



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Organik Rankine Çevrimi Prensibi ile Düşük Sıcaklıktaki Kaynaklardan Elektrik Üretim Uygulamaları

Alper ERGÜN^{*}, Mehmet ÖZKAYMAK, Erdoğan KILIÇASLAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE

** Sorumlu yazarın e-posta adresi: alperergun@karabuk.edu.tr*

ÖZET

Düşük sıcaklıklardaki kaynaklardan elektrik üretmek için en etkili yollardan biri Organik Rankine Çevrimidir. Organik Rankine Çevrimi dünya genelinde birçok yerde kullanılmasına rağmen ülkemiz için yeni sayılabilecek bir araştırma konusudur. Yapılan bu çalışmada Organik Rankine Çevriminin çalışma prensibi anlatılmış ve literatürde sık rastlanan sistemler ile ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca sistemlerinin kullanım alanları hakkında kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, ülkemizde kullanılacak ORÇ sistemleri hakkında önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Organik rankine çevrimi, atık ısı, alternatif enerji, elektrik üretimi.*

Power Generation Applications with Organic Rankine Cycle from Low Temperature Heat Sources

ABSTRACT

One of the most effective ways to generate power from low temperature heat sources is Organic Rankine. Although ORC systems were using in the world, it is new research area for our country. In this study, described working principle of ORC systems and inform about common systems in the literature. Also done extensive research on using of the system. At the end of the study, making suggestions about ORC system that can be used in our country.

Keywords: *Organic rankine cycle, waste heat, alternative energy, power generation.*

I. GİRİŞ

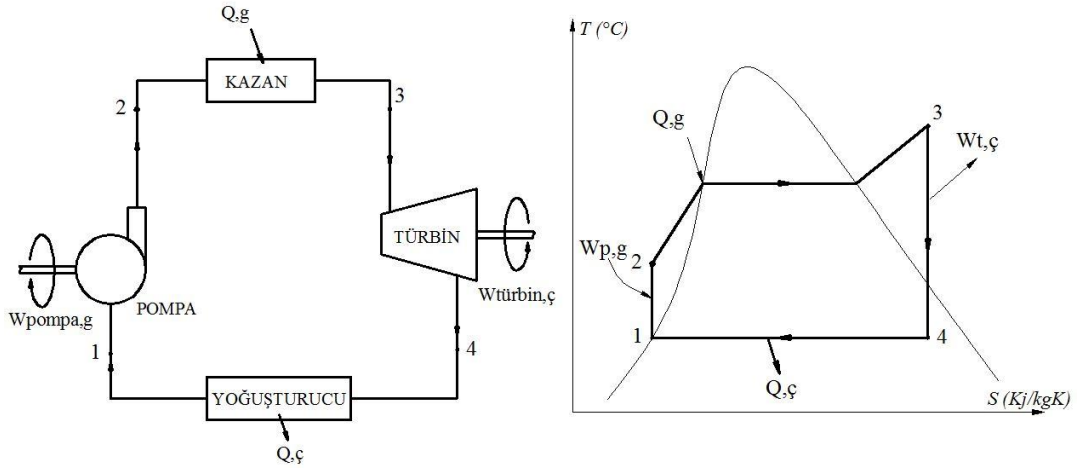
ELEKTRİK enerjisi günümüzün en büyük ihtiyaçları arasındadır. Gelişen teknoloji, artan elektronik cihazlar elektrik tüketimini de her geçen gün arttırmaktadır. Günümüzde elektrik üretmek için kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerin büyük bir kısmı termik santrallerde kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılıp enerjisinin bir akışkana aktarılarak, elde edilen buharın bir türbine hareket vermesiyle gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde termik santrallerin payı ülkelere bağlı olarak %50 ile %95 arasında değişmektedir [1]. Bu orana bakılarak giderek artan elektrik ihtiyacı ve çevre kirliliği ülkeleri alternatif ve temiz elektrik üretim yöntemlerine yöneltmiştir. Alternatif (yenilenebilir) enerji sistemleri ülkelerin enerji ihtiyacının küçük bir kısmını karşılayabilmektedir ve söz konusu elektrik üretimi olduğunda bu kaynaklar çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu durumda Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) karşımıza umut verici bir gelişme olarak çıkmaktadır. ORÇ sistemleri yenilenebilir enerji kaynakları ve atık ısı kaynakları (baca gazı vb.) gibi düşük sıcaklıktaki kaynaklarla birleştirilip kullanıldığı zaman elektrik üretilmesi mümkün olmaktadır. Bu durum elektrik ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olunmasının yanı sıra fosil kökenli yakıtların oluşturduğu çevre kirliliğinin önüne geçmektedir. Yapılan bu çalışmada ORÇ sistemlerinin çalışma prensibi ve uygulama alanları hakkında geniş kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Araştırma neticesinde ORÇ sistemlerinin çalışması ve uygulama alanları hakkında bilgiler verilecektir.

II. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

ORÇ sistemi ülkemizde yeni bir teknoloji olmasına rağmen dünya genelinde birçok bölgede uzun yıllardır kullanılmaktadır. ORÇ çalışma prensibi bilinen rankine çevrime çok benzerdir. Rankine çevrimindeki iş yapan akışkan olan su yerine, daha düşük sıcaklıkta buhar fazına gelen ve yüksek basınçlara ulaşabilen organik akışkanlar kullanılır.

A. İdeal Rankine Çevrimi

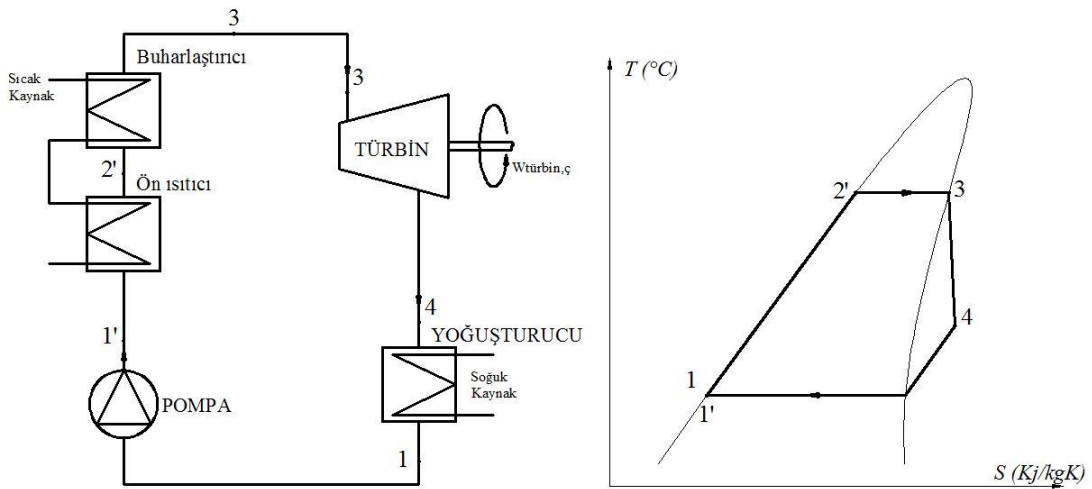
Şekil 1'de görülen İdeal Rankine çevrimine bakıldığında; Rankine çevrimi 4 ana elemandan oluşur. Bunlar, pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucudur. Burada su, pompaya 1 noktasında doymuş sıvı olarak girer ve izentropik bir hal değişimiyle kazan basıncına sıkıştırılır ve ardından kazana 2 noktasında sıkıştırılmış sıvı olarak girer ve 3 halinde kızgın buhar olarak çıkar. Kazan temelde büyük bir ısı değiştiricisidir. Yanma sonucunda oluşan gazlardan, nükleer reaktörden veya diğer kaynaklardan sağlanan ısı burada sabit basınçta, suya geçer. 3 noktasındaki kızgın buhar, türbinde izentropik olarak genişler ve bir mili döndürerek iş yapar. Bu mil elektrik üretimi için bir jeneratöre bağlanmıştır. Bu genişleme sırasında buharın sıcaklığı ve basıncı düşer. Buhar, türbinden çıktıktan sonra 4 noktasında kondensere girer. Bu esnada buhar, doymuş sıvı-buhar karışımı halindedir. Su, 1 noktasından doymuş sıvı halinde çıkar ve tekrar pompaya girerek döngüsünü tamamlar [2,3].



