlar Ve Uygulamaları

Türkiye, Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde bulunması, magmatik ve volkanik aktivitelerin çok olması nedeniyle jeotermal açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Şekil 3.4 Türkiye’nin volkanik etkinliğini ve jeotermal alanları göstermektedir. Ülkemizde aktif faylara ve volkanizmaya bağlı olarak başta Ege Bölgesi olmak üzere, Kuzeybatı, Orta Anadolu, Doğu ve Güney Anadolu bölgelerinde 600 ’ün üzerinde jeotermal kaynak vardır.



Şekil 3.4: Türkiye'nin volkanik etkinliği ve jeotermal alanlar (Yılcı, 2003)

Türkiye 'de jeotermal enerji uygulamaları; daha çok konut ısıtması, sera ısıtması ve kaplıca amaçlı olarak yapılmaktadır. Çizelge 3.2'de belli başlı ısıtma sistemleri ve kapasiteleri belirtilmiştir. Elektrik üretimine yönelik yüksek sıcaklıklı sahalar bulunmasına rağmen üretim düşük seviyelerde kalmıştır. Bunun dışında Denizli Kızıldere sahasında karbondioksit üretimi de yapılmaktadır. 2000 yılı itibari ile Türkiye'nin ısıtma kapasitesi 52000 konut eşdeğeri olarak 493 MWt'dır (Dönmez, 2003).

Çizelge 3.2: Ülkemizdeki ısıtma sistemleri ve kapasiteleri

ŞEHİR	ISITILAN KONUT	KURULU	AKIŞKAN
GÖNEN	3000	4500	80
SİMAV	2700	6500	120
KIZILCAHAMAM	2000	2250	80
NARLIDERE	700	5000	98
SANDIKLI	1000	5000	70
KIRŞEHİR	1800	1800	57
BALÇOVA	6500	15000	125
AFYON	4000	10000	95
KOZAKLI	1000	1000	90
DIYADIN	1500	1500	78

Türkiye'deki 600 jeotermal kaynak alanı dikkate alındığında teorik olarak muhtemel jeotermal potansiyel 31500 MWt tahmin edilmektedir. Bu güne kadar 600 kaynak alanından sadece 124'ünde sondajlı çalışmalar yapılmıştır. Bu durum jeotermal arama çalışmalarının yetersiz olduğunu ve daha fazla sondajlı çalışmalar yapılması gerektiğini göstermektedir. Çizelge 3.3'te önemli sahaların sıcaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3: Jeotermal sahalar ve sıcaklıkları

SAHA ADI	REZERVUAR SICAKLIĞI (°C)
Kızıldere (Denizli)	242
Germencik (Aydın)	232
Salavatlı (Aydın)	171
Yılmazköy-İmamköy (Aydın)	142
Salihli-Caferbeyli (Manisa)	155
Salihli-Kurşunlu (Manisa)	96
Alaşehir-Kavaklıdere (Manisa)	116
Urganlı-Turgutlu (Manisa)	86
Simav (Kütahya)	162
Gediz-Abide (Kütahya)	97
Gölemezli	65
Karahayıt	55
Pamukkale	35
Seferihisar (İzmir)	153
Balçova (İzmir)	130
Dikili	130
Aliağa	96
Çeşme (İzmir)	62
Tuzla (Çanakkale)	174
Bigadiç (Balıkesir)	95
Hisaralan (Balıkesir)	100
Gönen (Balıkesir)	80
Saraycık (Manisa)	74
Emir-Kula (Manisa)	63
Kızılcahamam (Ankara)	86
Terme (Kırşehir)	57
Gecek-Ömer (Afyon)	98

Çizelge 3.3 devamı

Sandıklı (Afyon)	70
Kozaklı (Nevşehir)	93
Ziga (Aksaray)	65
Sıcak Çermin (Sivas)	49
Sorgun (Yozgat)	75
Van (Erciş)	80
Diyadin (Ağrı)	78
Nemrut (Bitlis)	59
Çermik (Diyarbakır)	51
Karaali (Şanlıurfa)	49
Akyazı (Sakarya)	84
Çekirge (Bursa)	82
Armutlu (Yalova)	77
Terme (Yalova)	66
Kurşunlu (Çankırı)	54
Reşadiye (Çankırı)	47
Kaplıca (Bolu)	45
Ayder (Rize)	56

Türkiye’de elektrik üretimi için elverişli, yüksek entalpili 6 saha bulunmaktadır. Bunlardan sadece Denizli Kızıldere sahasında elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Aşağıda elverişli yerlerin kuyubaşı sıcaklık değerleri verilmiştir.

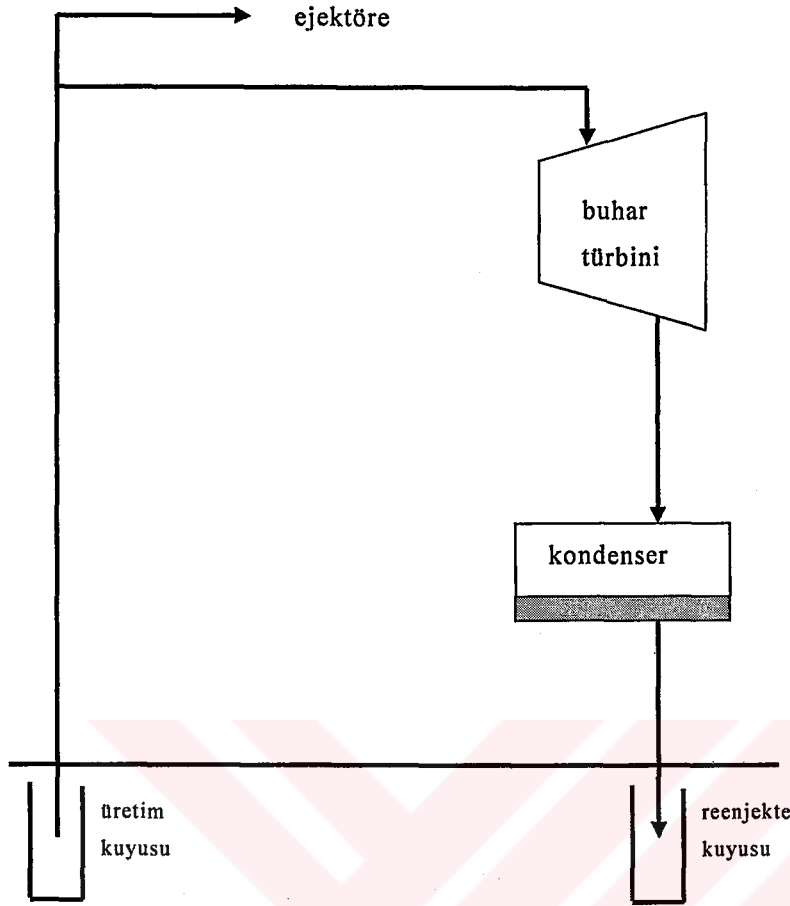
- Denizli – Kızıldere (200-242 °C)
- Aydın – Germencik (232 °C)
- Aydın – Salavatlı (171 °C)
- Çanakkale – Tuzla (173 °C)
- Kütahya – Simav (162 °C)
- İzmir – Seferihisar (150 °C)

3.6. Jeotermal Enerji İle Elektrik Üretimi

Çıkarılan jeotermal akışkanın haline bağlı olarak elektrik üretmek için farklı çevrimler kullanılır. Aşağıda anlatılacak olan çevrimlerin termodinamikteki çevrimin katı tanımına uymadığını belirtmek gerekir. Termodinamikte çevrim bir aracı akışkanın çeşitli hal değişimlerinden geçtikten sonra tekrar ilk haline döndüğü ve bunun tekrarlandığı durumlar için tanımlanmıştır. Bu tanıma Rankine çevrimi tam olarak uyar. Jeotermal elektrik santrallerinde ise jeotermal akışkan yer altından çıkarıldıktan sonra elektrik üretmek için kullanılır ve sonrasında ya atmosfere atılır ya da yer altına enjekte edilir (Kanoğlu, 2000). Dolayısı ile tam bir çevrim söz konusu değildir.

3.6.1 Kuru Buharlı Sistemler

En basit ve en ekonomik jeotermal sistemlerdir. Bu sistemlerde, jeotermal kuyudan çıkarılan buhar bir türbinden geçtikten sonra ya atmosfere atılır yada kondenserde yoğunlaştırularak yer altına enjekte edilir (Şekil 3.5). Kondenser sayesinde türbinin çıkışında atmosfer basıncının altında bir basınç yani vakum oluşturulur. Buhar, türbini daha düşük basınçta ve daha düşük sıcaklıkta dolayısıyla daha düşük bir entalpide terk eder. Böylece buharın ısı enerjisinin daha büyük bir oranı güce çevrilmiş olur. Bu nedenle kondenserli kuru buhar çevrimleri kondensersiz olanlardan benzer şartlar altında daha çok elektrik üretirler. Fosil yakıtlı buharlı elektrik santrallerinde türbin çıkış basıncının atmosfer basıncının çok altında tutulması aynı nedendendir (Kanoğlu, 2000).



Şekil 3.5: Kuru buharlı sistem akış şeması

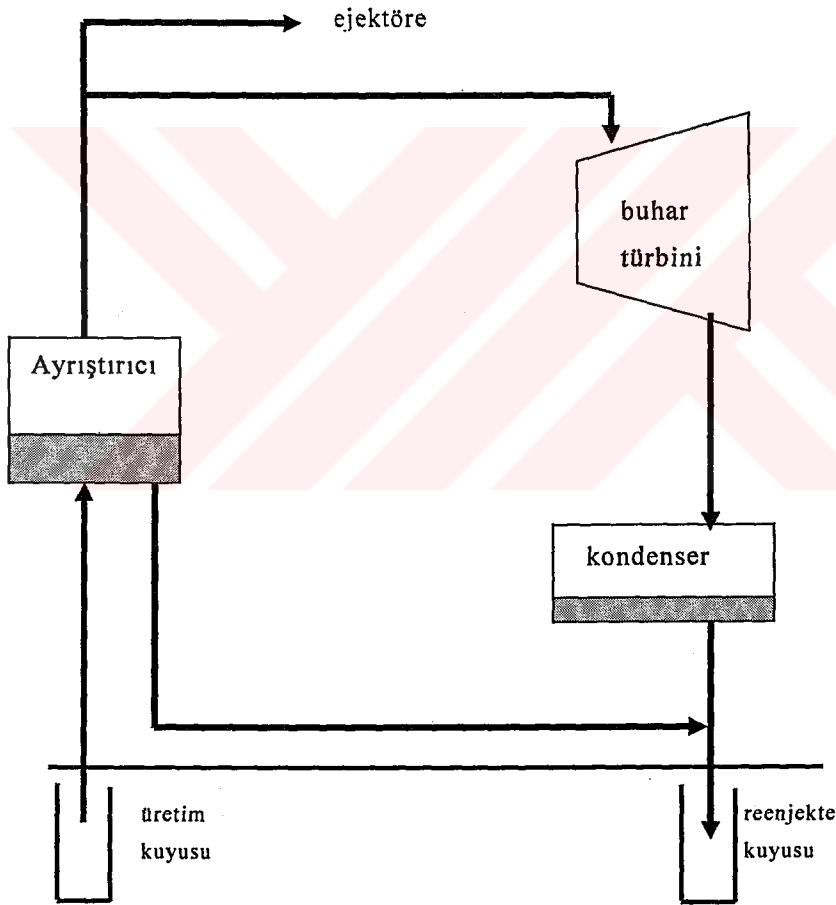
3.6.2 Buharlaştırmalı Sistemler

Yeraltından çıkarılan jeotermal akışkanın tamamen buhar fazında olması yaygın değildir. Çıkarılan jeotermal akışkan genellikle sıvı-buhar karışımıdır. Bu durumlarda buhar yüzdesi yeterince yüksekse buhar sıvıdan ayrıştırılır ve buhar türbine gönderilirken kalan sıvı yer altına enjekte edilir.

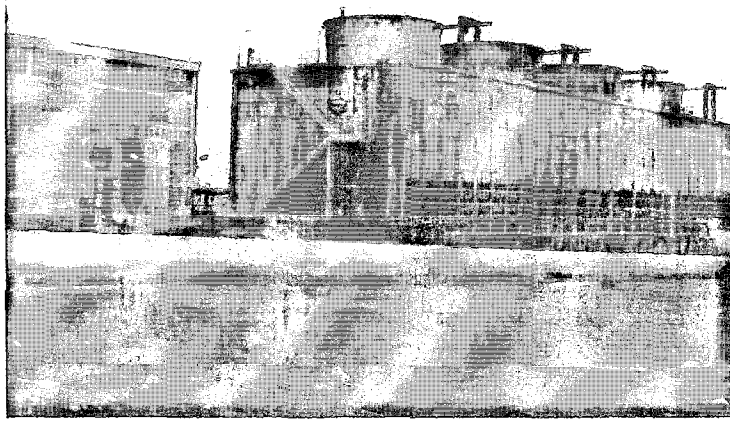
-Tek Buharlaştırmalı

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, buhar sıvıdan ayrıştırıldıktan sonra buhar türbine elektrik üretmek için gönderilirken kalan sıvı yer altına enjekte edilir. Türbinden çıkan

buhar bir soğutma kulesinde veya püskürtme havuzunda elde edilmiş soğutma suyu ile yoğunlaştırılır ve yer altına enjekte edilir. Soğutma suyu genellikle yer altından çıkarılan ve kullanılan jeotermal akışkandan başka bir şey değildir. Jeotermal santralin bulunduğu yerde ırmak ve göl gibi bir soğuk su kaynağı varsa kondenserde bu su da kullanılabilir. Bütün kondenserli jeotermal buhar çevrimlerinde kondenserlerde vakum oluşturmak için buhar ejektörleri kullanılır. Belli miktarda buhar ejektörlerde kullanılır (Kanoğlu, 2000). Şekil 3.7’de Kızıldere jeotermal güç santrali görülmektedir. Sistem tek buharlaştırmalı olarak dizayn edilmiştir.



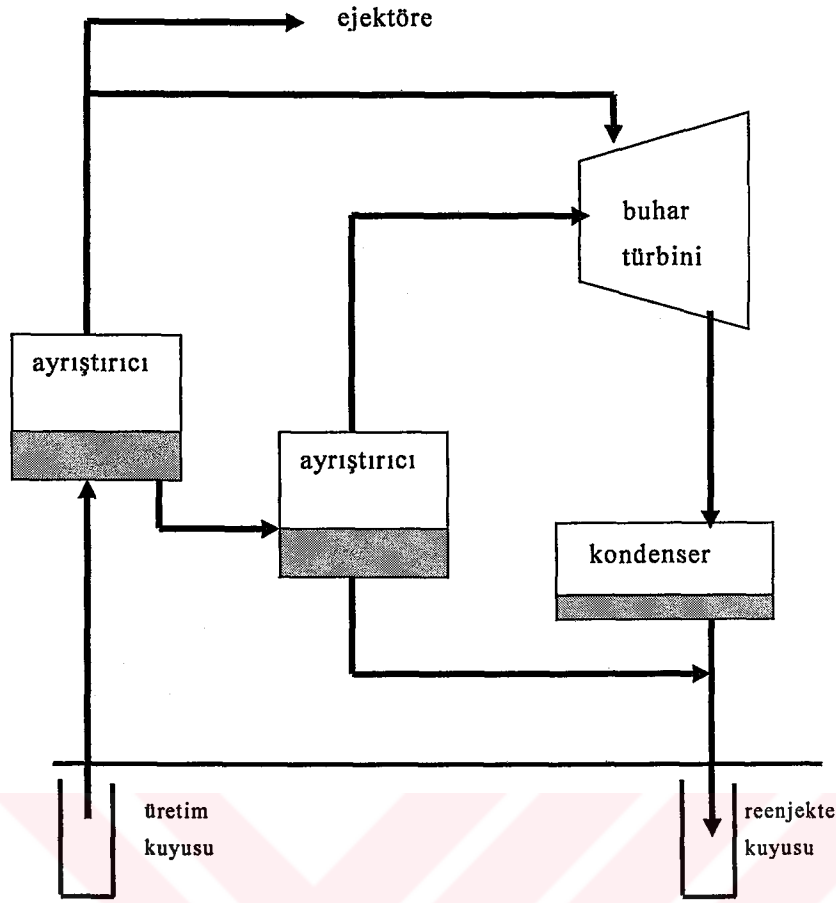
Şekil 3.6: Tek buharlaştırmalı sistem akış şeması



Şekil 3.7: Tek buharlaştırmalı bir santral örneği: Kızıldere sahası

-Çift Buharlaştırmalı (veya ikiden fazla buharlaştırmalı)

