

JEOTERMAL BİR KAYNAK İÇİN GÜÇ ÇEVİRİMLERİNİN TERMODİNAMİK VE EKONOMİK ANALİZLERİ

Ahmet COŞKUN
Ali BOLATTÜRK
Mehmet KANOĞLU

ÖZET

Enerjinin güvenli ve sürdürülebilir temini ve çevreye verilen zararı en aza indirme amacı, fosil kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmaktadır. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de de önemli ölçüde kullanılabilir duruma gelmiştir. Türkiye, jeotermal kaynaklar bakımından zengin olmasına rağmen, bu kaynakların çoğu güç üretiminde kullanılmamaktadır.

Kütahya-Simav bölgesindeki jeotermal kaynağın özelliklerine göre en yüksek net güç, ısı ve ekserjetik verim açısından en uygun santraller seçilmiş olup, bu santraller çeşitli parametrelere göre optimize edilmiştir. Bu santraller; çift akışkanlı, rejeneratörlü çift akışkanlı ve Kalina çevrimli santrallerdir. Seçilen santraller net güç, enerji ve ekserji verimlerini maksimum yapan türbin giriş basıncına göre optimize edilmiştir. İncelenen santrallerde türbin giriş basıncının net güce, ısı ve ekserjetik verime olan etkileri incelenmiştir. Termodinamik analizlere göre seçilen ve optimize edilen santrallerin, enerji ve ekserji analizlerinin yanı sıra faiz, enflasyon ve eskalasyon oranlarının maliyetlere ilave edildiği ekonomik analizleri de (birim enerji başına düşen maliyetler, geri ödeme süreleri vs.) yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Kütahya-Simav bölgesinde en iyi güç çıktısının sırasıyla; kalina çevrimli, çift akışkanlı ve rejeneratörlü çift akışkanlı santrallerde olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji, verim, ekserji, yenilenebilir enerji, optimizasyon, ekonomik analiz.

ABSTRACT

Safe and sustainable supply of energy and the aim of minimizing the damage given to environment accelerate the transition to renewable energy sources. Geothermal energy which is one of the renewable energy sources came to the usable situation significantly in Turkey like in the entire world, as well. Although Turkey is rich in terms of geothermal sources, most of these sources can not be used in power generation.

According to properties of geothermal source in Kütahya-Simav region, optimum plants in terms of maximum net power, thermal and exergetic efficiency were selected and these plants were optimized according to various parameters. These plants are single flash, double flash, binary, combined, regenerative binary, regenerative binary with heat exchanger, binary with regenerator and Kalina cycle plants. Selected plants were optimized according to turbine inlet pressure maximizing net power, energy and exergy efficiencies. The effects of turbine inlet pressure on net power, thermal and exergetic efficiency were investigated in the plants studied. Besides energy and exergy analysis of the plants which were selected and optimized according to thermodynamic analysis, economic analysis (the costs per unit energy, payback periods, etc) in which interest, inflation and escalation rates were added to the costs were also done. According to the results obtained, it is seen that the best power

output in Kütahya-Simav region is in Kalina cycle, binary plant and binary with regenerator plants, respectively.

Key Words: Geothermal energy, efficiency, exergy, renewable energy, optimization, economic analysis.

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan Türkiye için enerji hem gerekli ve hem de stratejik önemi olan özelliklere sahiptir. Tüm dünyanın ilgilendiği; enerjinin güvenli ve sürdürülebilir temini, verimli kullanımı, sera gazı etkilerinin azaltılması ve çevrenin korunması, petrol fiyatlarındaki artma eğilimi ve kararsızlıklar, fosil kaynaklardan yeni ve yenilebilir enerji kaynaklarına doğru geçiş vb. konular aynı zamanda Türkiye'nin de ilgilendiği ve ister istemez politikasında yer vermesi gereken konulardır. Dünyada ve Türkiye'de enerjiye talep artmaktadır ve gelecekte de artmaya devam edecektir. Birçok kurum enerji talebinin projeksiyonları hakkında çalışma yapmaktadır [1].

Ülkemizde 40-232 °C arasında değişen birçok jeotermal bölge keşfedilmiştir. 100 ve 140 °C sıcaklığa kadar 1000'den fazla sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Günümüzde (2008) ülkemizde direkt kullanım 795 MWt iken, kurulu jeotermal güç üretim kapasitesi yaklaşık 32.65 MWe'tir. [2].

Literatürde jeotermal güç santrallerinin performans analizine yönelik birçok çalışma mevcuttur. Yari (2010), çalışmada yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için farklı tipteki jeotermal güç santrallerini ekserji analizlerine göre karşılaştırmıştır. Çalışmada tek flaşlı, çift flaşlı, kombine ve binary çevrimleri ele alınmıştır. Her bir çevrimin performansı I. yasa verimi, II. yasa verimi, ekserji kayıpları bakımından değerlendirilmiştir. Çevrimler arasında maksimum I. yasa veriminin %7.65 ile ikincil akışkan olarak R123'ün kullanıldığı ısı değiştiricili organik Rankine çevrimi olduğu belirtilmiştir [3].

Kanoğlu ve Bolattürk (2008), bir binary jeotermal güç santralının ekserji analizini, santralin gerçek datalarını kullanarak yapmışlardır. Ekserji analizi ile santralin performansı ve ekserji kayıpları tespit edilmiştir. Santraldeki ekserji kayıpları belirlenmiş olup, ekserji ve enerji diyagramları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ekserji kayıplarının en yüksek olduğu üniteler; reinjeksiyon, ısı değiştiricisi ve kondenserdir. Santralin başlıca ünitelerinin ekserji verimleri hesaplanmış olup, bu değerlerle ünitelerin performansları belirlenmiştir. Santralin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla, jeotermal suyun ısı değiştiricisine girişteki enerjisi ve ekserjisi baz alınarak, %4.5 ve %21.7 olarak bulunmuştur. Binary çevrimine girişteki ısı ve ekserji girdisi esas alınarak sırasıyla %10.2 ve %33.5 değerlerinde hesaplanmıştır. Çalışmada, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı, kondenser basıncı gibi parametrelerin; enerji ve ekserji verimlerine, net güce ve jeotermal akışkanın reinjeksiyon sıcaklığına olan etkileri araştırılmış ve açıklanmıştır [4].