Şekil 1. İdeal rankine çevrimi ve T-S diyagramı

B. Basit ORÇ Sistemleri

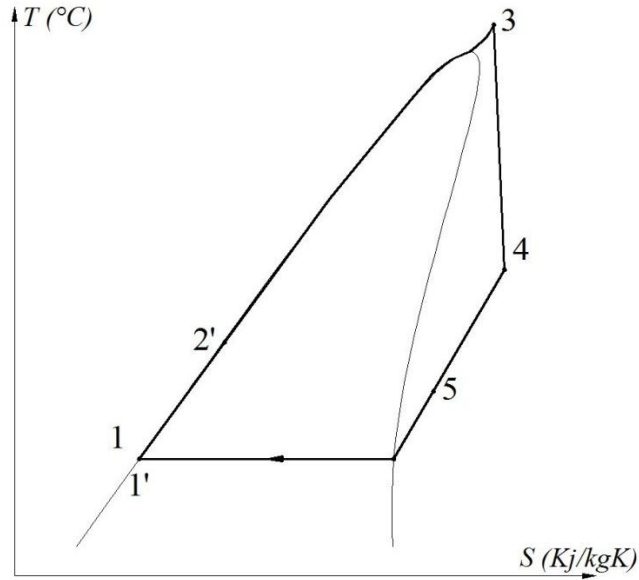
Şekil 2.'de görülen basit organik rankine çevrimi 4 ana elemandan oluşur, bunlar; pompa, buharlaştırıcı, organik türbin ve yoğuşturucudur. Çevrimde kullanılan organik akışkan pompa aracılığıyla basınçlandırılarak buharlaştırıcıya gönderilir, buharlaştırıcı olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir, yenilenebilir bir kaynaktan alınan ısıyı, organik akışkana aktarır. Bu işlemler sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Ardından organik türbin'e gönderilerek mekanik işe dönüştürülür. Daha sonra yoğuşturucuya dönerek tekrar sıvı hale gelir. Çevrim bu döngüde devam eder. Basit ORÇ sisteminde genellikle kaynaktan elde edilen ısının kullanım verimini arttırmak için buharlaştırıcıdan sonra bir ön ısıtıcı kullanılır.



Şekil 2. Basit ORÇ sistemi ve T-S diyagramı.

C. Süperkritik ORÇ Sistemi

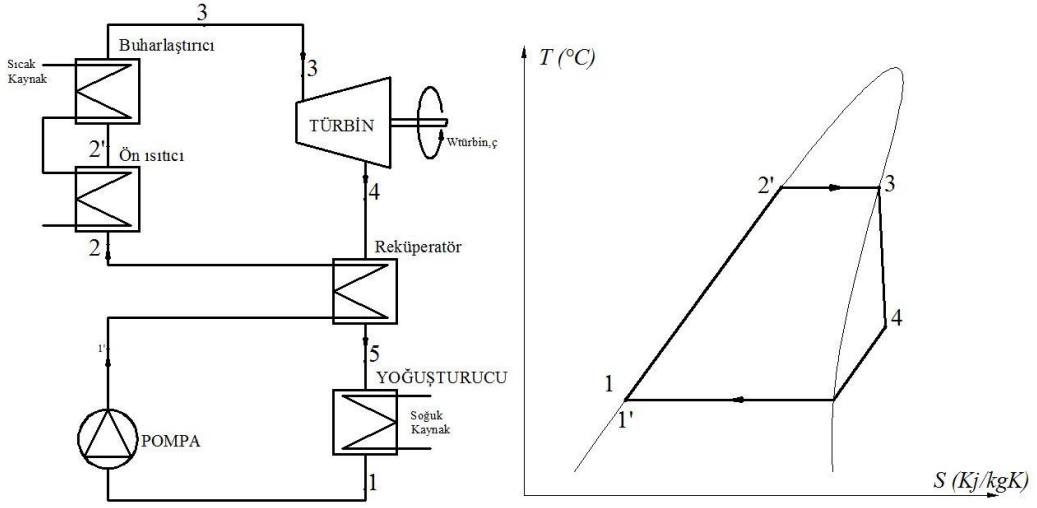
Süperkritik ORÇ sistemlerinde, organik akışkan kendi kritik sıcaklık noktasının üzerinde bir sıcaklık değerinde çalışır. Çevrim sırasında organik akışkan tekrar basınçlandırılmadan önce türbinde genişler, ısısını atarak yoğuşur ve alt basınç bölgesine ulaşır. Ardından akışkanın basıncı birden artar ve süperkritik noktaya ulaşır [2]. Şekil 3.'te süperkritik ORÇ sisteminin T-S diyagramı görülmektedir.



Şekil 3. Süperkritik ORÇ T-S diyagramı.