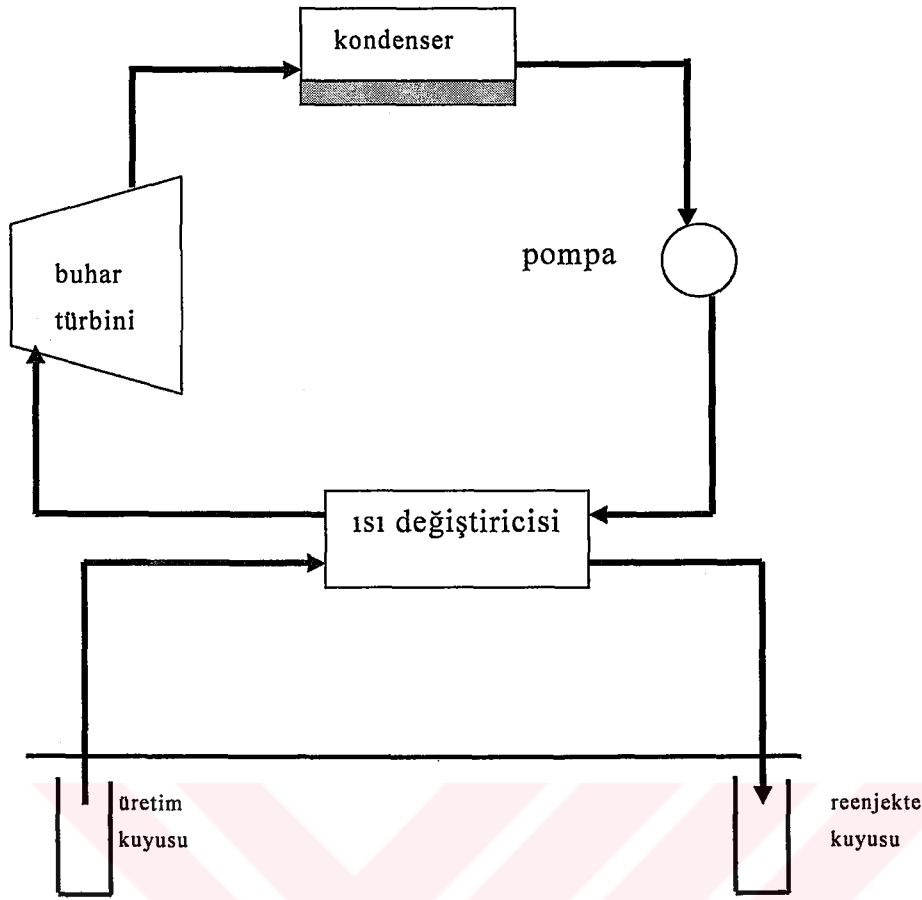
Yer altında çıkarılan jeotermal akışkanın sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda püskürtme işlemi birden fazla tekrarlanabilir. İlk püskürtmeden sonra elde edilen buhar türbine gönderildikten sonra kalan sıvının basıncı veya sıcaklığı hala yüksek ise bu sıvı ikinci bir püskürtme havuzunda tekrar püskürtülür (Şekil 3.8). Sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır ve bu buhar türbine gönderilir. İkinci püskürtmeden elde edilen buharın basıncı ilk püskürtmeden elde edilen buhar basıncından daha düşük olduğundan düşük basınçlı buharın, türbine daha düşük bir basınç kademesinde alınması sağlanır. Alternatif olarak santralde düşük basınçlı buhar için ikinci bir türbin kullanılabilir. Püskürtme sayısına göre jeotermal çevrim tek püskürtmeli ve çift püskürtmeli olarak adlandırılırlar. İkinci püskürtme, çevrimden elde edilecek gücü arttırmakla birlikte beraberinde gelen ek yapım ve işletme masrafları dikkate alındığında ekonomik olmayabilir. Pratikte çift püskürtmeli jeotermal santrallere rastlanmakla beraber ikiden fazla püskürtme ekonomik olmadığı için uygulanmamaktadır (Kanoğlu, 2000).



Şekil 3.8: Çift Buharlaştırmalı sistem akış şeması

3.6.3 Binary (İkili) Sistemler

Düşük sıcaklıkta (genellikle 170°C 'nin altı) ve sıvı ağırlıklı jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminde ikincil çevrim diye adlandırılan bir sistem kullanılır (Şekil 3.9). Bu sistemde türbinden geçen aracı akışkan jeotermal buhar değil fakat ikincil akışkan adı verilen ve kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından çok daha düşük olan bir akışkandır. Bu çevrimde jeotermal akışkan çevrimin ısı kaynağını oluşturur. İzobütan, İzopentan, Pentan ve R-114, ikincil çevrim santrallerinde yaygın olarak kullanılan ikincil akışkanlardır (Kanoğlu,2000).



Şekil 3.9: İkili (binary) sistem akış şeması

3.6.4 Güç Santralleri Maliyetlerinin Karşılaştırması

Elektrik üretimi için kurulacak olan bir jeotermal güç santralinde, toplam yatırım maliyetinin yaklaşık % 50'sini jeotermal akışkanın yer altından çıkarılması ve tekrar yer altına enjekte edilmesi; % 40'ını elektrik santralinin yapılması ve kalan % 10'unu ise diğer masraflar oluşturur.

Üretim ve enjekte kuyularının delme ve geliştirme masrafları üretilecek her kW elektrik için 500 ABD \$ ile 4000 ABD \$ arasında değişirken elektrik santralinin yapım masrafları üretilecek her kW elektrik için 1500 ABD \$ ile 1700 ABD \$ dolar arasında değişir.

Dolayısıyla toplam masraflar her kW için 2000 ABD \$ ile 6000 ABD \$ arasında değişir. Çalıştırma ve bakım masrafları toplam elektrik üretimi masraflarının % 10'u ile % 20'si arasındadır. Elektrik üretim masrafları üretilen her kWh elektrik için 0,03 ABD \$ ile 0,12 ABD \$ arasında değişir.

Kondensersiz bir jeotermal elektrik santralının yapım masrafı üretilecek her kW elektrik için 1050 ABD \$ ile 1250 ABD \$ arasındayken kondenserli bir santralin masrafı 1500 ABD \$ ile 1700 ABD \$ arasında değişir. İkincil bir santralin masrafı ise yaklaşık 1900 ABD \$'dır.

Petrol ve kömür yakıtlı ve nükleer elektrik santrallerinde her kWh elektriğin masrafı yaklaşık 0,06 ABD \$ iken hidroelektrik santrallerinde bu masraf 0,03 ABD \$ ile 0,09 ABD \$ arasındadır. Jeotermal elektrik santralleri hidroelektrik santrallerinden daha ekonomik olarak ve daha küçük boyutlarda yapılabilirler.

Jeotermal enerjinin bölge ısıtması ve soğutmasında kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, jeotermal elektrik santrallerinin yapım masraflarının daha düşük olduğu ve kendini amorti etme süresi daha kısadır.

3.7 Jeotermal Enerji ve Çevre

Jeotermal projelerin çevresel yönü, dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi ile birlikte gittikçe artan bir ilgi toplamaktadır. Sadece etkileri açısından değil, tüm doğal kaynakların etkin ve akıllıca kullanılması gerektiği konusunda büyük bir uyanış görülmektedir (Yüksel, 2004).

Gerçekte, çevreye doğrudan ya da dolaylı bazı zararlar vermeden enerjiyi insanların kullanabileceği bir forma dönüştürebilmenin herhangi bir yolu yoktur.

Jeotermal enerjinin kullanımı, en az kirlilik yaratan formlardan biri olarak kabul edilmesine rağmen, onun da çevreye bazı olumsuz etkileri vardır. Geleneksel atmosferik basınçlı ya da yoğunlaştırılmalı jeotermal elektrik santrallerinde özellikle hava kalitesi açısından çevreye olan olumsuz etkiler potansiyel olarak fazladır. Fakat küçük jeotermal kaynaklar ve santrallerde bu kabul edilebilir limitlerde tutulabilir. Binary santrallerde elektrik üretimi ise, çevreyi geleneksel sistemlere göre çok daha az oranda etkiler (Yüksel, 2004).

Çevre üzerinde olabilecek herhangi bir değişikliğin yasa ve düzenlemelere uygunluğu dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Bazı ülkelerde bu yasaların yaptırım gücü fazladır. Fakat bazı zincirleme olayların etkilerini önceden belirlemek çok zordur. Örneğin, bir santralden atık suyun herhangi bir su havzası ya da nehre atılmasıyla sıcaklığın 2-3 °C yükselmesi, ekosisteme zarar verir. Sıcaklık değişimine son derece hassas olan bitki ve hayvan organizmaları yavaş yavaş yok olur. Su sıcaklığının yükselmesi balık yumurtalarının gelişimine zarar verebilir. Eğer balıklar yeniyorsa ve civardaki bir balıkçı topluluğu için bir geçim kaynağı iseler, balıkların yok olması daha geniş bir topluluk için kritik olabilir.

Dünyada gittikçe artan eğilim, yerel kaynakların kullanımına olan dönüşüm ve bu nedenle jeotermal kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması yönündeki çalışmalar artmaktadır. Yüksek sıcaklıklı kaynakların kullanımında öncelik elektrik üretimine verilir, fakat bu proses sırasında üretilen kullanılabilir ısı enerjisi dikkate alınmaz. Örneğin, Kızıldere-Denizli jeotermal santralinin atığı olan 1000 t/h, 147 °C'deki suyun değerlendirilmesi gerekmektedir. Enerji içeriği dışında, jeotermal akışkan çok miktarda çözünmüş mineraller de içerir. Bunların çoğu, silika ve karbonat gibi, neden oldukları problemler açısından değerlendirilir, fakat bunun yanında jeotermal akışkanlar pek çok yararlı mineralleri de içerir. Gerçekte, uygun bir

şartlandırma ile jeotermal akışkan sulama veya diğer kullanımlar için uygun hale getirilebilir (Yüksel, 2004).

Jeotermal akışkanın kullanıldıktan sonra atımında iki temel yöntem, enjeksiyon ve yüzey sularına boşaltmadır. Enjeksiyon, başlangıçta rezervuar basıncının korunması açısından yararlı olmasına rağmen, dünyada yapılan uygulamalarda rezervuarın soğuması gibi olumsuz etkilerinin ağır bastığı da görülmüştür. Son zamanlarda enjeksiyon, yüzeye atımla ilgili çevresel problemlerden kaçınmak amacıyla uygulanmaktadır.

3.7.1 Fiziksel Etkiler

Bir jeotermal sahanın arama, geliştirme ve kullanımı, kaynağın civarındaki fiziksel çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle jeotermal elektrik üretimi projelerinin aşamaları sırasında görülebilecek fiziksel etkiler aşağıda verilmiştir.

3.7.1.1 Sondaj

Çevre üzerindeki ilk belirgin etki sondaj sırasında oluşur. Sondaj donanımının kuruluşu, kuyu başına ulaşımı sağlayacak yol ve kuyu çevresindeki gerekli altyapıyı gerektirir. Kuyu çevresinde, 300-500 m² (küçük bir sondaj kulesi, maksimum derinlik 300-700 m) ile 1200-1500 m²'lik (küçük-orta bir sondaj kulesi, maksimum derinlik 2000 m) bir alana ihtiyaç vardır. Yapılan işlemler, bu alandaki yüzey morfolojisini değiştirir, yerel bitki örtüsü ve vahşi yaşama zarar verebilir. Potansiyel akiferler geçildiğinde yer altı suları ile sondaj akışkanlarının karışmasını önlemek için kuyuların duvarları kaplanmalıdır. Sondaj ve testler sırasında ortaya çıkan bir diğer problem gürültü kirliliği ve bu işlem sırasında istenmeyen gazların atmosfere verilmesidir. Sondajda kullanılan çamur çevreye zararlı olduğundan kullanıldıktan sonra temizlenmeli ve sıvıdan ayrılmalıdır. Sondaj sırasında çıkarılan katı maddeler özel atık tanklarında ya da havuzlarında

depolanmalıdır. Sondaj tamamlandığında çevreye verdiği zararlarda sona erer, sürekli değildir.

3.7.1.2 Boru Hattı

Sondajdan sonra ikinci aşama olan jeotermal akışkanın taşındığı boru hattının kurulması, yüzey morfolojisi ile bitki ve hayvan yaşamını etkiler. Örneğin, Yeni Zelanda'da eğer boru hattı koyun ve ineklerin geçtiği yollardan geçiyorsa, belli yerlerde boruları yükseltmek zorunludur. Ayrıca boru hatlarının görüntüsü panoramayı da bozar. Fakat bazı bölgelerde özellikle Larderello, İtalya'da boru ağı panoramanın bir parçası haline getirilmekte ve turist çekmek için kullanılmaktadır.

3.7.1.3 Su

Jeotermal santrallerden atılan sular, doğal su kaynaklarından daha yüksek sıcaklığa sahip olduklarından potansiyel ısıl kirleticilerdir. Bu akışkanlar, eğer kimyasal çevreye zarar vermiyorsa soğutulduktan sonra yüzey sularına atılabilirler.

3.7.1.4 Yüzey Çökmesi

Rezervuardan büyük miktarlarda akışkan çekimi, bölgenin morfolojisine bağlı olarak toprak yüzeyinde kademeli olarak ortaya çıkan çökmelerle kendini gösterebilir. Bu geri dönüşü olmayan bir olaydır. Geniş bölgelerde görülen yavaş bir proses olduğu için bu bir felaket değildir. Ancak yıllar sonra farkedilebilir derecelere ulaşır. Önleme ya da azaltmanın yolu ise enjeksiyondur. Örneğin Wairekei, Yeni Zelanda'da enjeksiyon olmaması nedeniyle 1960'tan bu yana görülen toplam çökme 10 m'ye ulaşmıştır.

3.7.1.5 Mikrodepremler

Jeotermal akışkanın büyük miktarlarda çekimi ve/veya enjeksiyonu bazı bölgelerde sismik aktivite oluşturabilir ya da tetikleyebilir. Bunlar mikro-sismik olaylardır ve sadece sismograflarla belirlenebilirler. Bu nedenle zarar verici bir etkisi yoktur. Varolan veriler jeotermal enerjinin işletilmesi sırasında sismik riskinin çok düşük olduğunu göstermektedir ve şu ana kadar belirlenmiş herhangi bir büyük sismik olay yoktur.

3.7.1.6 Gürültü

Jeotermal elektrik santrallerinin işletilmesinde gürültü bir problemidir. Yüksek basınçta yeryüzüne çıkan su ve buhar susuturucular kullanılarak gürültüleri ortadan kaldırılmaktadır. Hacim ısıtma uygulamalarında üretilen gürültü ısı üretim merkezi içinde kalır ve ihmal edilebilecek düzeydedir.

3.7.2 Kimyasal Etkiler

Toprak, su ve havadaki kimyasal kirlilik konusundaki endişeler gün geçtikçe artmaktadır. Kirliliğin insan sağlığı, evcil hayvanlar ve yaban hayatı üzerine etkileri, hükümetleri çevre koruma üzerine kanunlar düzenlemeye itmektedir. Sonuç olarak çoğu ülkelerde endüstriyel Gelişimler bu kanunlara tabidir. Sorumlulukları, kendi atıklarının etkilerini belirleme ve bu atıkların kimyasal kalitesini gözlemlemektir. Jeotermal güç santralleri sık sık fosil yakıtlara ve nükleer güç santrallerine göre "temiz" bir alternatif olarak göz önüne alınır. Soğutma suyu atımı, gaz, buhar ve kuyu yoluyla indirgenebilir ya da tamamen ortadan kaldırılabilir.

3.7.2.1 Gaz Emisyonu

Jeotermal akışkanlar, yoğuşmayan gazlar ve miktarı sıcaklıkla artan çözünmüş katı partiküller içerir. Yoğuşmayan gazlar, çoğunlukla Karbondioksit (CO_2) ve değişen miktarlarda Hidrojen sülfür (H_2S), Amonyak (NH_3), Azot (N_2), Hidrojen (H_2), Civa (Hg), Bor buharı (B), Radon (Rn), Metan (CH_4) gibi hidrokarbonlardan oluşur.

Santralin işletimi sırasında çevresel problemler de artar. Bir standart buhar çevrim santralinin kullanıldığı jeotermal güç üretimi, yoğunlaşmayan gazların ve küçük katı parçacıkların atmosfere bırakılması ile sonuçlanır. Buhar yoğun sahalarda ve tüm atıkların enjekte edildiği sahalarda, buhar içerisindeki gaz, çevresel açıdan en önemli atıktır. En belirgin gaz emisyonu, santralde gaz atım sistemlerinde görülür.

Gaz ve katı atıklar; sondaj, sızma, temizleme ve testler dışında vanalardan ve kuyu dozaj ayarlaması sırasında ortaya çıkar. CO₂ gazı sera etkisi nedeniyle global etkiye sahip olmasına rağmen H₂S atımının etkisi lokaldır ve topografyaya, rüzgar yönüne ve toprak kullanımına bağlıdır. Ekipman korozyonu, asit yağmurları, göz ve solunum yolları tahrişi ve hoş olmayan kokusu nedeniyle rahatsızlık vericidir.

Radon seviyesinin gözlemlenmesi gerekmesine rağmen, jeotermal gaz emisyonları ile hissedilebilir seviyelere çıktığı konusunda kanıt yoktur. B, NH₃ ve Hg toprak ve bitki örtüsünü kirletirler. Bu kirleticiler ayrıca yüzey suları ve su canlıları üzerinde de etkilidir (Yüksel, 2004).

3.7.2.2 Kuyu ve Soğutma Suları

Bütün kuyu ve soğutma suyu atıklarının enjeksiyon olmaksızın çevreye atımı, yerel ve bölgesel yüzey sularını etkiler. Akışkan atımının kimyasal kompozisyonu, rezervuarın jeokimyasına ve santralin işletme koşullarına bağlıdır. Rezervuar kimyası her saha için farklıdır. Jeotermal akışkanlar lityum, boron, arsenik, florid, hidrojen sülfür, civa, kurşun, çinko, ve amonyak gibi kimyasal kirleticiler ile birlikte büyük miktarlarda karbonat, silikat, sülfat ve klorür içerirler. Akışkan yüzeye doğru çıkarken, kuyu içerisinde çözünmüş CO₂ gaz fazına geçerek sıvı fazı terk eder. Bu sırada üretim kuyusu içerisinde kalsiyum karbonat (CaCO₃) çökmesi oluşur. Bu durum yüksek yoğunlaşmayan gaz içeren sahalarda önemli bir problemdir. Enjeksiyon sırasında görülen problem ise akışkan sıcaklığının düşmesinden dolayı oluşan silika

(SiO₂) çökelmesidir. Jeotermal akışkanın bir nehre ya da göle bırakıldığı durumlarda ise bu kirleticiler, su canlıları, bitkiler ve/veya insan sağlığına zarar verecek potansiyele sahiptir. Yüksek tuz içeren suların atımı da su kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir (Yüksel, 2004).