Franco ve Villani (2009), düşük sıcaklıklı, sıvı ağırlıklı jeotermal bölgelerin analizini ve jeotermal binary santrallerinin optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, 110 -160 °C arasındaki sıcaklığa sahip bir kaynağın, reinjeksiyon hattına dönüş sıcaklığı 70-100 °C arasında kabul edilmiştir. Analizlerde; jeotermal akışkanın kütleli debisi her üretilen güç başına 20-120 kg/s aralığında iken, santralin II.yasa veriminin %20-45 arasında değiştiği belirtilmiştir. Santral optimizasyonu ile konvansiyonel tasarımlara kıyasla, jeotermal akışkanın debisinde azalma ve verimde %30-40'a kadar iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca, binary çevriminde farklı ikincil akışkanların kullanımıyla, performans bakımından en iyi sonuçların R152a ve izobütan ile gerçekleştiği vurgulanmıştır [5].

Heberle ve Brüggemann (2010), 450 K sıcaklığın altındaki jeotermal kaynaklara, kombine ısı ve güç santrallerinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada, organik Rankine çevrimi ile ilave ısı üretimi bulunan başka bir çevrim, II. yasa verimleri bakımından kıyas edilmiştir. Ayrıca, ikincil akışkan seçimi de yapılmıştır. Kombine ısı ve güç üretim santralının II. yasa veriminin, jeotermal güç santrallerine göre kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Güç üretimi için, yüksek kritik sıcaklığı bakımından izopentan, düşük kritik sıcaklığı bakımından R227ea'nın tercih edilebileceği açıklanmıştır [6].

Sanyal (2004), çalışmasında jeotermal güç santralının maliyet analizini sunmuştur. Maliyetlerin; sermaye maliyeti, çalışma ve bakım maliyeti, delme maliyetleri, kaynak karakteristikleri, gelişme ve çalışma opsiyonları, enflasyon ve faiz oranlarından oluşan makro-ekonomik şartlardan meydana geldiği belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda; güç maliyetlerinin ilk 10 yıl içinde, kuyuların delinmesi ve üretim kapasitesiyle azaldığı, santral çalışmaya başladıktan sonraki 20 yıl içinde devam eden delme işlemleriyle azalmanın meydana gelmediği tespit edilmiştir. Güç santralının çalışması ve yönetimindeki elde edilen deneyimlerle güç maliyetlerinin azalacağı belirtilmiştir. Düşük güce sahip, 30 yıldan daha fazla amortisman süresine sahip güç santrallerinin maliyetlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir [7].

Bu çalışmada, Türkiye'deki Kütahya-Simav bölgesinin 98–162 °C arasındaki sıcaklıklara sahip olduğu jeotermal kaynaklar incelenmiştir. Bölgedeki açılmış kuyulara ait özellikler Tablo 1'de verilmektedir. Bu çalışmada, kaynağın özellikleri dikkate alınarak çift akışkanlı, rejeneratörlü çift akışkanlı ve Kalina çevrimli santraller arasında en uygun santralin seçilmesi amaçlanmaktadır. Santrallerin optimum net güçlerini esas alarak, toplam maliyetler ve geri ödeme süreleri için ekonomik analizler yapılmıştır.

Tablo 1. Kütahya-Simav Jeotermal Bölgesine Ait Kuyuların Özellikleri [8]

Kuyu No	Yıl	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)	Debi (kg/s)	Basınç (bar) (Kuyu başı)
EJ-1	1987	725	162	72	6
E-6	1994	169	157	60–80	5.5
E-8	1997	205	161	50	5
EJ-3	1997	424	151	40–60	4.5–5
E-9	2005	208	98	60	5.5
E-10	2005	288	108	80–100	5.5
E-11	2005	502	99	35	4.5

2. JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİ

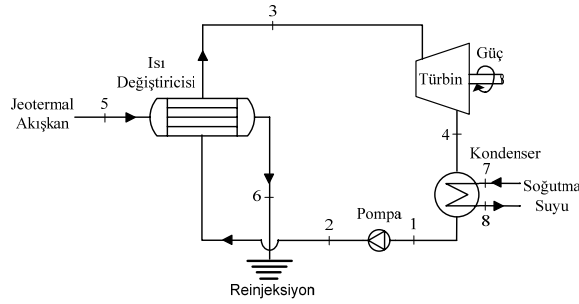
Bu çalışmada, bölge için incelenen termodinamik çevrimler (çift akışkanlı, rejeneratörlü çift akışkanlı ve Kalina) Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Çift akışkanlı çevrimde, yeraltından çıkarılan jeotermal akışkan Şekil 1.'de görüldüğü gibi bir ısı değiştiricisinden geçirilerek yeraltına reinjekte edilmektedir. İkincil akışkan olarak kullanılan izobütan, ısı değiştiricisinden aldığı ısıyla tamamen buharlaşarak türbine girmektedir. Türbini düşük basınç ve sıcaklıkta terk eden akışkan kondenserde yoğunlaştırılmaktadır. Daha sonra, bir pompa yardımıyla tekrar ısı değiştiricisine oradan da türbine gönderilmekte ve çevrim tamamlanmaktadır.

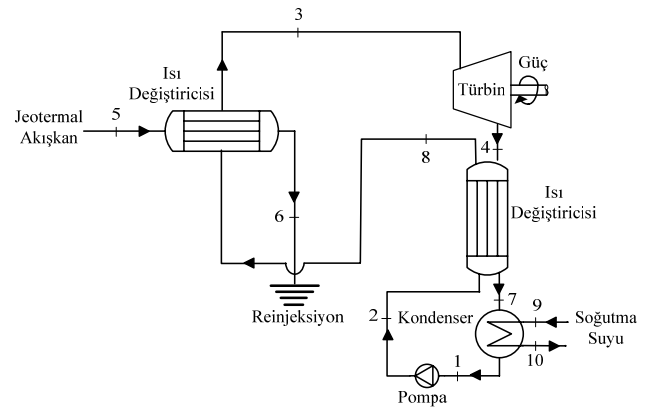
Şekil 2.'de gösterilen rejeneratörlü çift akışkan çevriminde, çift akışkanlı çevrime benzer olarak türbin çıkışında rejeneratör ünitesi ilave edilmektedir. Rejeneratör ile pompadan çıkan akışkanın sıcaklığı yükseltilmektedir. Daha sonra ısı değiştiricisine gönderilen ikincil akışkan buharlaştırılmakta ve çevrim tamamlanmaktadır.