D. Reküperatif ORÇ Sistemi

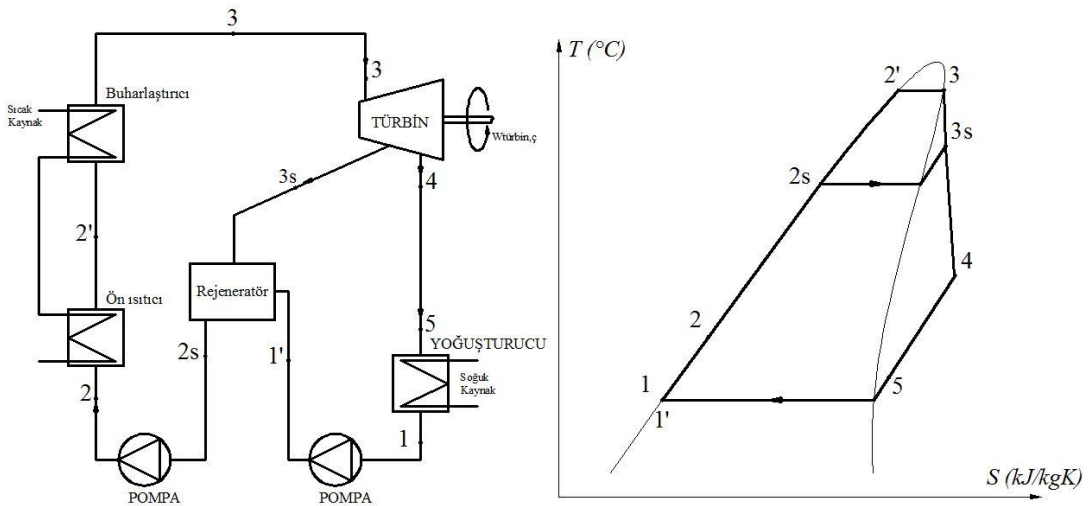
Şekil 4.'te görülen Reküperatörlü ORÇ sisteminde, basit ORÇ sisteminden farklı olarak türbin çıkışındaki ısı kullanıp, bu ısıyı ön ısıtıcıya girecek olan organik akışkana aktarmak için kullanılan bir reküperatör mevcuttur. Reküperatör sistemdeki organik akışkanın kondensere girmeden önce ısısını atmasını aynı zamanda da ön ısıtıcıya girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansını artırır.



Şekil 4. Reküpëratif ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı.

D. Rejeneratif ORÇ Sistemi

Şekil 5'te görülen rejeneratörlü ORÇ sistemlerinde ise basit ORÇ sistemlerinden farklı olarak bir rejeneratör, ve ikinci bir pompa kullanılır. 1. pompa ORÇ sisteminin döngüsünü tamamlar bu esnada türbindeki genişleme sırasında, türbinden bir miktar kızgın buhar çekilir ve rejeneratöre gönderilir, çevrim tamamlanırken kondenserde yoğuşan organik akışkan 2. pompa aracılığıyla rejeneratöre gönderilir. Bu sırada türbinden genişleme sırasında çekilen buhar ve yoğuşmuş akışkan arasında ısı geçişi olur ve rejenerasyon gerçekleşir. Bu sistemde de reküpëratif sistemdeki gibi ön ısıtıcıdan önce bir ısıtma işlemi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 5. Rejeneratif ORÇ sisteminin şeması ve T-S diyagramı.

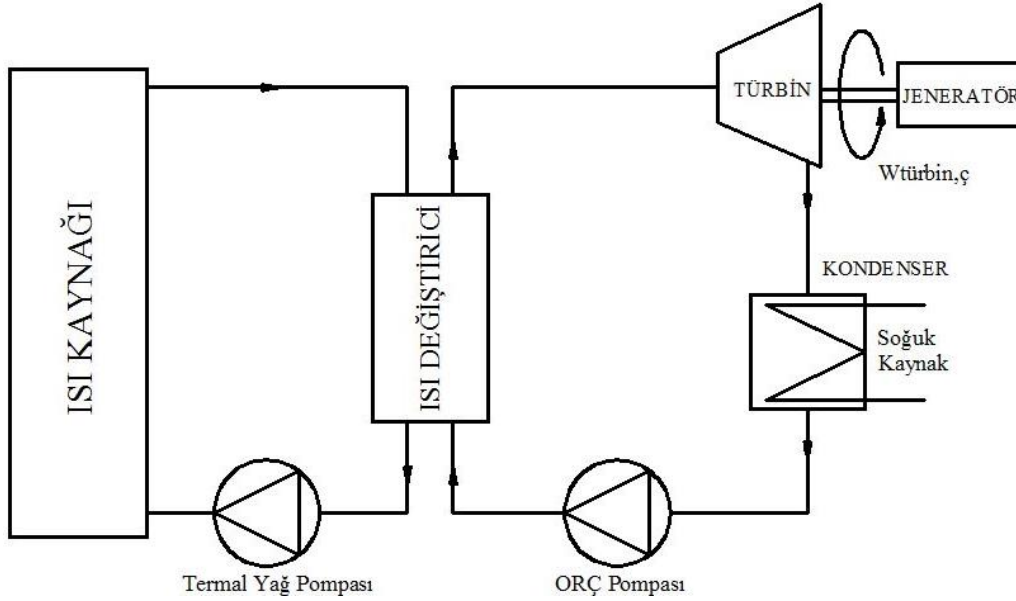
III. ORÇ SİSTEMLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Dünya genelinde ORÇ sistemleri giderek artmaktadır, birçok firma ORÇ sistem ve ekipmanlarını üretmeye başlamıştır [4-7]. Fakat bu sistemlerin uygulamaya geçmesi henüz yeterli seviyeye ulaşmamıştır. ORÇ sistemlerinin uygulamaları 3 temel başlık altında incelenebilir.

A. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri (Waste Heat Recovery ORC)

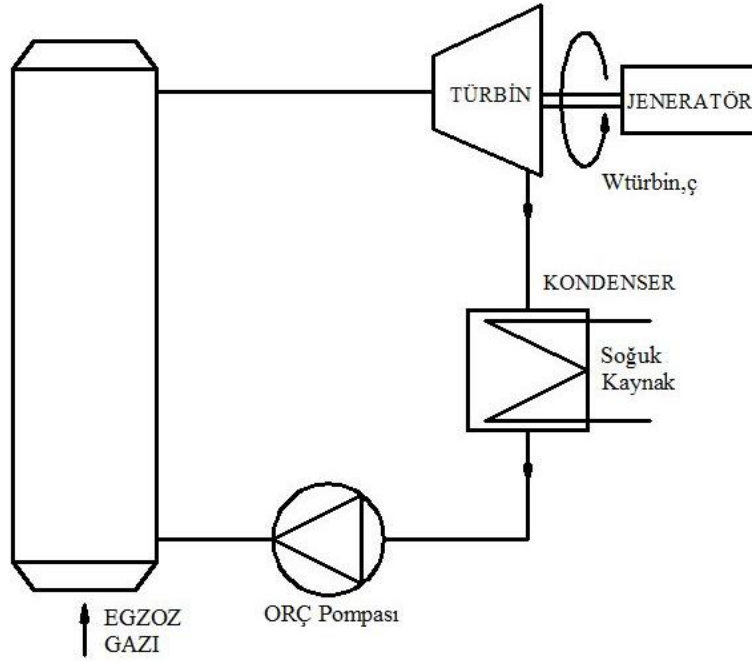
Atık ısı yanma veya benzeri bir kimyasal tepkime sonucunda ortaya çıkan egzoz gazındaki sıcaklıktır. Atık ısının geri kazanılması için günümüzde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleridir. Yanma işlemi sonucunda ortaya çıkan egzoz gazının yeterli sıcaklık ve debide olması sonucunda, egzoz gazındaki enerji ORÇ sisteminde kullanılan organik akışkana aktarılarak bu sistemler kurulabilir. Egzoz gazlarının ORÇ sistemlerinde kullanılması boşa giden büyük bir enerji kaynağının değerlendirilmesini sağlarken aynı zamanda, bu gazların meydana getirdiği çevresel problemlerinde azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Atık ısının kullanılmasında, ısı değiştiricilerin seçilmesi çok önemlidir. Mevcut kaynaktaki enerji, iki farklı yolla değerlendirilebilir. Bunlardan birincisi, egzoz ısının ilk önce bir termal yağa aktarılarak, ardından yağdaki enerjinin ısı değiştiricisi aracılığıyla organik akışkana iletilmesi ile gerçekleşir. Şekil 6.'da bu sistem görülmektedir.



Şekil 6. Termal yağ kullanılan atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri.

Atık ısının değerlendirilmesinde kullanılan ikinci yöntem ise, egzoz ısısının doğrudan bir ısı değiştiricisine gönderilmesi ile gerçekleşir. Organik akışkana aktarılan bu enerji ile çevrim için gerekli ısı enerjisi sağlanmış olur. Şekil 7.'de bu sistem görülmektedir.