3.7.3 Biyolojik Etkiler

Jeotermal projelerin biyolojik etkileri; insan ve hayvan sağlığı ile bitki örtüsüne olan etkileri içerir. Bu etkilerin kontrolü, çevreye atılabilecek kirleticilerin seviyesi için bir üst limit belirlenmesi ile sağlanabilir. Tavsiye edilen sınır değerlerin üzerinde biyolojik yaşam üzerindeki olumsuz etkiler belirlenebilir, bu limitlerin altında uzun ya da kısa vadede etkiler olmaması beklenir. Hava, içme suyu, su canlılarını koruma, ürün sulama, su stoğu ve çevrenin estetik kalitesini koruma gibi değişik amaçlar için değişik kriterler belirlenir (Yüksel, 2004).

3.8 Re-enjeksiyon

Jeotermal rezervuardan üretilen akışkanın, her hangi bir amaçla kullandıktan sonra jeotermal alan içerisine ve/veya çevresinde üretim yapılan rezervuarın veya sistemin yer altında belirlenen geçirimli bir zonuna veya başka bir yerden belirlenen uygun bir zona geri basılması olayına **Reenjeksiyon** denir (Yüksel, 2004).

Reenjeksiyon uygulaması yapılmasının iki amacı vardır. Bunlar;

- Çevreyi korumak
- Rezervuarın performansını arttırmak ve rezervuarın kullanım süresini (ömrünü) arttırmaktır.

Rezervuardan elde edilen akışkanda bazı kimyasal maddeler (kirleticiler) vardır. Aynı zamanda bu akışkan, yüksek sıcaklığa sahiptir. Bu kirletici kimyasal maddeler As, Cl, CO₂, H₂S vb. dir. Akışkanın kullanılmayan kısmının nehirlerle veya sulama yapılan yer altı su zonlarına ulaşması halinde, doğal hayatta büyük zararlar ve tahribatlar oluşur. Örneğin bitki örtüsü ve canlı hayata zararlı etkileri vardır.

Rezervuardan yapılan üretim, basıncın ve bazı durumlarda da rezervuar sıcaklığının düşmesine sebep olur. Reenjeksiyon çalışması doğru bir şekilde yapılması durumunda, rezervuardaki basınç ve sıcaklık düşümünü önleyecek ve azaltacak dolayısıyla rezervuar ömrünü uzatacak bir çalışmadır.

Reenjeksiyon faaliyetlerinin jeotermal işletmeler için ek bir maliyet getirdiği düşünülmektedir. Ancak, jeotermal rezervuarın tüm ömrü için yapılacak olan doğru bir maliyet analizi, reenjeksiyon ile kullanımın, reenjeksiyon kullanılmadan kullanıma oranla, çok daha ekonomik olduğunu ortaya koymaktadır (Yüksel, 2004).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

EKSERJİ ANALİZİ

4.1. Ekserjinin Tanımı

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için, kullanılabilir enerji olarak da bilinen ekserjiyi enerjinin faydalı kısmı olarak düşünebiliriz. Yani; enerjinin faydalı kısmı, enerjinin başka enerji formuna dönüştürülebilen kısmıdır. Bir madde ya da bir enerji akışına bağlı ekserji, baca gazı, soğutma suyu ve ısı kaybı şeklinde çevreye atılır. Hem ekserji tahribi hem de ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanun analizi de denilen “Ekserji Analizi”nden saptanır. Termodinamiğin ikinci kanunu, hem bir enerji taşıyıcının gerçek termodinamik değerini hem de proses ya da sistemlerden olan kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliklerin hesaplarının yapılabilmesi sonucu ile bir enerji dengesini tamamlar ve geliştirir. Ekserji tahribi direk olarak sistem içindeki tersinmezliklerin sonucudur.

Termodinamiğin ikinci kanunu, kompleks termodinamik sistemlerin optimizasyonunda çok güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır. İkinci kanun ışığında mühendislik aygıtlarının performansının belirlenmesi için; kullanılabilirlik, tersinir iş, tersinmezlik ve ikinci kanun veriminin tanımlamaları ile işe başlanmıştır. Kullanılabilirlik, verilen bir durumdaki sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iş miktarıdır. Tersinir iş ise, belirli iki durum arasında bir proses geçiren sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iştir. Ayrıca tersinmezlik, bir proses sırasında kaybedilen iş potansiyelidir ve bu kayıp iş potansiyeli, tersinmezliklerin sonucu olarak meydana gelir (Çengel ve Boles, 2000).

Yeni bir enerji kaynağı, örneğin sıcak yer altı suyu bulunduğu zaman ilk yapılan işlemlerden biri, kaynakta bulunan enerjinin miktarını yaklaşık olarak belirlemektir. Fakat sadece bu bilgiye sahip olmak, burada bir güç santrali yapmaya karar vermek için yetersizdir. Asıl bilinmesi gereken, kaynağın iş potansiyeli veya kaynağın iş yapma olanağıdır. Başka bir deyişle, kaynakta varolan enerjinin ne kadarının, örneğin bir elektrik jeneratörünü çalıştırmak için kullanılabilir işe dönüştürülebileceğinin bilinmesi gerekir. Enerjinin geri kalanı veya işe dönüştürülemeyen bölümü, sonuçta atık ısı olarak çevreye verileceği için önem taşımamaktadır. Bu bakımdan, belirli bir halde ve belirli bir miktarda enerjiden elde edilebilecek işi veren bir özelliğin tanımlanması çok yararlı olacaktır. Bu özelliğin adı kullanılabilirliktir (Çengel ve Boles, 2000).

Kullanılabilirlik çözümlemesinde ilk hal belirlidir, bu nedenle değişken değildir. İki hal arasında sistem tarafından yapılan en çok iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sistemden elde edilebilecek en çok işi belirlerken tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Son olarak, sistemden en çok işi elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Bir sistemin ölü halde olması, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Başka bir deyişle, çevre ile ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistemin ölü haldeki özellikleri, (P_o , T_o , h_o , u_o ve s_o) sıfır indisıyla gösterilir. Aksi belirtilmedikçe, ölü hal sıcaklığı 25 °C ve basıncı 1 atm alınabilir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği sıfırdır.

Bir sistemden en çok işi elde edebilmek için sistemin son halinin ölü hal olma zorunluluğu şöyle açıklanabilir: Sistemin son haldeki sıcaklığı eğer çevre sıcaklığının üzerinde veya altında ise, çevre sıcaklığıyla bu sıcaklık arasında çalışan bir ısı makinesi aracılığıyla iş yapılabilir. Sistemin son haldeki basıncı eğer çevre basıncının üzerinde veya altında ise bu basınç farkından yararlanarak genişleme işi yapılabilir.

Bu düşünceler ışığında şu sonuca varılabilir: Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik (ekserji) diye adlandırılır. Ekserjinin bir ısı makinesinin gerçek bir uygulamada yapabileceği iş olarak düşünülmemesi gerekir. Bu tanım, bir makinenin termodinamiğin yasalarına ters düşmeden yapabileceği işin üst sınırını belirler. Bir sistemin kullanılabilirliğiyle yaptığı iş arasında küçük veya büyük bir fark her zaman vardır. Bu fark mühendisler için daha iyinin sınırlarını çizer. Verilen bir halde sistemin ekserjisi, sistemin özelliklerinin yanı sıra, çevre koşullarına, başka bir deyişle ölü hale bağlıdır. Bu bakımdan ekserji sadece sistemin değil, sistem çevre ikilisinin bir özeliğidir. Çevreyi değiştirmek kullanılabilirliği artırmanın bir yolu olabilir, fakat kolay bir yol olmadığı açıktır (Çengel ve Boles, 2000).

4.2. Ekserji Kavramının Önemli Boyutları

1) Ekserji, sistem ve çevrenin bir arada oluşturduğu kombine çevrimden elde edilebilen maksimum teorik iştir. Buradaki sistem, verilen bir durumdan çevre ile denge durumu olan ölü duruma geçer. Ölü durumda kombine sistem enerjiye sahiptir ancak ekserjiye sahip değildir.

2) Sistemin tüm durumları için ekserji, sıfıra eşit ya da sıfırdan büyüktür.

3) Değeri sistem durumu ile belirli olduğundan ekserji, ekstensif özelliktir ve burada bahsi geçen çevre daha önceden belirlenmiş olmalıdır. Ekserji, birim kütleye ya da birim mol başına göre yazıldığında intensif özellik olarak temsil edilebilir.

4) Ekserji, sistem durumunun çevresel durumdan uzaklaşma ölçüsüdür. Verilen bir durumdaki T sıcaklığı ile çevrenin T_0 sıcaklığı arasındaki fark büyüdükçe ekserji değeri de buna bağlı olarak büyür.

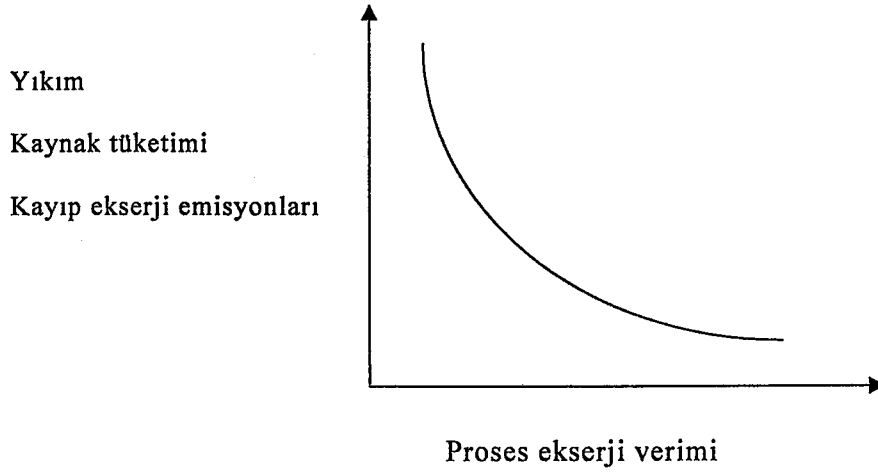
5) Çevreye göre göreceli olarak belirlendiğinden, sistemin kinetik ve potansiyel enerji büyüklerinin tamamı ekserji büyüklüğüne katılır.

6) Ekserji, kimyasal ve termomekaniksel ekserjilerin toplamı şeklinde ifade edilir. Termomekaniksel ekserji, fiziksel, kinetik ve potansiyel ekserji şeklinde sınıflandırılır.

7) Ekserji, sistemler arasında transfer edilebilir ve sistemler içindeki tersinmezlikler yüzünden tahrip edilebilir. Bununla beraber ekserji, bir ekserji dengesi ile açıklanabilir (Erduranlı,1997).

4.3. Ekserjinin Önemi

Günümüzde birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerji maliyetlerinin hızla artmasından dolayı termal sistemlerde enerji kayıplarının belirlenmesinde ekserjetik analizler büyük önem kazanmıştır. Ekserji kayıplarının azalması, yani ekserji veriminin artması halinde proste gerçekleşecek yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları ters orantılı olarak azalacaktır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Bir prosesin ekserji verimi ile yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları arasındaki ilişki (Rosen ve Dincer, 1997)

Ekserjetik analizde, maddenin korunumu, ve termodinamiğin II. kanunu kullanılmaktadır. Çizelge 4.1 'de enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 4.1: Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Wall ve Gong, 2001; Çengel ve diğ.,2002)

Enerji	Ekserji
Termodinamiğin I. Kanunu ile ilgilidir.	Termodinamiğin II. Kanunu ile ilgilidir.
Daima korunur. Yoktan var edilemez, veya yok edilemez.	Tersinir proseslerde korunur, tersinmez proseslerde daima kaybolur.
Enerji, hareket veya hareket üretebilme kabiliyetidir.	Ekserji, iş veya iş üretebilme kabiliyetidir.
Niceliğin bir ölçütüdür.	Niceliğin ve kalitenin bir ölçütüdür.
Sadece madde ve enerji akış parametrelerine bağlı, çevre parametrelerinden bağımsızdır.	Madde ve enerji akış parametrelerinin yanı sıra çevre parametrelerine de bağlıdır.

Ekserji, en kısa ifade ile, kullanılabilir enerji şeklinde tanımlanmaktadır. Ekserji aynı zamanda, verilmiş bir durumda bütün diğer enerji türlerine dönüştürülebilir enerji miktarının bir ölçüsü de olmaktadır. Diğer enerji türlerine dönüşebilme özelliği enerjinin değer ölçüsü olarak alınırsa, çeşitli enerji türleri üç ayrı grupta toplanabilir.

- 1) Diğer enerji türlerine sınırsız veya tamamen dönüştürülebilir enerji (örneğin; mekanik enerji, elektrik enerjisi, potansiyel enerji, kinetik enerji vb.)
- 2) Diğer enerji türlerine sınırlı (kısmen) dönüştürülebilir enerji (örneğin; iç enerji, ısı enerjisi vb.)
- 3) Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi imkansız enerji (örneğin; çevrenin iç enerjisi vb.)

Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi olanak dışı olan enerjiye kullanılmaz enerji, bağlı enerji adı verilmektedir. Dolayısıyla bütün enerji türleri için en genel bir ifade şöyle yazılabilir.

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

Elektrik enerjisi ve mekanik enerji gibi enerji türlerinin anerji bölümü sifıra eşittir. Aynı şekilde çevrenin iç enerjisinin tamamı anerji olduğu için çevre enerjisinin tamamı anerji olduğu için çevre enerjisinin ekserjisi de sifıra eşit olmaktadır.

Ekserji mühendislik biliminde şu iki temel konuyu kapsamaktadır. Bunlar çevre ve ekonomi. Ekserji, eko teknolojik bakımdan şu üç temel konsept kapsamında ele alınmaktadır.

- 1) Minimum çevresel etki, maksimum enerji ve enerji kaynaklarının ideal koşullarda işletileceği teknolojiler.
- 2) Çevreyi kirlenme potansiyelleri yüksek olan maddelerin çevresel davranışları.

3) Çevresel değerlendirme, enerji ve toplum güvenliği.

Yukarıdaki temel ekserji konseptlerine bakarak ekserjinin termodinamik bir potansiyel olduğu, iş yapabilme ve kullanılabilir enerjinin bir ölçütü olduğu söylenebilir.

Ekserji teknik iş yapma kapasitesi olarak da tanımlanabilir. Ekserji sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmakta aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır (Çengel ve Boles, 2000).

4.4. Ekserji Ve Çeşitleri

Enerjinin başka bir enerjiye tamamen dönüşen kısmına ekserji denir. Ekserji kelimesi Yunanca ex (dış) ve ergon (kuvvet ve iş) kelimelerinden türetilmiştir. Başka bir deyişle ekserji, tamamen başka bir enerjiye dönüşen enerji oranını göstermektedir. Daha sonraları ekserji, verilen şartlardaki bir sistemin, çevresi (ölü hal) ile aynı şartlara getirilmesi sonucu elde edilebilecek maksimum iş potansiyeli şeklinde tanımlanmıştır.

4.4.1. Ölü Hal

Bir sistemin ölü hal olması çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü halde iken sistem çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Yani çevreyle ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistem ölü halde iken çevre ile kimyasal reaksiyona girmez. Sistemin ölü haldeki özellikleri P_0, T_0, h_0, u_0 ve s_0 'dır. Ölü hal durumunda $P_0 = 1$ atmosfer (101.325 kPa) ve $T_0 = 25^\circ C$ (298.15 K)'dir.