Şekil 3'te ise Kalina çevriminin şematik resmi gösterilmektedir. Yeraltından çıkan jeotermal akışkan, ısısını ısı değiştiricisinde NH₃-H₂O çözeltilisine aktarmaktadır. Aldığı ısıyla doymuş hale gelen akışkan, ısıtıcıda tamamen buhar haline gelinceye kadar jeotermal akışkanın ısısı ile tekrar ısıtılmaktadır. Bir miktar daha ısı ilave edilerek ikincil akışkanın kızgın buhar fazına geçmesi sağlanmaktadır. Separatörde çözeltiliden ayrılan kızgın buhar halindeki NH₃ buharı türbine gönderilmekte ve güç üretilmektedir. Sıvı faz ise yüksek sıcaklık reküperatörüne gönderilmektedir. Türbinden çıkan NH₃ buharı, kondenserde yoğunlaşarak pompaya doymuş sıvı halinde girmektedir. Pompadan çıkan sıkıştırılmış sıvı halindeki NH₃ ile yüksek sıcaklık reküperatöründen gelen H₂O düşük sıcaklık reküperatöründe birleşerek ekzotermik bir reaksiyon olan NH₃-H₂O çözeltilisi meydana gelmektedir.

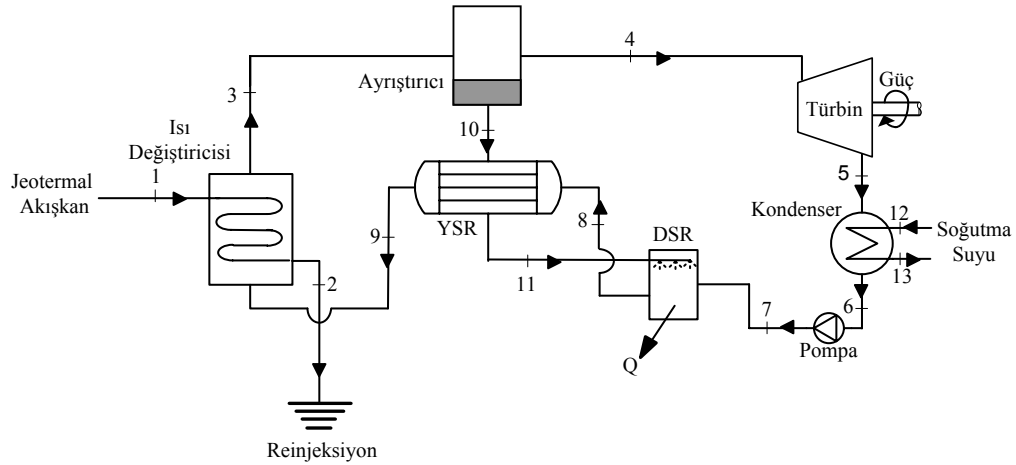
Daha sonra NH₃-H₂O çözeltisi, yüksek sıcaklık reküperatöründe separatörden ayrılan sıvı fazdaki H₂O bileşeninden ısı olarak ısı değiştiricisine girmekte ve çevrim tamamlanmaktadır.



Şekil 1. Çift Akışkanlı Çevrim



Şekil 2. Rejeneratörlü Çift Akışkanlı Çevrim



Şekil 3. Kalina Çevrimi

3. ÇEVİMLERİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Herhangi bir kontrol hacmi için, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilerek kütle, enerji ve ekserji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2)$$

$$\dot{X}_{ısı} + \dot{X}_{iş} = \sum \dot{X}_{kütle,ç} - \sum \dot{X}_{kütle,g} + \dot{X}_{kayıp} \quad (3)$$

Burada “g” girişi, “ç” çıkışı göstermekte olup, \dot{Q} ve \dot{W} net ısı ve iş girdisi, \dot{m} kütleli debi, h entalpi, $\dot{X}_{kayıp}$ ekserji kaybıdır. “0” indisi ölü hali simgelemektedir. $\dot{X}_{ısı}$, T sıcaklığındaki bir ısı kaynağından elde edilen net ekserji transferini belirtmektedir.

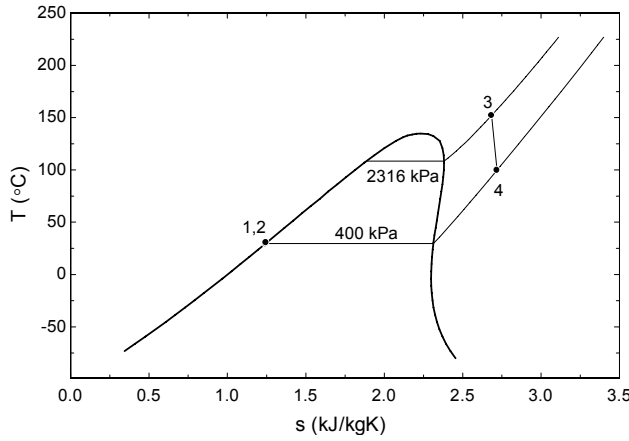
Çift akışkanlı santral için T-s diyagramı Şekil 4'te gösterilmekte olup, ısı değiştiricisi için enerji dengesi ve ΔT_{pn} sıcaklık farkı Şekil 5'e göre aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\dot{m}_{jeo}(h_{jeo,g} - h_{pn}) = \dot{m}_{binary}(h_{binary,\phi} - h_{binary,f}) \quad (4)$$