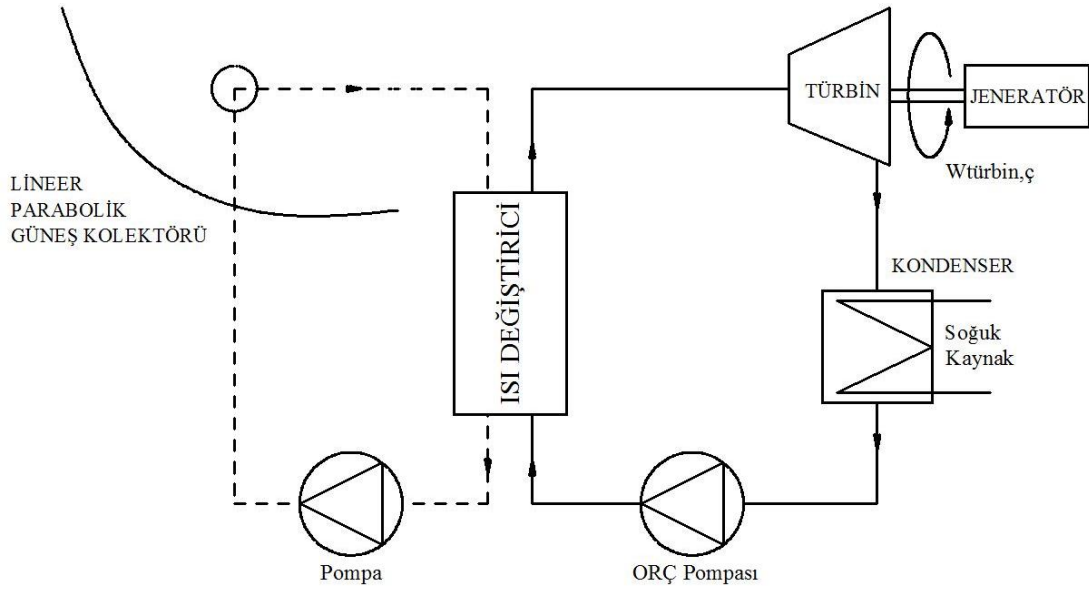
Şekil 7. Doğrudan ısı değiştiricili atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri.

Bu iki sistem karşılaştırıldığında doğrudan ısı değiştiricili sistemlerde, eşanjör boyutları daha büyük çıkmakta ve maliyet artmaktadır. Ayrıca organik akışkanın yanıcı bir akışkan olması durumunda, yangın tehlikesi ortaya çıkabilir.

B. Atık Isı Geri Kazanımlı ORÇ Sistemleri

Güneş enerjisi sınırsız ve tükenmeyen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca çevre dostu olan bu enerjinin kullanımı fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel etkilerden dolayı gün geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisi, endüstride birçok uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle sıcak su ihtiyacı, proses ısıtma, endüstriyel kurutma sistemleri ve fotovoltatik piller aracılığıyla elektrik üretimi güneş enerjisinin başlıca kullanım alanlarındandır.

Gelişen teknoloji sayesinde güneş enerjisi uygulamalarında yüksek sıcaklara çıkmak mümkün olmaktadır. Bu sıcaklık ile ORÇ sistemleri kurulup elektrik üretmek mümkün hale gelmiştir. Kaynak sıcaklık olarak bir güneş kolektöründen geçen akışkanın ısısını kullanan ORÇ sistemleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekilde güneş enerjili bir ORÇ sistemi görülmektedir.



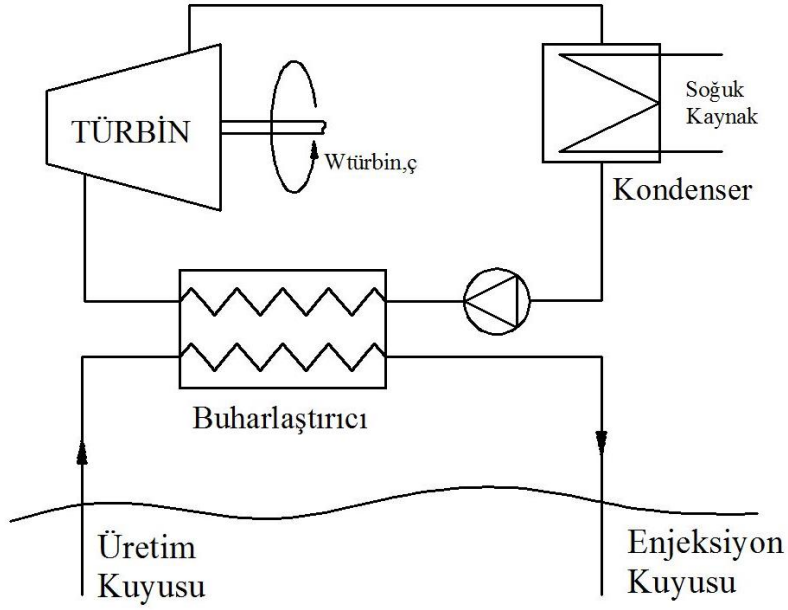
Şekil 8. Parabolik güneş kolektörlü ORÇ sistemleri [9].