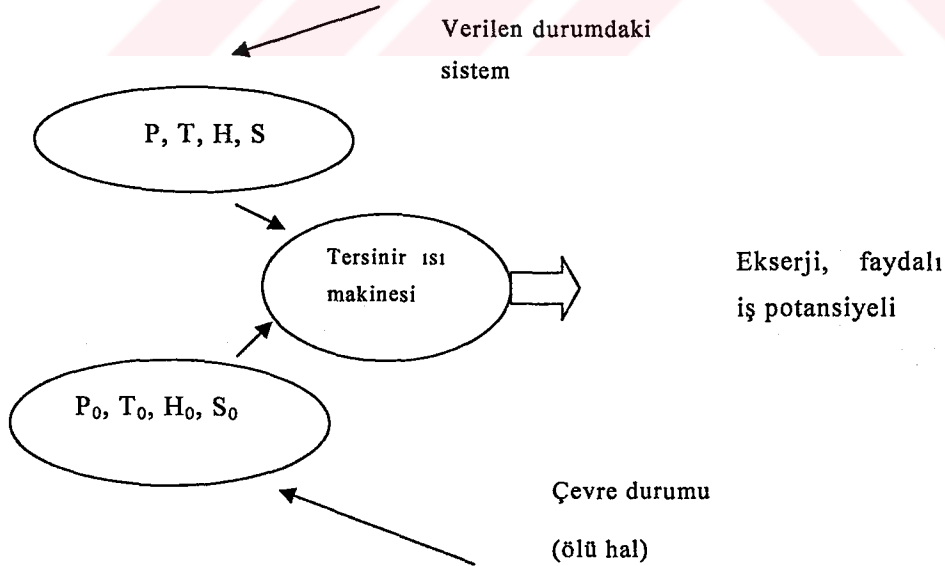
Bu tanımlardan hareketle Termodinamiğin I. ve II. kanunu ekserji kapsamında kısaca şöyle ifade edilir. I. Kanun; bütün termodinamik süreçlerde enerji ve ekserjinin toplamı sabit kalır, II. Kanun ise; tersinir süreçlerde ekserji sabit kalır, yani tersinmez süreçlerde ekserjinin bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür veya enerji ekserjiye dönüşmez şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadeler ışığında ve aşağıdaki şekil dikkate alınarak ekserji için şöyle bir matematiksel denklem yazılabilir. Yani genel ekserji; kinetik, potansiyel, kimyasal ve fiziksel ekserjilerin toplamıdır.

$$B = B_K + B_P + B_{kim} + B_{fz} \quad (4.1)$$

4.4.2. Fiziksel Ekserji

Sistemin sıcaklığı T ve basıncı P ilk durumundan T_0, P_0 halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır (Şekil 4.2).

$$B_{fz} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (4.2)$$



Şekil 4.2: Verilen durumla çevre arasında çalışan tersinir bir ısı makinesinin gösterimi

Bir sistemde iki durum arasındaki fiziksel ekserji farkı da;

$$B_{fiz1} - B_{fiz2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Fiziksel ekserji aşağıda gösterildiği gibi iki bileşenden oluşmaktadır.

$$B_{fiz} = B_{\Delta T} + B_{\Delta p} \quad (4.4)$$

bu denklemdeki birinci terim, fiziksel ekserjinin termal bileşeni olup sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkmaktadır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$B_{\Delta T} = \left[- \int_{T_1}^{T_0} \frac{T - T_0}{T} dh \right]_P \quad (4.5)$$

Denklemdeki ikinci terim ise, basınç bileşeni olup basınç farkından dolayı meydana gelmektedir. Basınç bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$B_{fiz} = T_0(s_0 - s_1) - (h_0 - h_1) \quad (4.6)$$

4.4.3. İdeal Gazların Fiziksel Ekserjileri

Herhangi durumda ve ideal gazdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$B_{fiz} = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (4.7)$$

4.4.4. Katı ve Sıvıların Fiziksel Ekserjileri

Katı veya sıvı olan ve herhangi bir durumdaki sistemin fiziksel ekserjisi aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.

$$B_{fiz} = c \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + v_m (P - P_0) \quad (4.8)$$

4.4.5. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji, bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişinden dolayı yaptığı maksimum iş olarak tanımlanır.

4.4.6. Standart Kimyasal Ekserji

Uygun bazı çevre malzemelerinin özellikleri referans alınarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserjiler standart çevre (ölü hal) sıcaklığına ($T_0 = 25^{\circ}C = 298.15K$) ve basıncına ($P_0 = 1atm$) bağlıdır.

Referans maddeler genellikle üç grupta toplanmıştır;

- Atmosferdeki gaz bileşenler,
- Litosferdeki katılar,
- Deniz, okyanuslardaki iyonik ve iyonik olmayan maddeler.

Çizelge 4.2’de bazı maddelerin standart kimyasal ekserji değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri (Teke, 2004)

Madde	Faz	Mol ağırlığı (kg/kmol)	Standart kimyasal Ekserji (kJ/kmol)
Ag	Katı	107.8	73730
Al_2O_3	Katı	101.9	204270
CO_2	Gaz	44	20140
H_2O	Gaz	18	11710
H_2O	Sıvı	18	3120
CH_4	Gaz	16	836510
C_8H_{18}	Sıvı	114	5440030

4.4.7. Gaz Karışımlarının Kimyasal Ekserjileri

Termal sistemlerin çoğu, gaz karışımları içermektedir. Özellikle yanma ve kimyasal proseslerin ekserji analizlerinde gaz karışımları ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı, gaz karışımlarının ekserjilerinin bilinmesi önem arz etmektedir. N adet gazdan oluşan bir gaz karışımının kimyasal ekserjisi;

$$B_0 = \sum_{i=1}^N x_i b_{0,i} + \tilde{R} T_0 \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanır.

4.4.7.1. Yakıtların Kimyasal Ekserjilerinin Hesaplanması

Yakıtların kimyasal ekserjileri, yakıtı oluşturan bileşenlerden hareketle hesaplanabilir. Bundan dolayı Szargut ve Strylska; yakıt ekserjisinin yakıtın ısı değeri oranını ifade eden Φ değerini geliştirmişlerdir. Bu oran;

$$\Phi = \frac{B_0}{H_u} \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Katı yakıtlar için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\Phi = 1.0437 + 0.1882 \frac{h}{c} + 0.0610 \frac{O}{c} + 0.0404 \frac{n}{c} \quad (4.11)$$

bu ifade ile de kükürt ve su buharının ekserjileri dikkate alınmamıştır. Her iki ürün dikkate alındığında katı yakıtlar için kimyasal ekserji aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır.

$$B_{0,katı} = \phi \left((H_u)_{katı} + w h_{fg} \right) + (b_{0,s} - (Hu)_s) s \quad (4.12)$$

Sıvı yakıtlar için kimyasal ekserji oranı Φ ise kükürtün etkisi de dikkate alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada kullanılan s entropi olmayıp, yakıt içerisindeki kükürt kütle oranıdır.

$$\Phi_{sıvı} = 1.0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{O}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \quad (4.13)$$

buradan,

$$B_{0,siv} = \Phi_{siv} (Hu)_{siv} \quad (4.14)$$

şeklinde hesaplanır.

Yukarıdaki formüllerden Φ hesaplandığında bazı yakıtların ekserjilerinin alt ısı değerlerine oranları yaklaşık olarak Çizelge 4.3'deki gibi bulunur.

Çizelge 4.3: Bazı yakıtların kimyasal ekserjilerinin alt ve üst ısı değere oranı (Teke,2004)

Yakıttaki kütle oranı %

Yakıt	C	H_2	$N_2 + S$	O_2	Φ / Ha	Φ / H_u
Linyit	70	5	2	23	1,17	1,04
Kok	95	1	2	2	1,06	1,04
Fuel-oil	85	14	1	-	1,07	0,99

4.4.8. Isıl Ekserji

Sistemlerin ısı ekserjisi aşağıdaki denklemde verildiği gibi hesaplanır.

$$B_{ısı} = B_{fiz} + B_{kim} \quad (4.15)$$

4.4.9. İş Ekserjisi

Ekserji maksimum iş potansiyeli olduğundan, bütün süreçlerde iş ekserjiye eşittir.

$$B_w = W \quad (4.16)$$

4.4.10. Isı Transferinin Ekserjisi

Isı transferinden dolayı meydana gelen ekserji,

$$B_Q = \int_A \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \cdot Q_i dA \quad (4.17)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Eğer bir sistemde üniform sıcaklık dağılımı varsa ısı transferinden dolayı oluşan ekserji;

$$B_Q = Q_A \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (4.18)$$

şeklinde hesaplanır.

4.5. Ekserji Kaybı

Bir sistemin ekserji kaybı veya tersinmezliği aşağıdaki denklemden hesaplanır. Bu denklemden de görüldüğü gibi ekserji kaybı net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına eşittir.

$$\delta B = T_0 \sum \Delta S = T_0 \Delta S_{net} \quad (4.19)$$

Yukarıdaki denkleme Ekserji Kaybı Yasası veya Gouy–Stodola Yasası denir. Ayrıca aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi ekserji kaybı tersinmezliklerden dolayı ortaya çıkan kayıp işe eşittir.

$$\delta B = \delta W_{kay} \quad (4.20)$$

4.5.1. Kısma Olayında Meydana Gelen Ekserji Kaybı

Çeşitli sistemlerin kısma olayından sonra ekserji kayıpları aşağıda ifade edilmiştir.

Sıvılar için : Sıvıların kısma olayı sonunda sistemde meydana gelen ekserji kaybı aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$\delta B = \frac{T_0}{T} v dP \quad (4.21)$$

İdeal Gaz için: İdeal gazların kısma olayı sonunda sistemin ekserjisinde meydana gelen azalma aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$\delta B = nR T_0 \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (4.22)$$

4.5.2. Sürtünmeden Dolayı Ekserji Kaybı

Sistemin sürtünmesinden dolayı meydana gelen ısıнын sebep olduğu ekserji kaybı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$\delta B = Q_F \frac{T_0}{T} \quad (4.23)$$

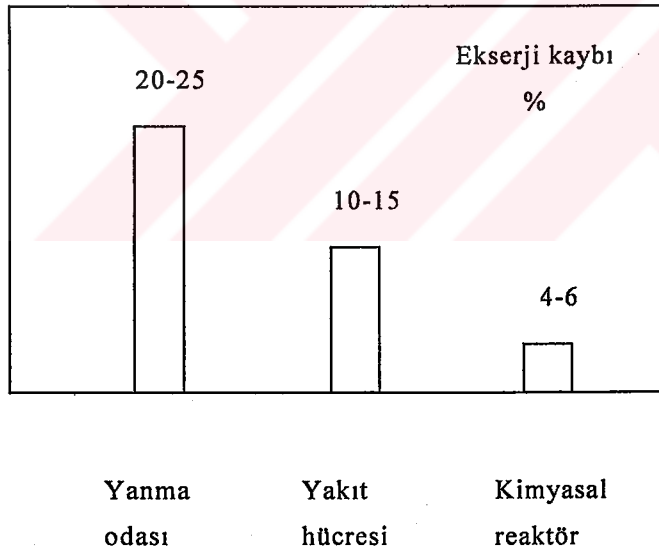
4.5.3. Sonlu Sıcaklık Farkındaki Isı Transferinde Ekserji Kaybı

Sonlu sıcaklık farkının olduğu, sıcaklığı T_1 olan 1 no'lu sistem ile T_2 olan 2 no'lu sistemlerin arasındaki ısı transferi sonucunda ortaya çıkan ekserji kaybı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\delta B = Q \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right) T_0 \quad (4.24)$$

4.5.4. Çeşitli Termal Prosesler İçin Ekserji Kayıplarının Karşılaştırılması

Aşağıdaki şekilde termal prosesler için elde edilen ekserji kaybı değerleri karşılaştırılmıştır. Modern bir gaz türbinin yanma odasında oluşan ekserji kaybı % 22'dir. Yakıt hücrelerindeki ekserji kayıpları % 10-15 arasında değişmektedir. En düşük ekserji kaybı kimyasal reaktörde elde edilmiştir (Şekil 4.3). Bu şekle bakıldığında modern bir gaz türbininde yanma odasının yerine yakıt hücresi kullanılması halinde ekserji kaybında yaklaşık % 10'luk bir azalmanın sağlanacağı söylenebilir. Elde edilen ekserji kaybı değerleri aynı zamanda hesaplamalarda kullanılan ve yukarıda özetlenen matematiksel ifadelerle ilgili olarak her bir prosesin ideal çalışma koşullarında işletilip işletilemeyeceği konusunda da bir ön fikir vermektedir.



Şekil 4.3: Çeşitli termal prosesler için ekserji kayıpları (Teke, 2004)

Sonuç olarak termal sistemlerin dizaynında ekserji kaybı hesabı ve ekserji analizi, literatürde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bir termal sistemin

gerçek performansı, ekserji kaybı ve sistemden elde edilecek maksimum kullanılabilir iş hesaplanarak bulunabilir. Bundan dolayı tüm mühendislik sistemleri ekserji analizi yöntemi kullanılarak analiz edilmesi gerekir.

4.6. Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması

Enerjinin kinetik ve potansiyel enerji gibi mekanik biçimleri tümüyle kullanılabilir enerjidir. Bir ısı enerjisi deposunun kullanılabilirliği, ısı enerjisi deposuyla çevre ortam arasında çalışan bir Carnot ısı makinesinin yaptığı işe eşittir.

Kapalı veya açık bir sistemde yapılan gerçek iş W , enerjinin korunumu denklemleriyle hesaplanabilir. Eğer sistemin hacmi değişiyorsa, yapılan işin bir bölümü çevreye karşı yapılır ve çevre işi $W_{\text{çevre}}$ adını alır. Bu iş, P_0 basıncındaki çevre havayı itmek için kullanılır ve başka bir amaca yönlendirilemez. Toplam gerçek işle çevre işi arasındaki fark *yararlı iş* W_y diye bilinir ve aşağıdaki bağıntıyla belirlenir:

$$W_y = W - W_{\text{ÇEVRE}} = W - P_0 (V_2 - V_1) \quad (4.25)$$

Çevre işi $W_{\text{çevre}}$, çevrimler, sürekli akışlı sistemler ve sabit sınırları olan sistemler için sıfırdır.

Verilen iki hal arasındaki değişim sırasında bir sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş, *tersinir iş* W_{tr} diye tanımlanır. Bu iş, ilk ve son haller arasındaki hal değişiminin tümünden tersinir olması durumunda elde edilir. Eğer son hal çevre hali (P_0, T_0) ise, tersinir iş kullanılabilirliğe eşit olur (Çengel ve Boles, 2000).

Tersinir iş W_{tr} ile yararlı iş W_y arasındaki fark hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklanır ve *tersinmezlik (I)* diye tanımlanır. Kapalı veya açık tüm sistemler için tersinmezlik aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir:

$$I = W_{tr} - W_y = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (4.26)$$

$$i = w_{tr} - w_y = T_0 s_{\text{üretim}} \quad (4.27)$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (4.28)$$

Burada, $S_{\text{üretim}}$ veya $\dot{S}_{\text{üretim}}$, hal değişimi sırasındaki toplam entropi üretimidir. Tümünden tersinir bir hal değişimi için, tersinir iş ve yararlı iş terimleri eşittir ve tersinmezlik sıfırdır

Birinci yasa verimi mühendislik sistemlerinin değerlendirilmesinde tek başına bir ölçü değildir. Bir sistemin iş üretiminin, aynı ilk (giriş) ve son (çıkış) haller arasındaki tersinir hal değişimi sırasında üretilenle karşılaştırılması bir parametre olarak tanımlanabilir. Bu parametre *ikinci yasa verimi* η_u adını alır ve aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir:

Isı makineleri ve diğer iş yapan makineler için:

$$\eta_u = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,tr}} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (4.29)$$

Soğutma makineleri, ısı pompaları ve diğer üzerinde iş yapılan makineler için :

$$\eta_u = \frac{COP}{COP_{tr}} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (4.30)$$

Birim kütle için kapalı bir sistemin (Φ) ve bir akışın (φ) kullanılabilirliği aşağıda tanımlanmıştır:

$$\Phi = (u - u_0) - T_0(s - s_0) + P_0(v - v_0) \quad (4.31)$$

$$\varphi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + g z \quad (4.32)$$

ve

Burada, 0 indisi çevre halini (P_0, T_0) belirtmek için kullanılmıştır.

Tersinir iş ifadeleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

$$W_{tr} = \eta_{th,tr} Q_H \quad \text{ısı makineleri} \quad (4.33)$$

$$-W_{tr} = \frac{Q_L}{COP_{SM,tr}} \quad \text{soğutma makineleri} \quad (4.34)$$

$$-W_{tr} = \frac{Q_H}{COP_{IP,tr}} \quad \text{ısı pompaları} \quad (4.35)$$

Kapalı sistemler :

$$W_{tr} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2) \quad (4.36)$$

$$= m(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (4.37)$$

Sürekli akışlı sistemler :

$$\dot{W}_r = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + g z_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\varphi \left(h_\varphi + \frac{V_\varphi^2}{2} + g z_\varphi - T_0 s_\varphi \right) \quad (4.38)$$

$$= \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi \quad (4.39)$$

Bir giriş ve çıkışlı sürekli akışlı açık sistem için bu denklem basitleşir:

$$\dot{W}_r = \dot{m} \left[(h_g - h_\varphi) - T_0 (s_g - s_\varphi) + \frac{V_g^2 - V_\varphi^2}{2} + g(z_g - z_\varphi) \right] \quad (4.40)$$

$$= \dot{m} (\psi_g - \psi_\varphi) \quad (4.41)$$

Düzgün akışlı dengeli açık sistemler :

$$\begin{aligned} \dot{W}_r = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + g z_g - T_0 s_g \right) - \sum \dot{m}_\varphi \left(h_\varphi + \frac{V_\varphi^2}{2} + g z_\varphi - T_0 s_\varphi \right) \\ + [(U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) + P_0 (V_1 - V_2)]_{KH} \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$= \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi + (\Phi_1 - \Phi_2)_{KH} \quad (4.43)$$

Yukarıdaki bağıntılarda 1 indisi sistemin ilk halini, 2 indisi sistemin son halini, g indisi sistemin giriş halini ve ç indisi sistemin çıkış halini göstermektedir. 0 indisi P_0 basınç ve T_0 sıcaklığındaki çevrenin halini göstermekte olup, ısı geçişi sistem ve çevre arasında olabilmektedir. Yukarıda tersinir iş için verilen bağıntılar çevre dışındaki cisim veya

ortamlarla ısı geçişini de göz önüne alacak şekilde genelleştirilebilir. T_k sıcaklığındaki ortamla Q_k veya $\dot{Q}_k$ miktarda ısı geçişi olduğu kabul edilirse, yukarıda tersinir iş için verilen denklemlerden;

$$\sum_{k=1}^K Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) \quad \text{veya} \quad \sum_{k=1}^K \dot{Q}_k \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right)$$

ıkarılarak düzeltme yapılmış olur. Burada , Q_k veya $\dot{Q}_k$ ’nın işareti sisteme göre değil ısı alışverişinde bulunulan cisim veya ortama göre seçilmelidir.