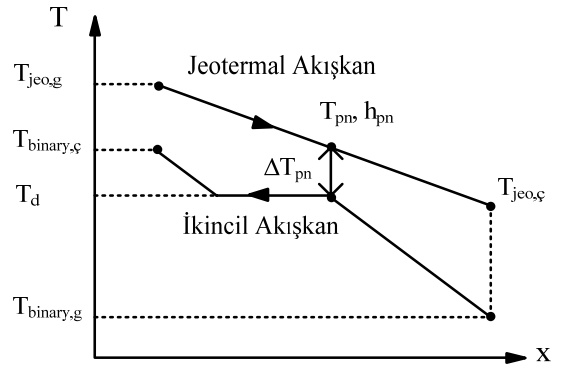
$$\dot{m}_{jeo}(h_{pn} - h_{jeo,\phi}) = \dot{m}_{binary}(h_{binary,f} - h_{binary,g}) \quad (5)$$

ve

$$T_{pn} = T_d + \Delta T_{pn} \quad (6)$$



Şekil 4. Çift Akışkanlı Santral İçin T-s Diyagramı



Şekil 5. Isı Değiştiricisi İçin Jeotermal Ve İkincil Akışkanın Sıcaklık Değişimi

Burada, $h_{jeo,g}$ ve $h_{jeo,\phi}$ sırasıyla, jeotermal akışkanın ısı değiştiricisine girişinde ve çıkışındaki entalpisidir. h_{pn} , jeotermal akışkanın pinch noktası sıcaklığındaki entalpisidir. $h_{binary,f}$, ikincil akışkanın doyma sıcaklığındaki doymuş sıvı entalpisidir. $h_{binary,g}$ ve $h_{binary,\phi}$ ise sırasıyla, ikincil akışkanın ısı değiştiricisine girişinde ve çıkışındaki entalpisidir.

Kondenser için ise, enerjinin korunumu ilkesi uygulanırsa,

$$\dot{m}_{su}(h_{su,\phi} - h_{su,g}) = \dot{m}_{binary}(h_g - h_\phi) \quad (7)$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada \dot{m}_{su} ve \dot{m}_{binary} , sırasıyla soğutma suyunun ve ikincil akışkanın kütleli debileridir.

Jeotermal güç santrallerinin enerji verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{jeo}(h_{jeo} - h_0)} \quad (8)$$

Jeotermal akışkanın ekserjisi santrale giren ekserji girdisi olmak üzere, jeotermal güç santralinin ekserji verimi,

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{X}_g} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{jeo}(h_{jeo} - h_0 - T_0(s_{jeo} - s_0))} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bu çalışmada, yapılan kabuller aşağıdaki gibidir:

1. Kütahya-Simav bölgesi için santrallere giren jeotermal akışkanın sıcaklığı ve debisi sırasıyla, 162 °C ve yaklaşık olarak 100 kg/s,
2. Ölü hal sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 25 °C ve 100 kPa,
3. Türbin ve pompa izentropik verimleri 0.85,
4. Çift akışkanlı çevrimlerde aracı akışkan olarak izobütan,
5. Çift akışkanlı çevrimlerdeki ısı değiştiricilerin pinch noktası sıcaklık farkı (ΔT_{pn})=5 °C,
6. Çift akışkanlı çevrimler için ısı değiştiricilerin etkinliği 0.80,
7. Üretilen gücün %10'unun santraller içinde (pompa, fan, vs.) tüketildiği [9],
8. Santrallerin ömrü 25 yıl,
9. Santrallerin yapım süresi 5 yıl,
10. Faiz oranı %7.75 [10],
11. Eskalasyon oranı %5,
12. Enflasyon oranı (ÜFE) %2.2 [11],
13. Elektrik birim fiyatı 0.05 \$/kWh,
14. Yük faktörü 0.90 olarak varsayılmıştır.

4. JEOTERMAL GÜÇ SANTRALLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ

Bir jeotermal güç santralının fiziki inşaat tutarı,

$$I_d = C_s \cdot \dot{W}_{net} \quad (10)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Burada, C_s (\$/kW) santralin birim tesis maliyeti olup, \dot{W}_{net} (kW) ise santralin net gücünü ifade etmektedir.

4.1. Eskalasyon Yükü

Eskalasyon, santrallerin yapım süresince kullanılan malzeme, ekipman ve işçilik fiyatlarındaki artıştır. Bu sebeple, santralin yapım süresince yapılan harcama eskalasyonun etkisiyle direkt inşaat bedelinden daha da yüksek olacaktır. Herhangi bir yıla ait eskalasyonsuz harcama miktarı,

$$Y(t) = I_d \cdot y(t) \quad (11)$$

ile hesaplanmaktadır. $y(t)$, yapım süresince yıllık harcama yüzdesini göstermektedir. Santrallerin yapım süresince toplam eskalasyonlu harcama miktarı ise,

$$Y_e(t) = \sum_{t=1}^t Y(t) \cdot (1+e)^t \quad (12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; e , eskalasyon oranını, t ise eskalasyon periyodunu göstermektedir.

4.2. Faiz ve Enflasyon Yükü

Santralin yapım süresince yapılan harcamalar için kredi alındığı düşünülürse, eskalasyonlu harcama miktarlarına ilave olarak faiz yükünün de geri ödenmesi gerekmektedir. Santralin yapımının bitiminde geri ödenmesi gereken faiz ve enflasyon yükü dahil olmak üzere,

$$P(t) = Y_e(t) \cdot (1+i')^{b-t} \quad (13)$$

denklemini ifade edilmektedir. Burada, b inşaat süresini temsil etmektedir. i', yıllık üretici fiyatları enflasyonu dahil olmak üzere yıllık bileşik faiz oranını göstermektedir. Enflasyon oranının dahil olduğu faiz oranı [12],

$$i' = \frac{1+i}{1+f} - 1 \quad (14)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. i yıllık faiz oranı, f ise yıllık ortalama üretici fiyatları enflasyonunu temsil etmektedir. Yapım sonunda; eskalasyon, faiz ve enflasyon oranları dahil olmak üzere toplam harcama miktarı (M\$),

$$P = \sum_{t=1}^b P(t) \quad (15)$$

şeklinde hesaplanabilir.