Bu sistemlerde elektrik üretmek, fotovoltaik pillerden daha ucuza mal olmaktadır. Ayrıca kondenser suyu farklı uygulamalarda kullanılabilir. Fakat yeterli güneş ışınımının olmadığı zamanlarda, sistem çalışmayacağı için bu tarz sistemler genellikle başka bir enerji kaynağı ile entegre edilerek (hibrit) çalıştırılmaktadır (biyokütle, fosil yakıtlı kazan, atık ısılar vb.).

C. Jeotermal ORÇ Santralleri

Yeryüzünde derinlere gidildikçe sıcaklık artmaktadır. Bu yer altı enerji dünyanın merkezine tarafından emilir. Jeotermal enerji olarak adlandırılan bu enerji ısıtma proseslerinde ve/veya elektrik üretiminde kullanılır. Yeryüzünün toplam enerjisi yaklaşık olarak 4×10^{13} W'dır. Buda dünyanın toplam enerji tüketiminden 4 kat daha fazladır [10]. Dünya yüzeyine yakın yerlerde ortalama jeotermal gradyan yaklaşık olarak 300K/km'dir fakat bu değer her yerde eşit değildir. Jeotermal uygulamalar için bazı yerlerde diğer yerlere göre daha sağlıklı olabilir.

Jeotermal ORÇ sistemlerinde yerin derinliklerinden elde edilen sıcak su veya buhar, ikili çevrimler aracılığıyla elektrığe dönüştürülür. Şekil 9'de ikili çevrimin basit bir yapısı görülmektedir.

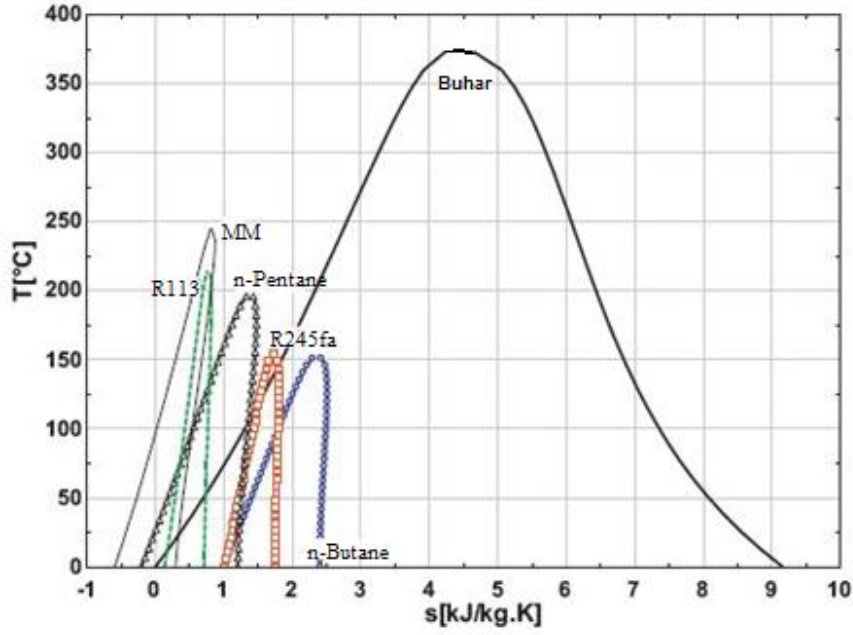


Şekil 9. Jeotermal ORÇ sistemi ile çalışan (ikili) elektrik santrali.

İkili çevrimlerde, üretim kuyusundan gelen jeotermal akışkan, buharlaştırıcı olarak kullanılan ısı değiştiricisine girerek, enerjisini, daha düşük sıcaklıklarda buhar fazına geçebilen organik akışkana aktarır. Burada organik akışkanın olduğu çevrim ORÇ çevrimidir. Bu sisteme ikili çevrim denmesinin nedeni sistemin iki akışkan oluşmasından kaynaklanmaktadır. Jeotermal santrallerde ORÇ sistemi genellikle ikili (binary) çevrim olarak adlandırılır. Bu çevrim özellikle düşük sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan elektrik elde etmek için etkili bir yöntemdir.

VI. ORÇ SİSTEMLERİNDE AKIŞKAN SEÇİMİ

ORÇ sistemlerinin performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri de çalışma akışkanıdır. ORÇ sistemleri rankine çevrimi prensibine göre çalışan sistemlere göre daha düşük verim ve sıcaklıkla çalışır. Bu nedenle ORÇ sistemlerinde sudan daha düşük sıcaklıklarda buharlaşan organik akışkanlar kullanılır. Aşağıdaki şekilde bazı organik akışkanlar ile su buharına ait T-S diyagramları verilmiştir.