Tersinir iş en genel biçimde aşağıda gösterildiği gibi yazılır:

$$\begin{aligned} \dot{W}_r = & \sum_1^2 \int (h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g - T_0 s_g) \delta \dot{m}_g \\ & - \sum_1^2 \int (h_f + \frac{V_f^2}{2} + gz_f - T_0 s_f) \delta \dot{m}_f \\ & + [(U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2)]_{KH} - \sum_{k=1}^K Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \end{aligned} \quad (4.44)$$

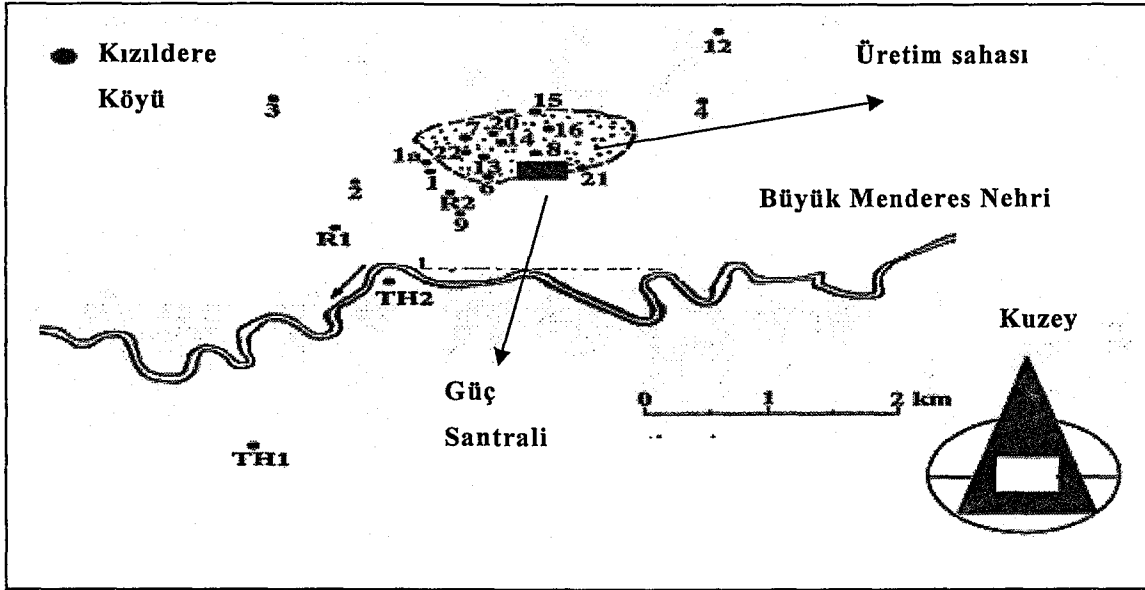
BEŞİNCİ BÖLÜM

KIZILDERE JEOTERMAL SANTRALİN EKSERJİ ANALİZİ

5.1. Kızıldere Jeotermal Sahası

Denizli ili Sarayköy ilçesi yakınındaki Kızıldere havzası Türkiye’de geliştirilmiş ilk jeotermal alan olma özelliğine sahiptir. Çevrede tabii olarak yeryüzüne ulaşmış doğal buhar ve sıcak su kaynakları bulunmaktadır. Bunların sıcaklıkları 30 °C ile 100 °C arasında değişmektedir.

Bu bölgede; jeolojik, jeofizik, jeokimya çalışmaları, kuyu açma ve test işlemleri MTA Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk üretim kuyusu KD-1, 1968 yılında tamamlanmış ve 540 m derinlikte 198 °C rezervuar sıcaklığı olan buhar bulunmuştur. 1968 ve 1973 yılları arasında açılan 16 adet kuyudaki rezervuar sıcaklıkları 170 °C ile 212 °C arasında tespit edilmiştir. 1975 yılında, KD-13 kuyusundan beslenen 0,5 MW gücünde bir prototip santral MTA Genel Müdürlüğü tarafından kurulmuştur. Üretilen enerji uzun bir süre çevre köylerin elektrik ihtiyacını karşılamıştır. Şekil 5.1’ de açılan kuyular ve jeotermal güç santrali görülmektedir.



Şekil 5.1: Kızıldere sahası ve jeotermal güç santrali (Gökçen ve diğ., 2003)

5.2. Kızıldere Jeotermal Santrali

Kızıldere jeotermal havzasında, MTA Genel Müdürlüğü'nün açmış olduğu kuyulardan 6 adedinin elektrik enerjisi üretimine uygun olduğu MTA raporlarındaki verilere göre tespitinden sonra, Türkiye Elektrik Kurumu'nun girişimleri sonucu yörede bir santral kurulmasına karar verilmiştir. 1980 yılı sonlarında santral yapım çalışmaları başlamış, 11 Şubat 1984 tarihinde santral işletmeye açılmıştır. 1998 yılında açılan 2261 m derinlikteki R1 kuyusunda 242 °C rezervuar sıcaklığı tespit edilmiş, bu kuyu Şubat 2001 tarihinde devreye alınmıştır. Halen sisteme dahil 9 kuyu bulunmaktadır. Bunlar R1, KD-6, KD-13, KD-14, KD-15, KD-16, KD-20, KD-21, KD-22 kuyularıdır. Bunlardan R1 242 °C taban sıcaklığı ile Türkiye'de açılan en sıcak kuyu olma özelliğine sahiptir. Diğer kuyular ise 190 °C – 210 °C arası taban sıcaklıklarına sahiptir. Çizelge 5.1' de sahanın bazı karakteristik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1: Kızıldere sahasının bazı karakteristik özellikleri

Tanımlama	Birim	Değer
Rezervuar sıcaklığı	°C	200-242
Kuyubaşı buhar miktarı	%	10-12
Toplam katı çözelti	ppm	2500-3200
CO ₂ kısmi basıncı	MPa	3,0-5,0
Yoğuşturulamayan gazlar	%	10-21
CO ₂ miktarı	%	96-99
H ₂ S miktarı	ppm	100-200
Üretim kuyusu miktarı	adet	9
Optimum kuyubaşı basıncı	MPa	1,6
Kuyubaşı işletme basıncı	MPa	1,28-1,58
Kuyubaşı sıcaklığı	°C	180-190
Toplam debi	kg/s	320,83
Yoğuşturulamayan gaz debisi	kg/s	6,1345
Kurulu kapasite	MW _e	20,4
Kullanım kapasitesi	MW _e	14,0
Net kapasite	MW _e	11,2

Denizli Kızıldere jeotermal sahasına ait üretim ve enjeksiyon kuyularına ait karakteristik bilgiler Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3' de gösterilmiştir. R1 kuyusu reenjeksiyon amaçlı açılmış olmasına rağmen yüksek sıcaklık elde edilmesi nedeni ile, üretim kuyusu olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Çizelge 5.2: Üretim kuyusu bilgileri (Çerçi, 2002)

Kuyu no	Açılma tarihi	Kuyubaşı sıcaklığı	Kuyubaşı basıncı	Derinlik	Toplam debi	Separatör basıncı	Separatör sıcaklığı	Buhar debisi	Su debisi
		(°C)	(MPa)	(m)	(kg/s)	(MPa)	(°C)	(kg/s)	(kg/s)
KD-6	1970	193	1,327	851	21,46	0,438	147	2,02	19,44
KD-13	1971	193	1,327	760	19,62	0,438	147	1,85	17,77
KD-14	1970	194	1,376	597	16,28	0,450	148	1,56	14,72
KD-15	1971	194	1,376	510	32,93	0,438	147	3,22	29,72
KD-16	1975	196	1,425	666,5	49,02	0,450	148	4,86	44,16
KD-20	1986	193	1,327	810	23,91	0,438	147	2,25	21,66
KD-21	1985	181	1,033	898	15,84	0,438	147	1,12	14,72
KD-22	1985	193	1,327	888	30,85	0,404	144	3,08	27,77
R-1	1997	240	3,337	2261	72,93	0,650	162	12,38	60,55

R2 kuyusu re-enjeksiyon amacı ile kullanılmaya başlanmış ve 55,55 kg/s jeotermal akışkan (% 17,3) re-enjekte edilmektedir. Geri kalan 265,28 kg/s akışkanın bir kısmı (yaklaşık % 10-12) Sarayköy'ün ısıtılması amacıyla kullanılmakta ve geri kalan akışkan ise kullanım sonrası Menderes nehrine atılmaktadır.

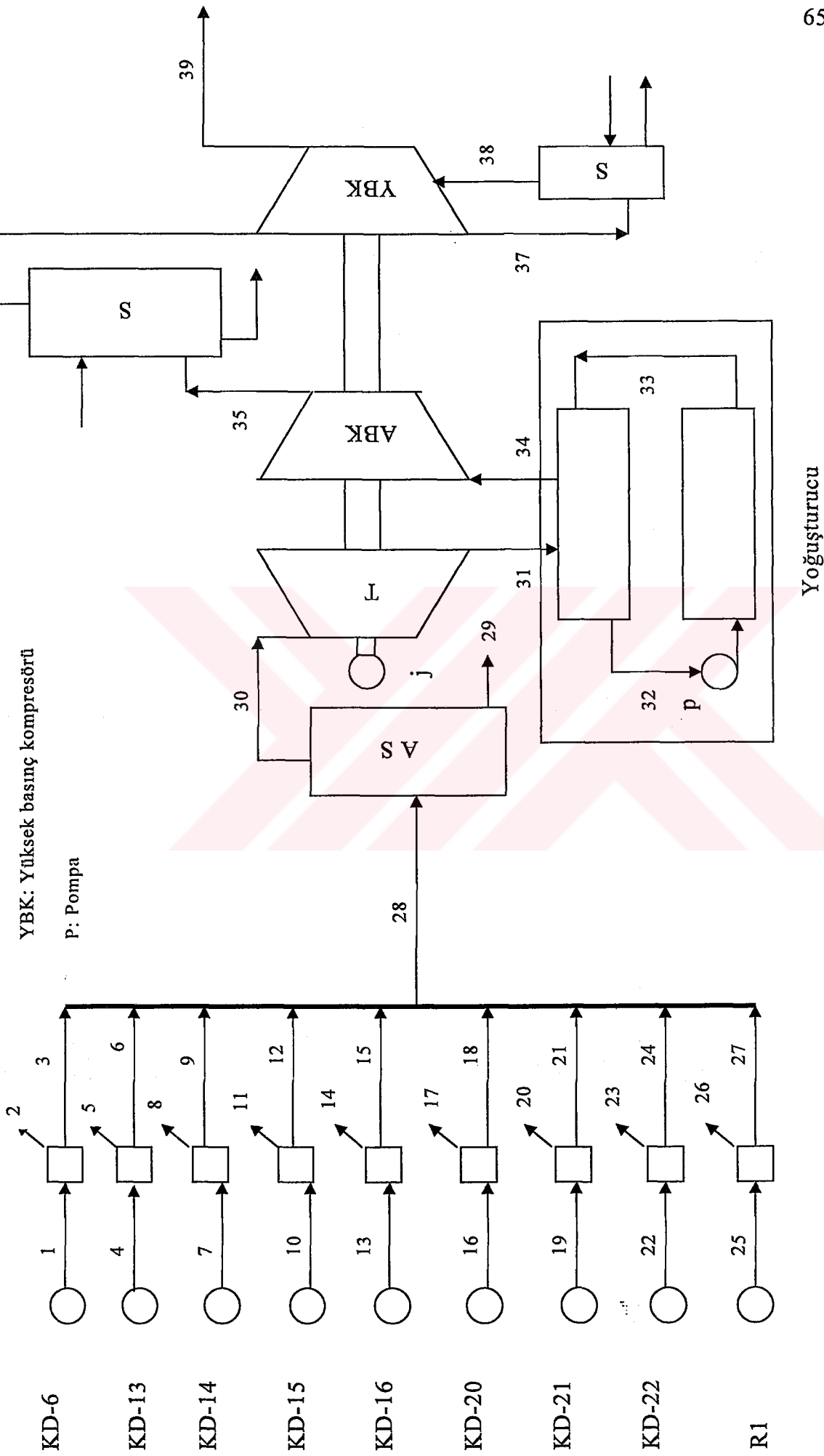
Çizelge 5.3: Enjeksiyon kuyusu bilgileri

Kuyu no	Kuyubaşı sıcaklığı (°C)	Kuyubaşı basıncı (MPa)	Derinlik (m)	Debi (kg/s)	Durumu
TH-2	168	N/A	2001	11.67	İptal
R-1	242	1.962	2261	103.05	Üretim kusuna dönüştürüldü
R-2	197	1.478	1371	55.55	Enjeksiyon

Kızıldere Jeotermal sahasında kurulan güç santrali esas olarak aşağıdaki ünitelerden oluşmaktadır:

- Kuyu, kuyubaşı seperatörleri ve buhar iletim hatları,
- Türbin, kompresör, kondenser,
- Jeneratör, ana trafo, şalt sahası,
- Sıcak su tahliye sistemi, soğutma kulesi, soğutma suyu sistemi,
- Kumanda odası ve kontrol ünitesi,
- Yardımcı üniteler (su tasfiye ünitesi, basınçlı hava sistemi, yangın söndürme sistemi).

Şekil 5.2'de Kızıldere Jeotermal santrali şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.2: Santralin şematik gösterimi

5.2.1 Santral Çalışma Prensibi

Jeotermal santralinde 9 kuyudan elde edilen buharla elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Kuyu çıkışlarında 1,3-1,5 MPa'da tutulan sıcak su ve buhar karışımı separatörlerde ayrıştırılarak buhar elde edilmektedir. Çizelge 5.4'de santrale ait karakteristik bilgiler verilmiştir. Sudan ayrıştırılan buhar ana nem separatörüne buhar nakil hattı aracılığıyla gönderilir. Buhar nakil hattının toplam uzunluğu 2500 m dir.

Ana nem separatöründe tamamen sudan arınan buhar iki koldan türbine girer. Buhar türbinin de iş yapan buhar, kondensere dökülür. Kondenserde yoğuşmayan gazlar, türbin şaftına akuple biri alçak, diğeri yüksek basınçlı 2 adet gaz kompresörüyle emilerek, kondenserde vakum temin edilir. Kondenserde yoğuşan su, kondense tahliye pompaları ile soğutma kulesine gönderilir. Soğutma kulesindeki suyu kondensere dönüşü ise, kondenserde oluşan vakum ile gerçekleştirilir. Türbin şaftına akuple olan jeneratörde elde edilen elektrik enerjisi ana trafo aracılığıyla şalt sahasına gönderilir. Şalt sahası Sarayköy, Nazilli, Alaşehir çıkışları ile ulusal elektrik sistemine bağlanmıştır. Menderes nehrinden temin edilen su, tasfiye ünitesinde arıtılarak soğutma kulesinin katma suyu olarak kullanılmaktadır. Kondenserde yoğuşmayan gazlar içerisinde büyük oranda ve % 99 saflıkta bulunan CO₂ gazı, saf CO₂ gazı ve kuru buz üreten Karbogaz A.Ş.'ye 1986 yılından beri satılmaktadır. Santral akış şeması Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Denizli Kızıldere jeotermal güç santraline ait karakteristik bilgiler

Tanımlama	Birim	Miktar
Üretim kuyusu miktarı	adet	9
Optimum kuyubaşı basıncı	MPa	1,6
Kuyubaşı işletme basıncı	MPa	1,28–1,58
Kuyubaşı sıcaklığı	°C	180–190
Toplam debi	kg/s	320,83
Separatör basıncı	MPa	0,438–0,650
Separatör sıcaklığı	°C	145–148
Buhar debisi	kg/s	25-38,88
Emniyet valfi buhar basıncı	MPa	0,35
Emniyet valfi buhar sıcaklığı	°C	147,2
Türbin basıncı	MPa	0,450
Türbin sıcaklığı	°C	148
Türbin çıkış geri basıncı	MPa	0,01
Türbin çıkışı buhar kuruluk	%	9,5
Yoğuşturulamayan gaz debisi	kg/s	6,1345
Kurulu kapasite	MWe	20,4
Kullanım kapasitesi	MWe	14,0
Net kapasite	MWe	11,2
Kompresör tüketim miktarı	MWe	2,38

Kızıldere jeotermal santralinde güç üretim türbini yanı sıra iki adet (alçak basınç ve yüksek basınç) kompresör bulunmaktadır. Aşağıdaki çizelgelerde türbin ve kompresörlere ait bilgiler verilmiştir. Çizelge 5.5 türbin ünitesine, Çizelge 5.6 gaz kompresörlerine ait gerekli bilgileri göstermektedir.