4.3. İşletmenin Sabit Yıllık Sermaye Maliyeti

Santralin yapımında yapılan harcamalardan dolayı kullanılan kredinin geri ödemesi başlangıç tarihi, santralin teslim tarihi alınarak santral ömrü boyunca ödenecek sabit yıllık sermaye maliyeti,

$$C_k = P \cdot \frac{i'(1+i')^n}{(1+i')^n - 1} \quad (16)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada, n santralin ömrünü göstermektedir. Santralde, yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı (MWh),

$$E = 8760 \cdot \dot{W}_{net} \cdot L_f \quad (17)$$

şeklinde olup, yük faktörü olup, jeotermal santrallerde 0.90 olarak kabul edilmiştir.

4.4. Yıllık İşletme ve Bakım Maliyetleri

Jeotermal güç santrallerinde yıllık işletme ve bakım maliyetleri, santrallerin yatırım maliyetlerinin %3 veya %4'ü kadardır. Yıllık işletme ve bakım maliyeti,

$$C_m = C_{sm} \cdot \dot{W}_{net} \quad (18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. C_{sm} , \$/kW yıl cinsinden sabit masrafları göstermektedir.

4.5. Gelecekteki Maliyetlerin Bugüne İndirgenmesi

t dönem sonundaki sermaye maliyetinin ($C_k(t)$) bugünkü değeri (B),

$$B_s = \sum_{t=1}^l C_k(t) \cdot (1+i')^{-t} \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin bugünkü değeri ise

$$B_{ib} = \sum_{t=1}^l C_m(t) \cdot (1+i')^{-t} \quad (20)$$

şeklinde hesaplanabilir. Santralin yapımı ve çalışma ömrü boyunca yapılan tüm masrafların bugüne getirilmiş toplamlarının, santralin ömrü boyunca üreteceği enerji miktarına oranlanmasıyla,

$$g_e = \frac{B_s + B_{ib}}{E} \quad (21)$$

denklemini elde edilmektedir. Bu ifade (g_e), birim enerji başına sermaye maliyetini temsil etmektedir. Santrallerin geri ödeme süreleri ise,

$$GÖS = \frac{B_s + B_{ib}}{E \cdot E_b} \quad (22)$$

ile ifade edilmektedir. E_b , \$/kWh cinsinden elektriğin birim fiyatını belirtmektedir.

Çevrimlerin optimizasyonu için belirtilen formüller ve kabuller kullanılarak termodinamik özellik fonksiyonlarını içeren bir bilgisayar programı (Engineering Equation Solver) kullanılmıştır [13].

SONUÇ

Çift akışkanlı, rejeneratörlü çift akışkanlı ve Kalina çevrimli santraller için türbin giriş basıncının net güce, enerji ve ekserji verimlerine etkisi Şekil (6–11)'de görülmektedir. Santrallerin bileşenlerinin enerji ve ekserji kayıpları Şekil (13–16)'da görülmektedir. Kütahya-Simav bölgesi için kurulması planlanan güç santrallerinin optimum değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kütahya-Simav Bölgesi İçin Çevrimlerin Optimum Türbin Giriş Basıncılarına Göre Net Güçleri, Enerji ve Ekserjetik Verimleri

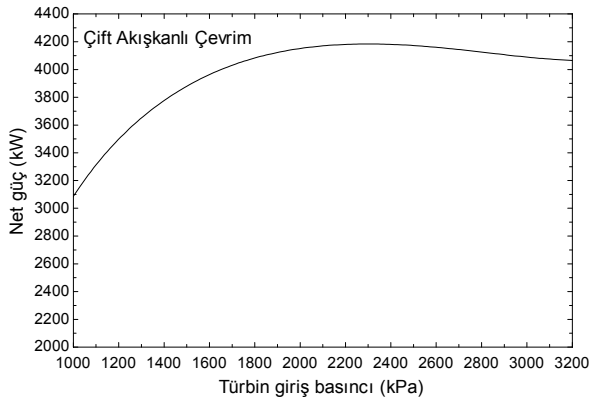
Santraller	Optimum Türbin Giriş Basıncı (kPa)	Net Güç (kW)	Enerji verimi (%)	Ekserji verimi (%)
Çift akışkanlı santral	2316	4184	7.2	40.3
Rejeneratörlü çift akışkanlı santral	2329	4184	7.2	40.3
Kalina çevrimli santral	12222	6148	10.6	59.3

Jeotermal güç santrallerinde üretilen enerjinin maliyeti ve santrallerin geri ödeme süreleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Çift akışkanlı çevrim için birim tesis maliyeti 2259.2 \$/kW olarak alınmıştır [14]. Kalina çevrimli jeotermal santral için birim maliyet 1300 \$/kW olarak kabul edilmiştir [15].

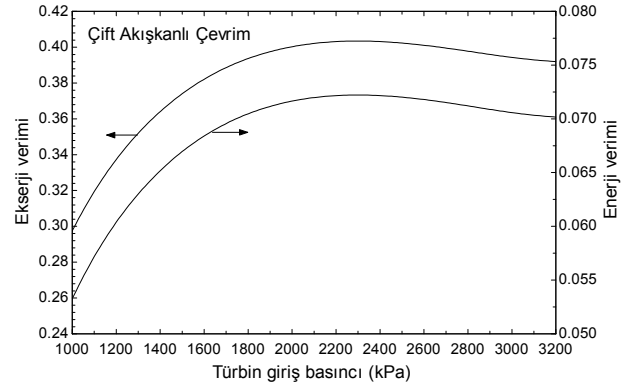
Tablo 3. Kütahya-Simav Bölgesi İçin Maliyetler ve Geri Ödeme Süreleri

Çevrim	Toplam Maliyet (M\$)	Birim Enerji Başına Düşen Maliyet (\$/kWh)	Geri Ödeme Süresi (Yıl)
Çift akışkanlı çevrim	16.64	0.0202	10.1
Kalina çevrimi	14.08	0.0116	5.8