Şekil 10. Bazı akışkanlara ait T-S diyagramı [9].

Bu şekilde görüldüğü üzere ORÇ sistemleri, su buharı kullanan sistemlere göre daha düşük sıcaklıkta çalışmaktadır. ORÇ sistemlerinde iyi bir akışkana sahip olmak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [11-17]. Bu çalışmalara göre iyi bir çalışma akışkanının aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir.

- 1 Sıfır veya pozitif eğimli doyma eğrisi (ds/dt)
- 2 Buharlaşma gizli ısısı
- 3 Yüksek yoğunluk (sıvı/buhar fazı)
- 4 Yüksek özgül ısı
- 5 Uygun kritik parametreler (sıcaklık, basınç)
- 6 Kabul edilebilir yoğuşma ve buharlaşma basıncı (>1 bar ve <25 bar)
- 7 İyi ısı transfer özellikleri (düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik)
- 8 İyi termal ve kimyasal kararlılık (yüksek sıcaklıklarda stabil olması)
- 9 Malzemeler ile uyumlu olması (çürütücü değildir).
- 10 Yüksek termodinamik performans (yüksek enerjetik/ ekserjetik verim)
- 11 Güvenlik karakteristiğinin iyi olması (zehirsiz ve yanıcı olmaması)
- 12 Düşük çevre etkisi (düşük ODP, GWP)

V. BULGULAR ve TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada, ORÇ sistemleri ve uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenmiştir. ORÇ sistemleri hakkında yapılan akademik ve ticari çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu sistemler alternatif enerjinin popüler olduğu bu günlerde çalışılması ve geliştirilmesi gereken konular arasındadır. Ülkemiz, enerji açısında dışa bağımlı bir ülke olduğu için bu sistemlerin kurulması bu bağımlılığı azaltacak ve günümüzün diğer büyük problemi olan çevre kirliliğinin de önüne geçecektir. Günümüzde birçok sanayi tesisi atık ısılarını atmosfere atarak büyük bir enerji kaynağını değerlendirememekte ve aynı zamanda da çevreyi kirletmektedir. Atık ısı geri kazanımlı ORÇ sistemleri ülkemizde birçok sanayi tesisinde kurulup verim alınabilecek durumdadır. Ayrıca ülkemiz jeotermal enerjide, dünyada 7, Avrupa da ise 1. sıradadır. Fakat sadece yüksek sıcaklıklarda ki kaynaklar için büyük kapasitesi elektrik üretim santralleri kurulmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklardaki kaynaklar ise genellikle bölgesel ısıtma ve turizm amaçlı kullanılmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklar ORÇ sistemleri ile değerlendirilerek, ülkemize bir kazanç sağlanabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] C. Güngör, D. Kaya, E. Üresin *Mühendis ve Makina*, **575 (48)** (2007) 19-20.
- [2] F. Yılmaz, *Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta-Türkiye, (2013).
- [3] Y.A. Cengel, M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Fifth edition, McGraw-Hill, (2006).
- [4] Anonim, www.turboden.com (Erişim tarihi: 12th of Feb, 2016).
- [5] Anonim, www.ormat.com (Erişim tarihi: 12th of Feb, 2016).
- [6] Anonim, www.termocycle.com (Erişim tarihi: 12th of Feb, 2016).
- [7] Anonim, www.infinityturbine.com (Erişim tarihi: 12th of Feb, 2016).
- [8] Anonim, www.clarke-energy.com (Erişim tarihi: 12th of Feb, 2016).
- [9] B.F. Tchanche, Gr. Lambrinos, A. Frangoudakis, G. Papadakis *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15** (2011) 3963–3979.
- [10] E. Barbier *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **6** (2002) 3-65.
- [11] A. I. Papadopoulos, M. Stijepovic, P. Linke, *Applied Thermal Engineering*, **30** (2010) 760-769.
- [12] O.Badr, S.D. Probert, P.W. O’Callaghan, *Applied Energy*, **21** (1985)1-42.
- [13] V. Maizza, A. Maizza *Applied Thermal Engineering*, **21** (2001) 381-390.
- [14] H. Chen, D.Y. Goswami, E.K. Stefanakos *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2010) 3059-3067.
- [15] B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis *Applied Thermal Engineering*, **29**(2009) 2468-2476.
- [16] E. Wali *Energy*, **5** (1980) 631-639.
- [17] T.C. Hung, T.Y. Shai, S.K. Wang *Energy*, **22**(1997) 661-667.