Çizelge 5.5: Kızıldere türbin-jeneratör ünitesine ait bilgiler

Tanımlama	Birim	Miktar
Türbin giriş sıcaklığı	°C	148
Türbin giriş basıncı	MPa	0,450
Türbin giriş entalpisi	kJ/kg	2744,30
Ortalama buhar debisi	kg/s	32,02
Maksimum buhar debisi	kg/s	42,42
Türbin çıkış sıcaklığı	°C	46-50
Türbin çıkış basıncı	MPa	0,01019
Türbin çıkış entalpisi	kJ/kg	2173,06
Yoğuşma basıncındaki suyun	kJ/kg	190
Türbin devir sayısı	d/dak	3000
Maksimum güç	kW	17,800
Kompresör gücü	kW	2380

Çizelge 5.6: Kızıldere jeotermal güç santralindeki kompresörlere ait bilgiler

Tanımlama	Birim	Miktar
Gaz bileşenleri	%	99,9 CO ₂ , 0,1 H ₂ S
Gaz debisi (500 kg/h hava sızıntısı dahil)	kg/s	6,44
Buhar debisi (AB emme)	kg/s	2,47
Toplam gaz debisi (emme)	kg/s	8.91
Kompresör emme kapasitesi	m ³ /h	293,500
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	°C	29
Soğutma suyu debisi	m ³ /h	900
AB kompresör devir sayısı	d/dak	3000
AB emme sıcaklığı	°C	36
AB emme basıncı	MPa	0,01
AB çıkış sıcaklığı	°C	100-106
AB çıkış basıncı	MPa	0,014
YB kompresör devir sayısı	d/dak	3900
YB emme sıcaklığı	°C	40-42
YB emme basıncı	MPa	0,039
YB çıkış sıcaklığı	°C	130-140
YB çıkış basıncı	MPa	0,101
AB rotor kritik hızı	d/dak	1986
Hesaplanan YB rotor hızı	d/dak	1730
Gövde sayısı	adet	2
Soğutucu sayısı	adet	2
Güç	kW	2380

5.4 Santralin Ekserji Analizi

Santrale ait bilgiler şematik olarak Şekil 5.2' de verilmişti. Şekil üzerinde gösterilen noktalar için santralin enerji ve ekserji değerleri sürekli akışlı açık sistemler için hesaplanmış olup elde edilen değerler Çizelge 5.7'de tablo halinde verilmiştir. Hesap yapılırken dış ortam sıcaklığı 16 °C ve basıncı ise 0,095 MPa olarak alınmıştır.

Enerji ve ekserji değerleri hesaplanırken jeotermal akışkan ve CO₂ için kullanılan fiziksel ekserji formülleri şu şekildedir.

Jeotermal akışkan için;

$$B_{fz} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (\text{Denklem 4.2})$$

CO₂ için;

$$B_{fz} = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (\text{Denklem 4.7})$$

Burada, CO₂ için R: 0,1889 alındı ve c_p değerleri sıcaklığa göre tablodan aşağıdaki gibi elde edildi (Çengel ve Boles, 2000);

$$36 \text{ °C} \quad (309 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,8514$$

$$104 \text{ °C} \quad (377 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,9182$$

$$42 \text{ °C} \quad (315 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,8578$$

$$154 \text{ °C} \quad (427 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,9975$$

$$41 \text{ °C} \quad (314 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,8567$$

$$140 \text{ °C} \quad (413 \text{ K}) \longrightarrow c_p = 0,9490$$

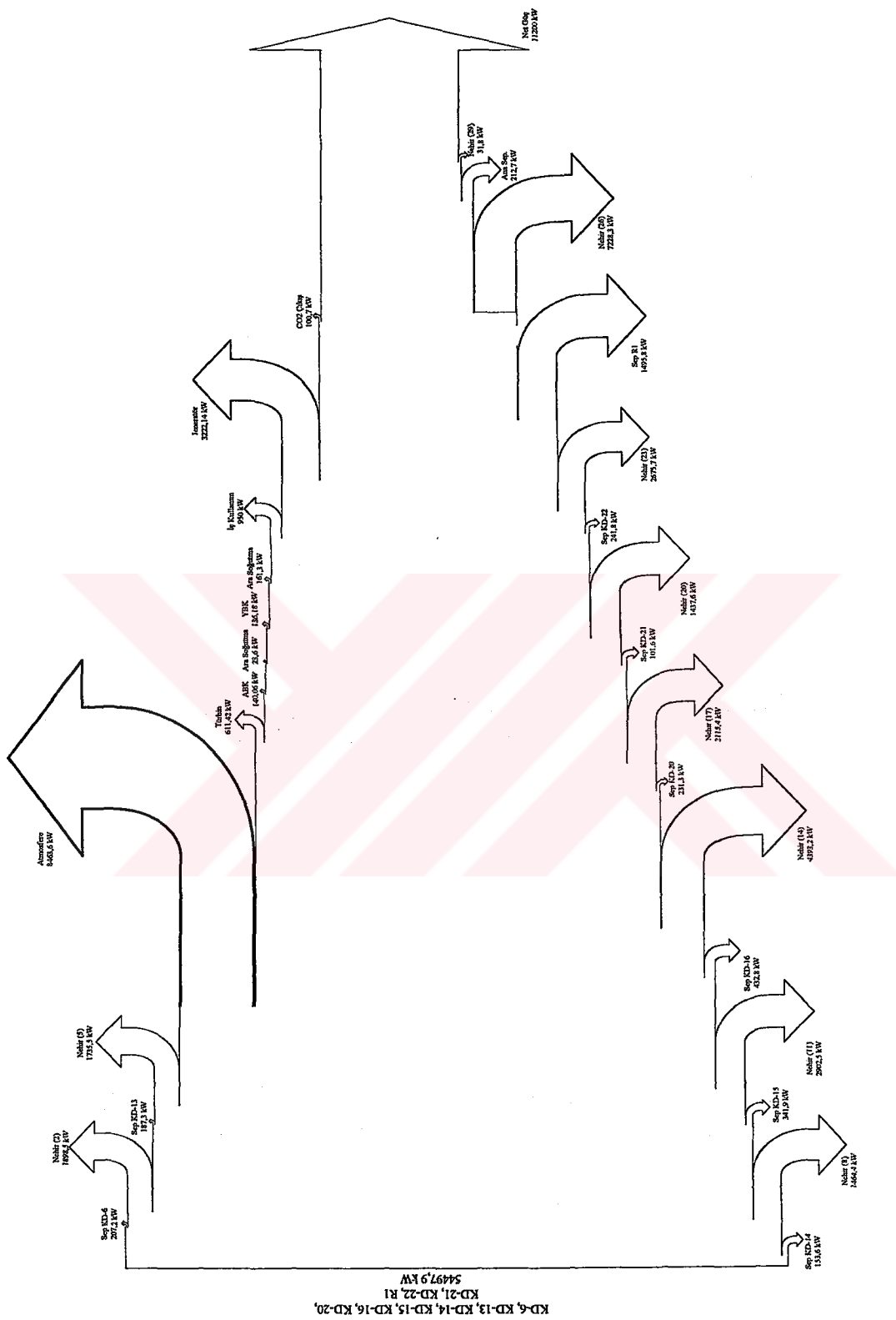
Çizelge 5.7: Santrale ait hesaplanan enerji ve ekserji değerleri

No	İçerik	Hal	Debi	Sıcaklık	Basınç	Entalpi	Entropi	Enerji Akımı	Ekserji Akımı
			$\dot{m}$	T	P	h	s	$\dot{E}$	$\dot{B}$
			kg/s	°C	MPa	kJ/kg	kJ/kgK	kW	kW
0				16	0,095	67,23	0,238	0	0
1	H ₂ O	S	21,46	193	1,327	821,03	2,260	16176,5	3636,2
2	H ₂ O	S	19,44	147	0,438	619,20	1,810	10760,3	1898,5
3	H ₂ O	B	2,02	147	0,438	2742,70	6,874	5416,2	1530,5
4	H ₂ O	S	19,62	193	1,327	821,03	2,260	14789,6	3324,5
5	H ₂ O	S	17,77	147	0,438	619,20	1,810	9828,5	1735,5
6	H ₂ O	B	1,85	147	0,438	2742,70	6,874	4961,1	1401,7
7	H ₂ O	S	16,28	194	1,376	829,98	2,280	12417,6	2810,1
8	H ₂ O	S	14,72	148	0,450	624,20	1,821	8220,6	1464,4
9	H ₂ O	B	1,56	148	0,450	2744,30	6,857	4197,0	1192,1
10	H ₂ O	S	32,93	194	1,376	829,98	2,280	25117,4	5684,1
11	H ₂ O	S	29,72	147	0,438	619,20	1,810	16464,5	2902,5
12	H ₂ O	B	3,22	147	0,438	2742,70	6,874	8653,9	2439,7
13	H ₂ O	S	49,02	196	1,425	834,47	2,290	37613,8	8539,9
14	H ₂ O	S	44,16	148	0,450	624,20	1,821	24595,8	4393,2
15	H ₂ O	B	4,86	148	0,450	2744,30	6,857	13010,6	3713,9
16	H ₂ O	S	23,91	193	1,327	821,03	2,260	18023,4	4051,4
17	H ₂ O	S	21,66	147	0,438	619,20	1,810	11985,7	2115,4
18	H ₂ O	B	2,25	147	0,438	2742,70	6,874	6037,7	1704,7
19	H ₂ O	S	15,84	181	1,033	767,65	2,140	11094,7	2387,8
20	H ₂ O	S	14,72	147	0,438	619,20	1,810	8110,0	1437,6
21	H ₂ O	B	1,12	147	0,438	2742,70	6,874	2984,7	848,6
22	H ₂ O	S	30,85	193	1,327	821,03	2,260	23254,7	5227,3
23	H ₂ O	S	27,77	144	0,404	606,33	1,770	15004,8	2675,7
24	H ₂ O	B	3,08	144	0,404	2739,02	6,888	8249,9	2309,8
25	H ₂ O	S	72,93	240	3,337	1037,32	2,701	70748,7	18836,6
26	H ₂ O	S	60,55	162	0,650	684,27	1,960	37387,5	7228,3
27	H ₂ O	B	12,38	162	0,650	2760,26	6,730	33361,2	10112,5
28	H ₂ O	B	32,34	148	0,450	2744,30	6,857	86576,4	24713,5
29	H ₂ O	S	0,32	148	0,450	624,20	1,821	378,2	31,8
30	H ₂ O	B	32,02	148	0,450	2744,30	6,857	86198,2	24469,0
31	H ₂ O	K	32,02	48	0,010	2386,7	6,610	69581,38	8463,6
32	H ₂ O	S	2406,5	39	0,007	163,57	0,552	231842,2	13462,0
33	H ₂ O	S	2378	29	0,004	121,79	0,411	129743,7	10850,8
0	CO ₂	G		16	0,095	205	4,810		
34	CO ₂	G	4,36	36	0,010	220	4,880	65,400	-545,6
35	CO ₂	G	4,36	104	0,014	281	5,060	331,360	-419,7
36	CO ₂	G	4,36	42	0,015	224	4,860	82,840	-443,3
37	CO ₂	G	4,36	154	0,050	329	5,160	540,640	-45,6
38	CO ₂	G	4,36	41	0,039	222	4,850	74,120	-206,9
39	CO ₂	G	4,36	140	0,101	310	5,140	457,800	100,7

S: Sıvı B: Buhar K: Karışım G: Gaz

Yukarıda hesaplanan değerler ışığında ekserji kayıplarını daha belirgin gösterebilmek için aşağıda santrale ait ekserji akış diyagramı çizilmiştir (Şekil 5.3). Bu diyagramın çizilmesindeki amaç santralde en çok kayıpların nerelerde olduğunu tesbit etmek ve santralin verimini artırmak için santral içinde yapılacak iyileştirmelerin başlama noktasının neresi olabileceği konusunda bir karara varmaktır.

Ekserji akış diyagramından da görüldüğü üzere 9 adet üretim kuyusu sisteme 54497,9 kW ekserji girişi sağlamaktadır. Bu kuyulardan R-1, kuyular içinde 18836,6 kW ile en fazla ekserji girişi sağlamaktadır. Bu kuyunun sisteme giren ekserji içindeki payı % 34,5'tir. Sistemin ekserji kayıpları başlıca separatörlerde, türbinde, jeneratörde, kompresörlerde, su buharının çevreye atılmasında ve CO₂ gazının üretilmesi sırasında gerçekleşmektedir. Separatörlerde ayırıştırma işlemi esnasında 3606 kW ekserji kaybı gerçekleşmekte ve bu değer, toplam kayıpların % 8,3'ünü oluşturmaktadır. Separatörlerde ayırıştırma işleminden sonra suyun nehre atılmasıyla 25882,9 kW ekserji kaybı olmakta ve kayıplar içinde oranı % 60'tır. Türbin çıkışında kayıp ekserji 8463,6 kW olup soğutma kulesinde atmosfere atılmaktadır. Bu kayıp toplam kayıplar içinde % 19,5'lik bir paya sahiptir. Jeneratörde mekanik işin elektrik işine dönüştürülmesi esnasında 3222,14 kW'lık bir ekserji kaybı oluşmakta ve bu da toplam kayıplar içinde % 7,5'lik bir paya sahiptir. İç kullanım, pompalar ve fanların oluşturduğu ekserji kaybı 950 kW olup, % 2,2'lik bir değere sahiptir. Türbin içinde 611,42 kW'lık bir ekserji kaybı oluşmakta ve bu da % 1,4'dir. Kompresörlerde 276,24 kW'lık bir kayıp oluşmakta ve toplam kayıplar içinde % 0,6'lık bir paya sahiptir. CO₂ gazının soğutulması esnasında ara soğutucularda 184,9 kW'lık bir ekserji kaybı oluşmakta ve % 0,4'lük bir paya sahiptir. CO₂ gazının sistemden çıkışı ile çok küçük bir ekserji kaybı oluşmakta ve böylece toplam ekserji kayıpları 43297,9 kW olmakta ve bu değer giren ekserjinin %79,5'lik kısmına denk gelmektedir. Kalan % 20,5 'lik değer net güç olup 11200 kW'tır.



Şekil 5.3: Kızıldere Jeotermal Santrali'nin Ekserji Akış Diyagramı

Santralin önemli noktaları için kütle, enerji ve ekserji denklemleri (Kotas, 1985; Çengel ve Boles, 2000) yazılarak; sistemin birinci (η_I) ve ikinci (η_{II}) verimleri hesaplandı.

Açık sistemler için,

1) *Kütle dengesi;*

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\varphi = \Delta \dot{m}_{sistem} \quad (5.1)$$

$\Delta \dot{m}_{sistem} = 0$ olduğundan,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (5.2)$$

2) *Enerji dengesi;*

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\varphi = \Delta \dot{E}_{sistem} \quad (5.3)$$

$\Delta \dot{E}_{sistem} = 0$ olduğundan,

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi \quad (5.4)$$

Formül açık olarak yazılırsa;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi \left(h_\varphi + \frac{V_\varphi^2}{2} + gz_\varphi \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (5.5)$$

Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\varphi - \sum \dot{m}_g \quad (5.6)$$

3) *Ekserji dengesi;*

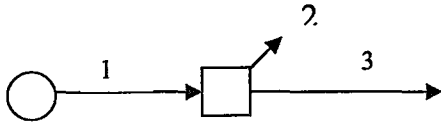
$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi - \dot{B}_{kay} = \Delta \dot{B}_{sistem} \quad (5.7)$$

$\Delta \dot{B}_{sistem} = 0$ olduğundan,

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay} \quad (5.8)$$

KD-6 Separatörü

D-6

1) *Kütle dengesi;*

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \longrightarrow 21,46 = 19,44 + 2,02 \quad (\text{kg/s})$$

2) *Enerji dengesi;*

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 + \dot{E}_3 \longrightarrow 16176,5 = 10760,3 + 5416,2 \quad (\text{kW})$$

3) *Ekserji dengesi;*

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay}$$

$$\dot{B}_1 - (\dot{B}_2 + \dot{B}_3) = \dot{B}_{kay} \longrightarrow 3636,2 - (1898,5 + 1530,5) = \dot{B}_{kay}$$

$$\dot{B}_{kay} = 207,2 \text{ kW}$$

$$\eta_I = \frac{\dot{E}_{al}}{\dot{E}_{ver}} = \frac{5416,2}{16176,5} = 0,335 \quad (\% 33,5)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_{al}}{\dot{B}_{ver}} = \frac{1530,5}{3636,2} = 0,42 \quad (\% 42)$$

Kuyubaşı Separatörleri

1) Kütile dengesi;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_4 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{16} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{22} + \dot{m}_{25} = (\dot{m}_2 + \dot{m}_5 + \dot{m}_8 + \dot{m}_{11} + \dot{m}_{14} + \dot{m}_{17} + \dot{m}_{20} + \dot{m}_{23} + \dot{m}_{26}) + (\dot{m}_3 + \dot{m}_6 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} + \dot{m}_{18} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{24} + \dot{m}_{27})$$

$$282,84 = 250,5 + 32,34 \quad (\text{kW})$$

2) Enerji dengesi;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_7 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{16} + \dot{E}_{19} + \dot{E}_{22} + \dot{E}_{25} = (\dot{E}_2 + \dot{E}_5 + \dot{E}_8 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{14} + \dot{E}_{17} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{23} + \dot{E}_{26}) + (\dot{E}_3 + \dot{E}_6 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_{24} + \dot{E}_{27})$$

$$229236,4 = 229236,4 \quad (\text{kW})$$

3) Ekserji dengesi;

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay}$$

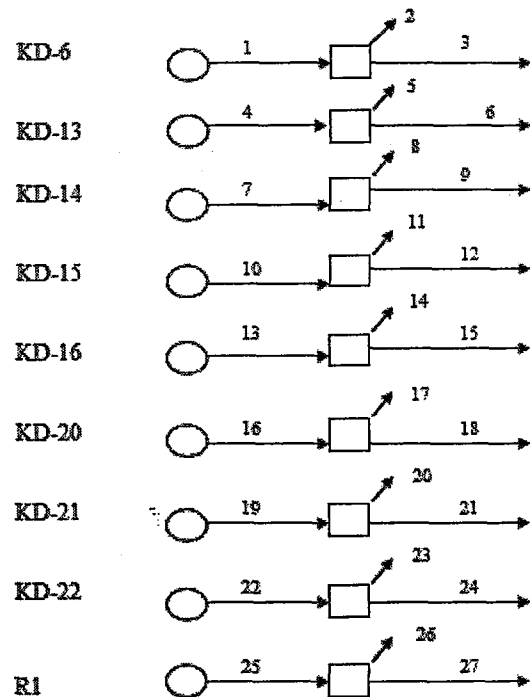
$$[\dot{B}_1 + \dot{B}_4 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{10} + \dot{B}_{13} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{19} + \dot{B}_{22} + \dot{B}_{25}] - [(\dot{B}_2 + \dot{B}_5 + \dot{B}_8 + \dot{B}_{11} + \dot{B}_{14} + \dot{B}_{17} + \dot{B}_{20} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{26}) + (\dot{B}_3 + \dot{B}_6 + \dot{B}_9 + \dot{B}_{12} + \dot{B}_{15} + \dot{B}_{18} + \dot{B}_{21} + \dot{B}_{24} + \dot{B}_{27})] = \dot{B}_{kay}$$