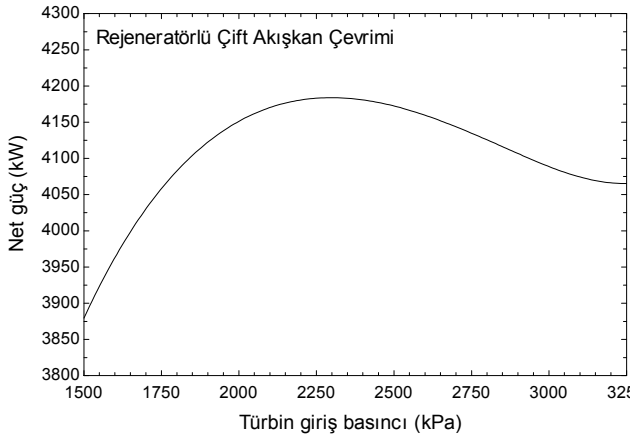
Kütahya-Simav bölgesinde en iyi güç çıktısı, ısı verim ve ekserjetik verimin Kalina çevrimli santralde olduğu görülmektedir. Çift akışkanlı ve rejeneratörlü çift akışkanlı santrallerin net güçleri, ısı ve ekserjetik verimlerinin aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Çift akışkanlı santrallere göre kıyasla Kalina çevrimli santralde net güçte %47 oranında artış sağlanmaktadır. Kalina çevrimli santralin net gücünün ve verim değerlerinin fazla ve çift akışkanlı çevrimlerden daha yüksek olmasının sebebi amonyak-su karışımının kullanılmasıdır. Amonyak-su karışımının konsantrasyonu değiştiğinde buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıkları değişmektedir. Bu durum, optimum türbin giriş basıncının daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Yüksek basınçta amonyağın entalpisi artacağından dolayı çevrimin net gücü, ısı verimi ve ekserjetik verimi, diğer çevrimlere göre daha yüksek olmaktadır. Amonyak-su karışımının konsantrasyonu da net gücü etkilemektedir. Şekil 12'ye göre amonyağın ağırlıkça yüzdesi arttıkça net güç belirli bir değere kadar düşmekte, daha sonra tekrar yükselmektedir.



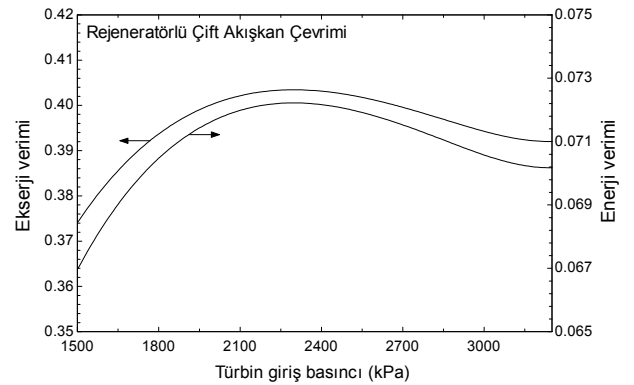
Şekil 6. Çift Akışkanlı Çevrim için Türbin Giriş Basıncının Net Güce Etkisi



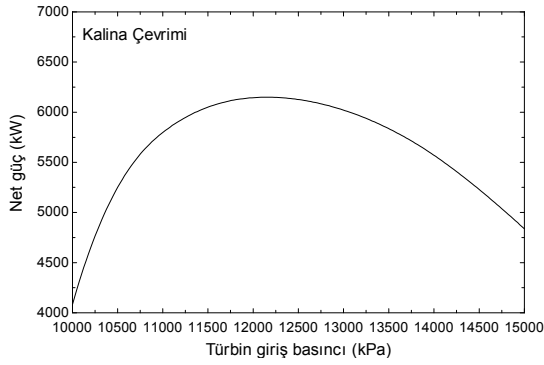
Şekil 7. Çift Akışkanlı Çevrim için Türbin Giriş Basıncının Enerji ve Ekserji Verimine Etkisi



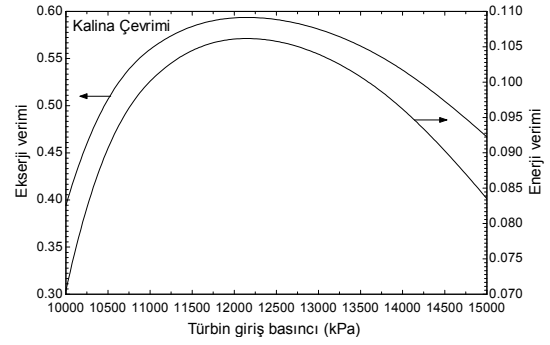
Şekil 8. Rejeneratörlü Çift Akışkanlı Çevrim için Türbin Giriş Basıncının Net Güce Etkisi



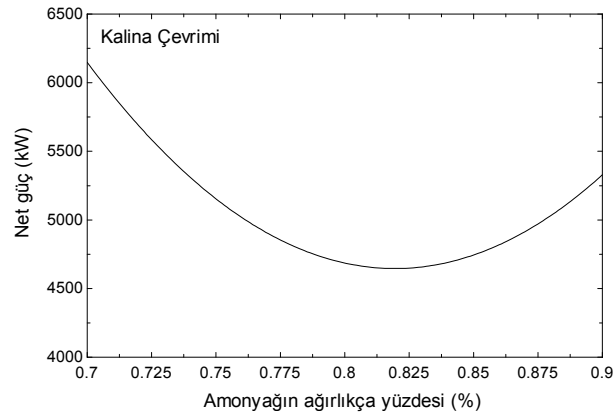
Şekil 9. Rejeneratörlü Çift Akışkanlı Çevrim için Türbin Giriş Basıncının Enerji ve Ekserji Verimine Etkisi



Şekil 10. Kalina Çevrimi İçin Türbin Giriş Basıncının Net Güce Etkisi

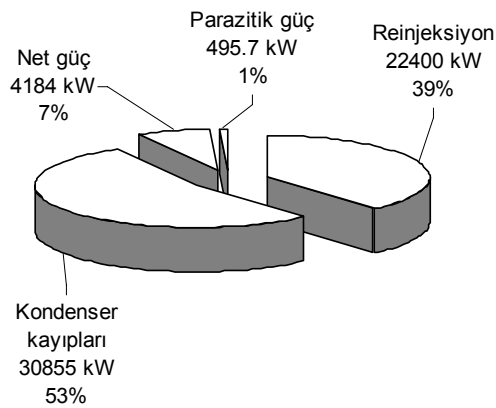


Şekil 11. Kalina Çevrimi İçin Türbin Giriş Basıncının Enerji ve Ekserji Verimine Etkisi

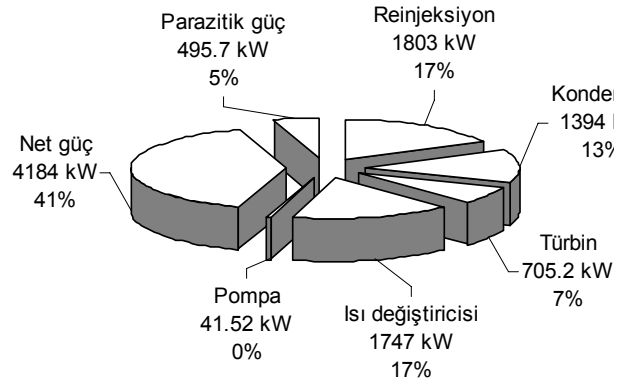


Şekil 12. Kalina Çevrimli Santral İçin Amonyanın Ağırlıkça Yüzdesinin Net Güce Etkisi

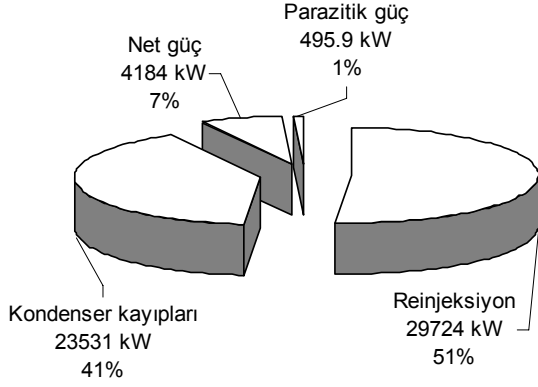
Sonuçlardan görüleceği üzere, birim enerji maliyetleri ve geri ödeme süreleri bakımından en avantajlı olanı Kalina çevrimli santraldir. Kalina çevrimin birim tesis maliyetinin düşük olması sebebiyle enerji maliyeti ve geri ödeme süresi de düşük olmaktadır. Kalina çevrimli santralden performans ve ekonomiklik açısından daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.



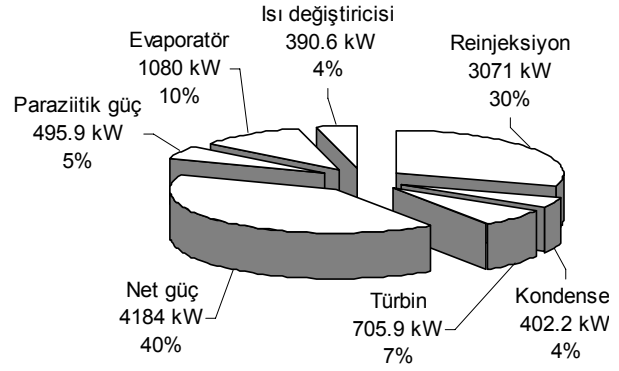
Şekil 13. Çift Akışkanlı Santral İçin Enerji Kayıpları



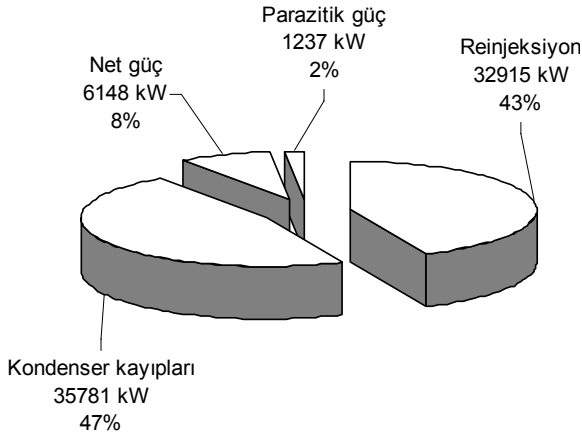
Şekil 14. Çift Akışkanlı Santral İçin Ekserji Kayıpları



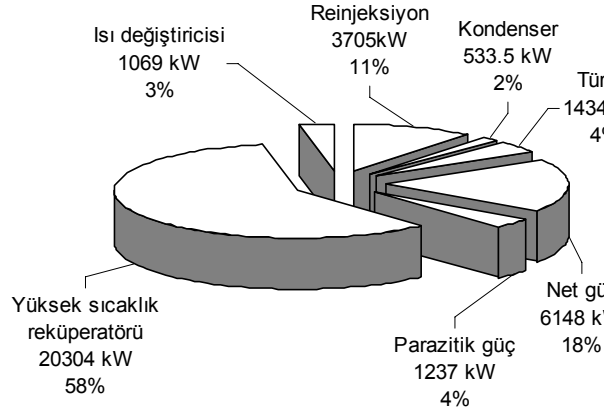
Şekil 15. Rejeneratörlü Çift Akışkanlı Santral İçin Enerji Kayıpları



Şekil 16. Rejeneratörlü Çift Akışkanlı Santral İçin Ekserji Kayıpları



Şekil 17. Kalina Çevrimli Santral İçin Enerji Kayıpları



Şekil 18. Kalina Çevrimli Santral İçin Ekserji Kayıpları

İncelenen bölgeye kurulması düşünülen jeotermal güç santrallerinin seçiminde ekserji analizlerinin önemli bir rol aldığı görülmektedir. Ekserji analizleri, güç üretim sistemlerinin optimizasyonu için kullanılan en iyi metottur. Jeotermal güç santrallerinin hem genel olarak hem de bileşenlerinin verimleri ve kayıplarının belirlenmesi, santrallerin performansları bakımından büyük bir öneme sahiptir. Jeotermal güç santrallerinde özellikle reinjeksiyon ünitelerindeki kayıplar her zaman için dikkate alınmalıdır. Kayıpların en aza indirilmesi için bu ünitelerdeki atık ısıdan maksimum derecede faydalanılması gerekmektedir. Böylelikle santrallerin güç üretim kapasiteleri ve verimlerinde iyileşmeler sağlanabilir.