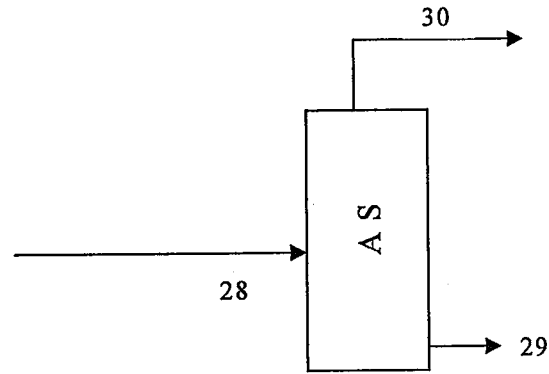
$$54497,9 - 51104,6 = \dot{B}_{kay} \quad (\text{kW})$$

$$\dot{B}_{kay} = 3393,3 \text{ kW}$$

$$\eta_I = \frac{\dot{E}_{al}}{\dot{E}_{ver}} = \frac{86872,3}{229236,4} = 0,379 \quad (\% 37,9)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_{al}}{\dot{B}_{ver}} = \frac{25851,1}{54497,9} = 0,474 \quad (\% 47,4)$$



Ana Separatör

1) *Kütle dengesi;*

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} + \dot{m}_{30} \longrightarrow 32,34 = 0,32 + 32,02 \quad (\text{kg/s})$$

2) *Enerji dengesi;*

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{E}_{28} = \dot{E}_{29} + \dot{E}_{30} \longrightarrow 86576,4 = 378,2 + 86198,2 \quad (\text{kW})$$

3) *Ekserji dengesi;*

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay}$$

$$\dot{B}_{28} - (\dot{B}_{29} + \dot{B}_{30}) = \dot{B}_{kay} \longrightarrow 24713,5 - (31,8 + 24469) = \dot{B}_{kay}$$

$$\dot{B}_{kay} = 212,7 \text{ kW}$$

$$\eta_I = \frac{\dot{E}_{al}}{\dot{E}_{ver}} = \frac{86198,2}{86576,4} = 0,995 \quad (\% 99,5)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_{al}}{\dot{B}_{ver}} = \frac{24469}{24713,5} = 0,99 \quad (\% 99)$$

Türbin

1) Kütile dengesi;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} \longrightarrow 32,02 = 32,02 \quad (\text{kg/s})$$

2) Enerji dengesi;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{E}_{30} = \dot{E}_{31} + \dot{W} \longrightarrow 86198,2 = 69581,38 + \dot{W} \quad (\text{kW})$$

$$\dot{W} = 16616,82 \text{ kW}$$

3) Ekserji dengesi;

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay} + \dot{W}$$

$$\dot{B}_{30} - \dot{B}_{31} = \dot{B}_{kay} + \dot{W} \longrightarrow 24469 - 8463,6 = \dot{B}_{kay} + 16616,82$$

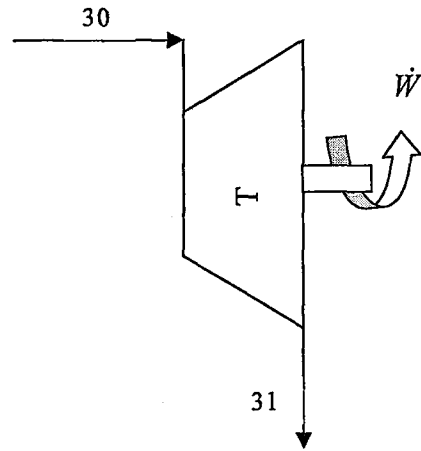
$$\dot{B}_{kay} = 611,42 \text{ kW}$$

$$s_{30} = s_{31s} = 6,857 \quad (\text{kJ/kgK}) \quad x = \frac{s_{31} - s_{31su}}{s_{31gaz} - s_{31su}} = \frac{6,857 - 0,6493}{7,5009} = 0,82$$

$$h_{31s} = 2173 \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\eta_I = \frac{h_{30} - h_{31a}}{h_{30} - h_{31s}} = \frac{2744,3 - 2386,7}{2744,3 - 2173} = 0,626 \quad (\% 62,6)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{m}(h_{30} - h_{31})}{\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi} = \frac{32,02(2744,3 - 2386,7)}{24469 - 8463,6} = 0,715 \quad (\% 71,5)$$



Alçak Basınç Kompresörü

1) Kütile dengesi;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{35} \longrightarrow 4,36 = 4,36 \quad (\text{kg/s})$$

2) Enerji dengesi;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{W} + \dot{E}_{34} = \dot{E}_{35} \longrightarrow \dot{W} + 65,4 = 331,36$$

$$\dot{W} = 265,96 \text{ kW}$$

3) Ekserji dengesi;

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay} - \dot{W}$$

$$\dot{B}_{34} - \dot{B}_{35} = \dot{B}_{kay} - \dot{W} \longrightarrow -545,6 - (-419,7) = \dot{B}_{kay} - 265,96$$

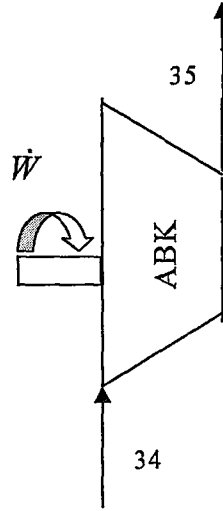
$$\dot{B}_{kay} = 140,06 \text{ kW}$$

$$\frac{P_{r35}}{P_{r34}} = \frac{P_{35}}{P_{34}} = 1,4 \quad P_{r35} = 0,1796 \cdot 1,4 = 0,2515 \quad T_{35s} = 334,2K$$

$$h_{35s} = 243,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_I = \frac{h_{35s} - h_{34}}{h_{35a} - h_{34}} = \frac{243,8 - 220}{281 - 220} = 0,39 \quad (\% 39)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_\varphi - \dot{B}_g}{\dot{m}(h_{35} - h_{34})} = \frac{-419,7 - (-545,6)}{4,36 \cdot (281 - 220)} = 0,473 \quad (\% 47,3)$$



Yüksek Basınç Kompresörü

1) Kütile dengesi;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

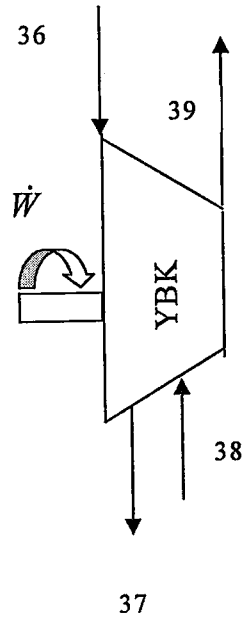
$$\dot{m}_{36} + \dot{m}_{38} = \dot{m}_{37} + \dot{m}_{39} \longrightarrow 8,72 = 8,72 \quad (\text{kg/s})$$

2) Enerji dengesi;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$\dot{W} + \dot{E}_{36} + \dot{E}_{38} = \dot{E}_{37} + \dot{E}_{39} \longrightarrow \dot{W} + 82,84 + 74,12 = 540,64 + 457,8$$

$$\dot{W} = 841,48 \text{ kW}$$



3) Ekserji dengesi;

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay} - \dot{W}$$

$$(\dot{B}_{36} + \dot{B}_{38}) - (\dot{B}_{37} + \dot{B}_{39}) = \dot{B}_{kay} - \dot{W}$$

$$-443,3 + (-206,9) - [-45,6 + (100,7)] = \dot{B}_{kay} - 841,48$$

$$\dot{B}_{kay} = 136,18 \text{ kW}$$

1. kademe için,

$$\frac{P_{r37}}{P_{r36}} = \frac{P_{37}}{P_{36}} = 3,3 \quad P_{r37} = 0,1921 \cdot 3,3 = 0,634 \quad T_{37s} = 405,9K$$

$$h_{37s} = 309,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_I = \frac{h_{37s} - h_{36}}{h_{37a} - h_{36}} = \frac{309,5 - 224}{329 - 224} = 0,814 \quad (\% 81,4)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_f - \dot{B}_g}{\dot{m}(h_{37} - h_{36})} = \frac{-45,6 - (-443,3)}{4,36 \cdot (329 - 224)} = 0,868 \quad (\% 86,8)$$

2. Kademe için,

$$\frac{P_{r39}}{P_{r38}} = \frac{P_{39}}{P_{38}} = 2,59 \quad P_{r39} = 0,1919 \cdot 2,59 = 0,497 \quad T_{39s} = 385,3K$$

$$h_{39s} = 290,12 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_I = \frac{h_{39s} - h_{38}}{h_{39a} - h_{38}} = \frac{290,12 - 222}{310 - 222} = 0,774 \quad (\% 77,4)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_f - \dot{B}_g}{\dot{m}(h_{39} - h_{38})} = \frac{100,7 - (-206,9)}{4,36 \cdot (310 - 222)} = 0,801 \quad (\% 80,1)$$

Güç Santrali

1) *Kütle dengesi;*

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi$$

$$282,84 = 282,84 \quad (\text{kg/s})$$

2) *Enerji dengesi;*

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi$$

$$229232,7 = 218032,7 + 11200 \quad (\text{kW})$$

3) *Ekserji dengesi;*

$$\dot{B}_g - \dot{B}_\varphi = \dot{B}_{kay}$$

$$54497,9 - 11200 = \dot{B}_{kay}$$

$$\dot{B}_{kay} = 43297,9 \text{ kW}$$

$$\eta_I = \frac{\dot{E}_\varphi}{\dot{E}_g} = \frac{11200}{229232,7} = 0,049 \quad (\% 4,9)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{B}_\varphi}{\dot{B}_g} = \frac{11200}{54497,9} = 0,205 \quad (\% 20,5)$$

Hesaplanan değerler dış ortam şartlarının 16 °C sıcaklığında ve 0,095 MPa basınç değerinde olmasıyla elde edildi. Atmosfer şartlarının değişmesiyle santralin ikinci veriminde nasıl bir değişim olduğunu görmek için hesaplar 0 °C ve 30 °C için yapıldı. Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da elde edilen değerler neticesinde santralin ikinci verimleri aşağıda karşılaştırılmıştır.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{B}_g} = \frac{11200}{54497,9} = 0,205 \longrightarrow \% 20,5 \quad (16 \text{ }^{\circ}\text{C için})$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{B}_g} = \frac{11200}{46515,8} = 0,24 \longrightarrow \% 24 \quad (30 \text{ }^{\circ}\text{C için})$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{B}_g} = \frac{11200}{64807} = 0,172 \longrightarrow \% 17,2 \quad (0 \text{ }^{\circ}\text{C için})$$

Elde edilen net güç sabit kalmak şartıyla dış ortam sıcaklığı arttığında ekserji girişinin azalması nedeniyle ikinci verim artmakta, dış ortam sıcaklığı azaldığında ise ekserji girişinin artmasından dolayı ikinci verim azalmaktadır.

Çizelge 5.8: Dış ortam sıcaklığı 30 °C için enerji ve ekserji değerleri

No	İçerik	Hal	Debi	Sıcaklık	Basınç	Entalpi	Entropi	Enerji Akımı	Ekserji Akımı
			$\dot{m}$	T	P	h	s	$\dot{E}$	$\dot{B}$
			kg/s	°C	MPa	kJ/kg	kJ/kg K	kW	kW
0				30	0,095	125,79	0,4369	0	0
1	H ₂ O	S	21,46	193	1,327	821,03	2,260	14919,9	3065,4
2	H ₂ O	S	19,44	147	0,438	619,20	1,810	9591,9	1503,9
3	H ₂ O	B	2,02	147	0,438	2742,70	6,874	5286,2	1346,3
4	H ₂ O	S	19,62	193	1,327	821,03	2,260	13640,6	2802,5
5	H ₂ O	S	17,77	147	0,438	619,20	1,810	8767,9	1374,7
6	H ₂ O	B	1,85	147	0,438	2742,70	6,874	4841,3	1233,0
7	H ₂ O	S	16,28	194	1,376	829,98	2,280	11464,2	2372,5
8	H ₂ O	S	14,72	148	0,450	624,20	1,821	7336,6	1163,3
9	H ₂ O	B	1,56	148	0,450	2744,30	6,857	4084,9	1050,2
10	H ₂ O	S	32,93	194	1,376	829,98	2,280	23189,0	4798,9
11	H ₂ O	S	29,72	147	0,438	619,20	1,810	14664,1	2299,2
12	H ₂ O	B	3,22	147	0,438	2742,70	6,874	8426,5	2146,0
13	H ₂ O	S	49,02	196	1,425	834,47	2,290	34739,5	7215,3
14	H ₂ O	S	44,16	148	0,450	624,20	1,821	22009,8	3489,9
15	H ₂ O	B	4,86	148	0,450	2744,30	6,857	12726,0	3271,8
16	H ₂ O	S	23,91	193	1,327	821,03	2,260	16623,2	3415,3
17	H ₂ O	S	21,66	147	0,438	619,20	1,810	10687,3	1675,6
18	H ₂ O	B	2,25	147	0,438	2742,70	6,874	5888,0	1499,6
19	H ₂ O	S	15,84	181	1,033	767,65	2,140	10167,1	1993,0
20	H ₂ O	S	14,72	147	0,438	619,20	1,810	7263,0	1138,7
21	H ₂ O	B	1,12	147	0,438	2742,70	6,874	2930,9	746,4
22	H ₂ O	S	30,85	193	1,327	821,03	2,260	21448,2	4406,6
23	H ₂ O	S	27,77	144	0,404	606,33	1,770	13344,6	2127,5
24	H ₂ O	B	3,08	144	0,404	2739,02	6,888	8048,7	2028,3
25	H ₂ O	S	72,93	240	3,337	1037,32	2,701	66477,9	16446,3
26	H ₂ O	S	60,55	162	0,650	684,27	1,960	33815,7	5871,9
27	H ₂ O	B	12,38	162	0,650	2760,26	6,730	32614,7	9008,4
28	H ₂ O	B	32,34	148	0,450	2744,30	6,857	84682,6	21771,9
29	H ₂ O	S	0,32	148	0,450	624,20	1,821	159,5	25,3
30	H ₂ O	B	32,02	148	0,450	2744,30	6,857	83844,7	21556,5
31	H ₂ O	K	32,02	48	0,010	2173,06	6,610	65553,6	5661,8
32	H ₂ O	S	2406,5	39	0,007	163,57	0,552	90917,6	6990,2
33	H ₂ O	S	2378	29	0,004	121,79	0,411	-9512,0	9149,8
0	CO ₂	G		30	0,095	214	4,882		
34	CO ₂	G	4,36	36	0,010	220	4,880	26,160	-574,4
35	CO ₂	G	4,36	104	0,014	281	5,060	292,120	-455,7
36	CO ₂	G	4,36	42	0,015	224	4,860	43,600	-468,2
37	CO ₂	G	4,36	154	0,050	329	5,160	501,400	-75,5
38	CO ₂	G	4,36	41	0,039	222	4,850	34,880	-220,2
39	CO ₂	G	4,36	140	0,101	310	5,140	418,560	82,1