Jeotermal bölgeler için seçilecek santrallerde dikkat edilmesi gereken başka bir husus, santral maliyetleridir. Bir santralden elde edilen güç ve verim değerlerinin en iyi olmasının yanında, birim enerji başına düşen maliyet ve yapılan masrafların geri ödeme sürelerinin dikkate alınması dikkate alınması gereken başka bir husustur. Güç üretim sistemlerinde enerji ve ekserji analizleri performans değerlendirilmesi açısından tek başına yetersizdir. Dolayısıyla, jeotermal bir kaynak için en iyi santralin seçilmesinde termodinamik analizin yanında ekonomik analizin yapılması gerekmektedir.

SEMBOLLER

\dot{Q}	Isı, kW
\dot{W}	Güç, kW
\dot{m}	Kütleli debi, kg/s
h	Özgül entalpi, kJ/kg
\dot{X}	Ekserji, kW
$\dot{X}_{\text{kayıp}}$	Ekserji kaybı, kW
T	Sıcaklık, °C
η_{th}	Isıl verim
η_{ex}	Ekserjetik verim
\dot{W}_{net}	Net güç, kW
I_d	Santralin fiziki inşaat tutarı
$Y(t)$	Eskalasyonsuz harcama miktarı
$Y_e(t)$	Eskalasyonlu harcama miktarı
e	Eskalasyon oranı
b	İnşaat süresi
B_s	Sermaye maliyetinin bugünkü değeri
B_{ib}	İşletme ve bakım maliyetlerinin bugünkü değeri
GÖS	Geri ödeme süresi
E	Yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı
g_e	Birim enerji başına düşen sermaye maliyeti
i'	Yıllık bileşik faiz oranı
C_k	Sabit yıllık sermaye maliyeti
t	Eskalasyon periyodu
C_m	Yıllık işletme ve bakım maliyeti
DSR	Düşük sıcaklık reküperatörü
YSR	Yüksek sıcaklık reküperatörü

İNDİSLER

g	Giriş
\dot{c}	Çıkış
jeo	Jeotermal akışkan
binary	İkincil akışkan
d	Doyma
pn	Pinch noktası

KAYNAKLAR

- [1] SATMAN, A., “Türkiye'nin Enerji Vizyonu”, Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Semineri, 3-18, 2007.
- [2] SERPEN, U., AKSOY, N., ÖNGÜR, T., KORKMAZ, E.D., “Geothermal Energy in Turkey: 2008 update”, Geothermics 38 (2), 227-237, 2009.
- [3] YARI, M., “Exergetic Analysis of Various Types of Geothermal Power Plants”, Renewable Energy 35 (1), 112-121, 2010.
- [4] KANOGLU, M., BOLATTURK, A., “Performance and Parametric Investigation of a Binary Geothermal Power Plant by Exergy”, Renewable Energy 33 (11), 2366-2374, 2008.

- [5] FRANCO, A., VILLANI, M., “Optimal Design of Binary Cycle Power Plants for Water-Dominated, Medium-Temperature Geothermal Fields”, *Geothermics* 38 (4), 379-391, 2009.
- [6] HEBERLE, F., BRUGGEMANN, D., “Exergy Based Fluid Selection for a Geothermal Organic Rankine Cycle For Combined Heat And Power Generation”, *Applied Thermal Engineering* 30 (11-12), 1326-1332, 2010.
- [7] SANYAL, S.K., “Cost of Geothermal Power and Factors that Affect it, Proceedings”, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, 2004.
- [8] ANONİM, Kütahya Simav Belediyesi, 2008.
- [9] KANOĞLU, M., CENGEL, Y.A., “Performance evaluation of a binary geothermal power plant in Nevada”, *Proceedings of the ASME*, 37, 139-146, 1997.
- [10] TCMB (Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası), Gecelik Faiz oranları, <http://www.tcmb.gov.tr>, (Erişim: 10 Kasım 2009), 2005.
- [11] TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) Ekim Ayı Enflasyon Verileri, <http://www.beyazgazete.com/haber/2009/11/03/ekim-ayi-enflasyon-verileri-aciklandi.html>, (Erişim: 3 Kasım 2009), 2009.
- [12] THUESEN, G.J, FABRYCKY, W.J., “Engineering Economy”. Seventh Edition, Prentice Hall, ISBN: 0-13-277781-9, 717p. United States of America, 1988.
- [13] KLEIN, S.A., Engineering Equation Solver (EES), Academic Commercial V8.208, F-Chart Software, www.fChart.com, 2008.
- [14] GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION, <http://www.geo-energy.org>, (Erişim:05.01.2011),2005.
- [15] VALDIMARSSON, P., ELIASSON, L., “Factors Influencing the Economics of the Kalina Power Cycle and Situations of Superior Performance”, *Proceedings of International Geothermal Conference*, 32-40, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet COŞKUN

1980 yılı Antalya doğumludur. 2001 yılında SDÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. 2005 yılında aynı Üniversitede yüksek lisansını tamamlamıştır. 2002 yılından beri SDÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Güç çevrimleri, ekserji ve jeotermal güç santralleri konularında çalışmaktadır.

Ali BOLATTÜRK

1969 yılı İskenderun doğumludur. 1990 yılında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitede 1992 yılında yüksek lisansını ve 1997 yılında Süleyman Demirel Üniversitesinde doktorasını tamamlamıştır. 1997-2008 yılları arasında Süleyman Demirel Üniversitesinde Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Yardımcı Doçent olarak görev yapmıştır. 2008 yılında Doçent ünvanını almıştır. Yalıtım, enerji yönetimi ve tasarrufu, ekserji, jeotermal enerji konularında çalışmaktadır.

Mehmet KANOĞLU

1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Yüksek lisansını ve doktorasını ABD’de Nevada Üniversitesi’nde (University of Nevada, Reno) 1996 ve 1999 yıllarında tamamlamıştır. 2002 yılında doçent, 2008 yılında profesör olmuştur. 2000 yılından beri Gaziantep Üniversitesi’nde görev yapmaktadır. 2006-2007 akademik yılını Canada’da bulunan Ontario Üniversitesi Teknoloji Enstitüsü’nde (University of Ontario Institute of Technology) misafir öğretim üyesi olarak geçirmiştir. Çalıştığı alanlar arasında jeotermal enerji, kojenerasyon, enerji yönetimi ve tasarrufu, soğutma sistemleri, doğal gaz sıvılaştırması ve hidrojen üretimi ve sıvılaştırılması sayılabilir.