S: Sıvı B: Buhar K: Karışım G: Gaz

Çizelge 5.9: Dış ortam sıcaklığı 0 °C için enerji ve ekserji değerleri

No	İçerik	Hal	Debi	Sıcaklık	Basınç	Entalpi	Entropi	Enerji Akımı	Ekserji Akımı
			$\dot{m}$	T	P	h	s	$\dot{E}$	$\dot{B}$
			kg/s	°C	MPa	kJ/kg	kJ/kg K	kW	kW
0				0	0,095	0,01	0	0	0
1	H ₂ O	S	21,46	193	1,327	821,03	2,260	17619,1	4378,7
2	H ₂ O	S	19,44	147	0,438	619,20	1,810	12037,1	2431,2
3	H ₂ O	B	2,02	147	0,438	2742,70	6,874	5540,2	1749,5
4	H ₂ O	S	19,62	193	1,327	821,03	2,260	16108,4	4003,3
5	H ₂ O	S	17,77	147	0,438	619,20	1,810	11003,0	2222,3
6	H ₂ O	B	1,85	147	0,438	2742,70	6,874	5074,0	1602,3
7	H ₂ O	S	16,28	194	1,376	829,98	2,280	13511,9	3378,6
8	H ₂ O	S	14,72	148	0,450	624,20	1,821	9188,1	1870,3
9	H ₂ O	B	1,56	148	0,450	2744,30	6,857	4281,1	1360,8
10	H ₂ O	S	32,93	194	1,376	829,98	2,280	27330,9	6834,0
11	H ₂ O	S	29,72	147	0,438	619,20	1,810	18402,3	3716,8
12	H ₂ O	B	3,22	147	0,438	2742,70	6,874	8831,5	2788,8
13	H ₂ O	S	49,02	196	1,425	834,47	2,290	40905,2	10259,4
14	H ₂ O	S	44,16	148	0,450	624,20	1,821	27564,2	5610,8
15	H ₂ O	B	4,86	148	0,450	2744,30	6,857	13337,2	4239,5
16	H ₂ O	S	23,91	193	1,327	821,03	2,260	19630,6	4878,6
17	H ₂ O	S	21,66	147	0,438	619,20	1,810	13411,7	2708,8
18	H ₂ O	B	2,25	147	0,438	2742,70	6,874	6171,1	1948,7
19	H ₂ O	S	15,84	181	1,033	767,65	2,140	12159,4	2905,4
20	H ₂ O	S	14,72	147	0,438	619,20	1,810	9114,5	1840,9
21	H ₂ O	B	1,12	147	0,438	2742,70	6,874	3071,8	970,0
22	H ₂ O	S	30,85	193	1,327	821,03	2,260	25328,5	6294,6
23	H ₂ O	S	27,77	144	0,404	606,33	1,770	16837,5	3418,8
24	H ₂ O	B	3,08	144	0,404	2739,02	6,888	8436,2	2644,4
25	H ₂ O	S	72,93	240	3,337	1037,32	2,701	75651,0	21874,4
26	H ₂ O	S	60,55	162	0,650	684,27	1,960	41431,7	9032,6
27	H ₂ O	B	12,38	162	0,650	2760,26	6,730	34171,9	11426,2
28	H ₂ O	B	32,34	148	0,450	2744,30	6,857	88750,3	28211,1
29	H ₂ O	S	0,32	148	0,450	624,20	1,821	199,7	40,7
30	H ₂ O	B	32,02	148	0,450	2744,30	6,857	87872,2	27932,0
31	H ₂ O	K	32,02	48	0,010	2173,06	6,610	69581,1	11800,0
32	H ₂ O	S	2406,5	39	0,007	163,57	0,552	393607,1	30957,2
33	H ₂ O	S	2378	29	0,004	121,79	0,411	289592,8	22774,1
0	CO ₂	G		0	0,095	190	4,783		
34	CO ₂	G	4,36	36	0,010	220	4,880	130,800	-509,6
35	CO ₂	G	4,36	104	0,014	281	5,060	396,760	-375,1
36	CO ₂	G	4,36	42	0,015	224	4,860	148,240	-411,7
37	CO ₂	G	4,36	154	0,050	329	5,160	606,040	-7,9
38	CO ₂	G	4,36	41	0,039	222	4,850	139,520	-188,6
39	CO ₂	G	4,36	140	0,101	310	5,140	523,200	125,4

S: Sıvı B: Buhar K: Karışım G: Gaz

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir çok araştırmacı, sistemlerin termodinamik verimliliğinin ve kayıplarının belirlenmesinde ekserji analizinin en iyi yöntem olduğuna inanmaktadırlar. Ekserji analizi, jeotermal güç santrali gibi karmaşık sistemlerin optimum dizaynı için iyi bir araçtır. Yapılan bu çalışmada sistemin hem genel olarak ve hem de bileşenleri için ayrı ayrı ekserji analizi uygulanarak, ekserji kayıplarının nerelerde olduğu belirlendi. Sistemin birinci ve ikinci yasa verimliliği hem bir bütün olarak, hem de bileşenleri için ayrı ayrı hesaplandı. Santralin genel olarak birinci yasa veriminin % 4,9 ve ikinci veriminin % 20,5 olduğu görüldü.

Hesaplamalardan da anlaşıldığı üzere, en büyük ekserji kaybı suyun nehre atılması esnasında meydana gelmektedir. Bu miktar toplam kayıpların içinde % 60 gibi büyük bir orana sahiptir. Bununla birlikte çevrim boyunca büyük miktarlarda ekserji kaybı mevcut olduğu görülmektedir. Türbin çıkışında kayıp ekserji % 19,5'lik bir değere sahiptir. Jeneratörde mekanik işin elektrik işine dönüştürülmesi esnasında % 7,5'lik bir ekserji kaybı oluşmaktadır. Toplam giren ekserji akımı 54497,9 kW olup, bu değer % 79,5'lik kısmı sistem içinde kaybolmaktadır. Geriye kalan % 20,5'lik kısım net güç olarak elde edilmektedir.

Ekserji veriminin çevre ile değişimini göstermek için santralin çalışma şartları değiştirildiğinde, farklı sıcaklıklarda ikinci veriminin değiştiği görülmektedir. Düşük sıcaklıkta verimin yüksek olması beklenmektedir. Fakat yapılan hesaplamalarda elde edilen net gücün sabit tutulması sebebiyle sadece ekserji giriş değerinin artmasıyla sistem verimi düşük olmaktadır. 16 °C dış ortam sıcaklığı için santralin ikinci verimi % 20,5 iken, bu değer çevre sıcaklığı 30 °C olduğunda % 24, 0 °C olduğunda % 17, 2 olmaktadır.

Aynı zamanda Kızıldere jeotermal sahasının elektrik üretim kapasitesini arttırabilmek için buradaki mevcut atık sudan maksimum derecede faydalanmalıdır. Tek buharlaştırma esasına göre çalışan sisteme ilave olarak, çift buharlaştırmalı veya iki akışkanlı bir çevrim uygulandığında daha verimli olabileceği düşünülmektedir. Bu konu üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir.

Kızıldere çevresinde yer alan diğer sıcak su esaslı jeotermal sistemlerde mevcut, büyük miktarlara varan sıcak sulardan elektrik üretimi ile birlikte elektrik dışı uygulamalardan da yararlanılması çok büyük ekonomik sonuçlar sağlayacaktır. Separatörlerde ayrıştırılan suyun sadece % 10'luk kısmı ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır. Zengin enerji kaynaklarına sahip ülkemizde dışa bağımlılıktan kurtulmak veya en aza indirmek için mevcut imkanlardan maksimum derecede faydalanmamız gerekmektedir.

Kondenserde yoğunlaştırulamayan gazlar içerisinde büyük oranda ve % 99 saflıkta bulunan CO₂ gazı bulunmaktadır. Bu gaz 1986 yılından bu yana aynı sahada kurulu olan, karbondioksit ve kuru buz üreten Karbogaz A.Ş.'ye satılmaktadır. Tesiste elde edilen ürün ihtiyacı fazlasıyla karşılamaktadır.

Yapılan bu çalışma sonucunda Kızıldere Jeotermal Santralin'de sistem verimliliğinin belirlenmesinde ve proses içinde kayıpların tesbitinde ekserji analizi uygulamasının önemi ortaya konmuştur. Gün geçtikçe daha çok gündeme gelen ekserji analizi uygulamaları, herhangi bir sistem verimliliğinin belirlenmesinde sadece enerji analizi yapmanın yetersiz olduğunu göstermektedir. Sistemde yapılabilecek iyileştirmelere yol göstermek için, ekserji analizi vazgeçilmez bir unsurdur.

KAYNAKLAR

- Alpman, Y., Jeotermal Enerji Teknolojisinde Yeni Gelişmeler, Diploma Çalışması, PAÜ, Denizli, 2004.
- Altan, B.D., Öztürk, H.K., Yakar, G., Atılgan, M., Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Uygulamaları ve Politikaları; I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 22-24 Mayıs, 2003.
- Arslan, S., Darıcı, M., Karahan, Ç., Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli, Jeotermal Enerji Doğrudan Isıtma Sistemleri; Temelleri ve Tasarımı Seminer Kitabı, İzmir, Ekim 2001.
- Batocletti, L., Geothermal Resources in Turkey, Bob Lawrence & Associates Inc.
- Bejan, A., Entropy Generation Through Heat And Fluid Flow, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Bodvarson, G., Eggers, D.E., The Exergy of Thermal Water, Geothermics, Vol. 1, 93-95, 1972.
- Bruges, E.A., Available Energy And Second Law Analysis, Butterworth, London, 1959.
- Cerci, Y., Performance Evaluation of a Single-flash Geothermal Power Plant in Denizli, Turkey, Y. Cerci / Energy 28, 27-35, 2003.
- Çengel, Y.A. ve Boles, Michael A., Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, ISBN 975-7860-78-6, İstanbul, 2000.
- Çengel, Y.A., Dünyada ve Türkiye'de Jeotermal, Rüzgar ve Diğer Yenilenebilir Enerjilerin Kullanımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 12-13 Ekim, 2001.
- Çengel, Y.A., Wood, B., Dincer, I., Is Bigger Thermodynamically Better?, Exergy, an International Journal, Vol. 2, 62-68, 2002.
- Çomaklı, K., Karslı, S., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Termal Sistemlerin Ekserjetik Analizi, Termodinamik, Sayı. 137, Ocak 2004.
- Dağdaş, A., Öztürk, R., Bekdemir, Ş., Thermodynamic Evaluation of Denizli Kizildere Geothermal Power Plant and Its Performance Improvement, Energy Conversion & Management, In Press, 2004.

- Demirbaş, A., Energy Balance, Energy Sources, Energy Policy, Future Developments and Energy Investments in Turkey, *Energy Conversion & Management* 42,1239-1258, 2001.
- Dincer, I., Al-Muslim, H., Thermodynamic Analysis of Reheat Cycle Steam Power Plants, *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, 727-739, 2001.
- Dincer, I., Rosen, M.A., Exergy as a Driver for Achieving Sustainability, *International Journal of Green Energy*, Vol. 1, No. 1, 1-19, 2004.
- Di Pipo, R., Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics, *Ghc Bulletin*, June 1999.
- Di Pipo, R., Second Law Assessment of Binary Plants Generating Power From Low-temperature Geothermal Fluids, *Geothermics*, In Pres, 2004.
- Doldersum, A., Exergy Analysis Proves Viability of Process Modifications, *Energy Conversion & Management* 39, No.16-18, 1781-1789, 1998.
- Dönmez, E., Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemlerinin Tasarım Kriterleri, Diploma Çalışması, PAÜ, Denizli, 2003.
- DPT(Devlet Planlama Teşkilatı), Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara, 2001.
- Ediger, V.Ş., Kentel, E., Renewable Energy Potential as An Alternative to Fosil Fuels in Turkey, *Energy Conversion & Management* 40, 743-755, 1999.
- Erduranlı, P., Enerji Santraline Ekserji Analizinin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 1997.
- ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı), İnternet Sitesi, www.enerji.gov.tr
- Evrendilek, F., Ertekin, C., Assessing The Potential of Renewable Energy Sources In Turkey, *Renewable Energy* 28, 2303-2315, 2003.
- Gökçen, G., An Upstream Reboiler Design For Removal of Noncondensable Gases From Geothermal Steam For Kizildere Geothermal Power Plant, Turkey, *Geothermics* 28, 739-757, 1999.
- Gökçen, G., Öztürk, H.K., Hepbaşlı, A., Overview of Kizildere Geothermal Power Plant In Turkey, *Energy Conversion and Management* 45(1), 83-98, 2004.
- Hadleya, S.W., Shortb, W., Electricity Sector Analysis In The Clean Energy Futures Study, *Energy Policy* 29,1285-1298, 2001.

- Hepbasli, A., Akdemir, O., Energy And Exergy Analysis of A Ground Source (geothermal) Heat Pump System, Energy Conversion and Management, Vol. 45, 737-753, 2004.
- Hua, B., Chen, Q.L., Wang, P., A New Exergoeconomic Approach For Analysis and Optimization of Energy Systems, Energy Vol.22, No.11, 1071-1078, 1997.
- Huttrer, G.W, The Status of World Geothermal Power Generation 1995±2000, Geothermics 30, 1-27, 2001.
- Haywood, R.W., Analysis of Engineering Cycles, Pergamon, England, 1991.
- İleri, A., Gürer, T., Energy and Exergy Utilization in Turkey During 1995, Energy Vol.23, 1099-1106, 1998.
- Kalpıklı, Y. ve Berker, Ü., Türkiye’de Jeotermal Enerji ve Kullanılabilirliği, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 16-18 Ekim, 2002.
- Kanoğlu, M., Bir İkili Jeotermal Güç Santralinin Ekserji Analizi, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 15-17 Kasım, 2000.
- Kanoğlu, M., Jeotermal Elektrik Üretiminde Kullanılan Termodinamik Çevrimler, 2000.
- Karatepe, Y. ve Güney, İ., Türkiye’nin Jeotermal Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 12-13 Ekim, 2001.
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A., Renewable Energy And Sustainable Development in Turkey, Renewable Energy 25, 431-453, 2002.
- Kestin, J., DiPippo, R., Khalifa, H.E., Ryley, D.J., Source Book On The Production of Electricity From Geothermal Energy, U.S Government Printing Office, Washington DC, 1980
- Koroneos, C., Spachos, T., Moussiopoulos, N., Exergy Analysis of Renewable Energy Sources, Renewable Energy 28, 295–310, 2003.
- Koroneos, C., Bobolias, C., Spachos, T., Evaluation of Utilisation Opportunities of Geothermal Energy In The Kavala Region, Greece, Using Exergy Analysis, International Journal of Exergy 1, 111–127, 2004.
- Kotas, T.J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Tiptree, Essex: Anchor Brendon Ltd., 1985.

- Lee, K.C., Classification of Geothermal Resources by Exergy, *Geothermics* 30, 431-442, 2001.
- Linenau, P.J., Lunis, B.C., Geothermal Durect Use Engineering and Desing Guidebook, Geo-Heat Center Oregon Institue of Technology Klamath Falls, Oregon 97601, Published Inc., 1991.
- Mertoğlu O., Mertoğlu M., Başarır N., Jeotermal Merkezi Isıtma Sistemlerinin Çevreye Müsbet Katkısı, Tenolojisi ve Ekonomik Değerlendirmesi, Jeotermal Uygulamalar Sempozyumu, Denizli, 1994.
- Mozes, E., Cornelissen, R.L., Hırs, G.G., Boom, R.M., Exergy Analysis Of The Conventional Textile Washing Process, *Energy Conversion & Management* 39, No 16-18, 1835-1843, 1998.
- Özkaya, M., Kızıldere (Denizli) Jeotermal Santralının Değerlendirmesi ve Problemlerin Çözümü, Jeotermal Uygulamalar Sempozyumu, Denizli, 27-30 Eylül, 1994.
- Öztürk, H.K., Yılcı, A., Türkiye'nin Ekonomik Gelişmesinin Enerji Politikası İle İlişkisi, I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 22-24 Mayıs, 2003.
- Pak, P.S., Suzuki, Y., Exergetic Evaluation of Gas Turbine Cogeneration Systems For District Heating and Cooling, *International Journal of Energy Research*, Vol. 21, 209-220, 1997.
- Quijano, J., Exergy Analysis For The Ahuachapan And Berlin Geothermal Fields, El Salvador, World Geothermal Congress Kyushu - Tokyo, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Rogers, G., Mayhew, Y., Engineering Thermodynamics Work & Heat Transfer, 4th Edition, Longman Scientific & Technical, England, 1993
- Rosen, M.A., Dincer, I., On Exergy And Environmental Impact, *International Journal of Energy Research*, Vol. 21, 643-654, 1997.
- Rosen, M.A., Dincer, I., Exergy As The Confluence of Energy, Environment And Sustainable Development, *Exergy International Journal*, Vol. 1, 3-13, 2001.
- Rosen, M.A., Dincer, I., Effect of Varying Dead-state Properties On Energy And Exergy Analyses of Thermal Systems, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, 121-133, 2004.

Rosen, M.A., Le, M.N., Dincer, I., Efficiency Analysis of A Cogeneration And District Energy System, Applied Thermal Engineering, In Press, 2004.

Struchtrup, H., Rosen, M.A., How Much Work Is Lost In An Irreversible Turbine?, Exergy, an International Journal, Vol. 2, 152-158, 2002.

Teke, S., Gaz Türbinlerinde Ekserji Analizi, Yılıçi Projesi, PAÜ, Denizli, 2004.

Twidell, J. & Weir, T., Renewable Energy Resources.

Ünal, Y., Serpen, Ü., Jeotermal Kaynakların Ekserji İle Sınıflandırılması ve Türkiye'deki Sahaların Konumu, Termodinamik, Sayı 137, 2003.

Yılancı, A., Jeotermal Enerji ve Uygulama Alanları, Seminer, PAÜ, Denizli, 2003.

Wall, G., Gong, M., On Exergy And Sustainable Development – Part 1: Conditions And Concepts, Exergy, an International Journal, Vol. 1(3), 128-145, 2001.

Yılmaz, M.A., Ülkemizde Jeotermal Enerjinin Kullanımı: Kızıldere Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 2001.

Yolcu, D., Jeotermal Enerji Kullanımının Çevresel Sorunları, Diploma Çalışması, PAÜ, Denizli, 2003.

Yüksel, Ö., Jeotermal Enerji İle Konut Isıtma Sistemleri, Diploma Çalışması, PAÜ, Denizli, 2004.

Zeybekoğlu, E., Öztürk, H.K., Atılğan, M., Jeotermal Enerjinin Elektrik Enerjisi Üretiminde ve Isıtmada Kullanılmasının Kriterleri, Bilim Günleri, Denizli, 5-6-7 Mayıs, 1999.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, soyadı : Öner ATALAY

Ana adı : Nedret

Baba adı : Tahsin

Doğum yeri ve : Adana 1980
tarihi

Lisans eğitimi ve : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mezuniyet tarihi Makine Mühendisliği Bölümü - 15.09.2001

Çalıştığı : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine
yer Mühendisliği Bölümü

Bildiği yabancı dil : İngilizce