

Model Bir Çanak/Stirling Motor Tipi Güneş Santralin Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi

Design and Performance Evaluating of a Novel Solar Dish/Stirling Engine Power System

Halil İbrahim AYDINÖZ¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği
TEİAŞ Batı Akdeniz Yük Tevzi İşl. Müdürlüğü
halil.ibrahim.aydinoz@gmail.com

Özet

Bugün dünya çapındaki kaygular yenilenebilir enerjinin en iyi nasıl kullanımı ve gelişen teknoloji ile kirliliği azaltma konusundaki kaygılardır. Stirling motorlar enerji kullanımında en iyi örneklerdir. Stirling çanak tipi sistem güneş ışınımdaki termal enerjiyi mekanik enerjiye daha sonrada elektrik enerjisine çevirir. Bu işlemlerde fosil yakıt ile çalışan üretim merkezleriyle aynı yolu kullanır. Bu sistem yüksek verimli, modüler, otonom işletilen ve kendinden hibrit bir yapısı vardır. Gelecekte stirling motorların güneş pillerinin ve diğer güneşten elektrik üreten yapıların yerini alacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada 1 MW kurulu güce sahip çanak/stirling tipi santralin tasarımı ve performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile elektrik elde etme sistemi büyük kapasiteli elektrik üretim sistemlerine katkıda bulunabilir. Anahtar kelimeler: Stirling motor, ısı enerjisi, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, tasarım ve performans analizi

Abstract

Today worldwide concerns about the best way of utilization of the natural energy and developing technique to reduce pollution. Stirling engine is one of the best example of heat engine. Dish/engine systems convert the thermal energy in solar radiation to mechanical energy and then to electrical energy in much the same way that conventional power plants convert thermal energy from combustion of a fossil fuel to electricity. Dish/engine systems are characterized by high efficiency, modularity, autonomous operation, and an inherent hybrid capability (the ability to operate on either solar energy or a fossil fuel, or both). In the coming world solar dish Stirling engine replace the photovoltaic cells and other solar devices. In this study Stirling dish with 1 MW power plant type is made design and performance evaluating. This condensed to produce electricity with solar energy systems can contribute to these large-capacity power generation system. Keywords: Stirling engine, heat energy, concentrated solar energy, design and performance analysis

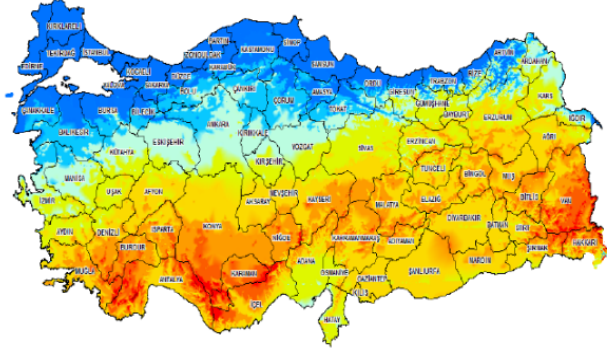
1. Giriş

Enerji tüketimi ülkelerin sosyal ve ekonomik gelişimini gösteren önemli bir unsurdur. Ülkelerin ekonomik gelişimi enerji tüketimi ile orantılı olarak değişim göstermektedir. Günümüzde insanoğlunun enerji ihtiyacının büyük çoğunluğu fosil kaynaklardan, hidrolik ve nükleer enerjiden sağlanmaktadır. Enerji kaynakları, üretildiği miktarlar göz önüne alınarak, birincil enerji kaynakları ve ikincil enerji kaynakları olarak iki grupta incelenebilir. Birincil enerji kaynaklarını fosil kaynaklar (kömür, petrol, vb.) ve nükleer enerji oluşturmaktadır. İkinci enerji kaynakları ise güneş enerjisi, jeotermal enerji, gel-git enerjisi, dalga enerjisi, rüzgâr enerjisi, füzyon enerjisi vb. enerji kaynaklarından oluşturmaktadır [1-2].

Güneş, rüzgâr, jeotermal, biokütle, katı atık ve gelgit enerjileri yenilenebilir enerji kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu enerji kaynakları arasında güneş enerjisi en önemli potansiyele sahiptir[3]. Yeryüzünden yaklaşık olarak 151.106 milyon km uzaklıktaki güneşin içerisinde sürekli olarak hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmekte ve oluşan kütle farkı ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Ancak bu enerjinin çok küçük bir kısmı yeryüzüne ulaşmaktadır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı değeri yaklaşık 1000 W/m² olarak kabul edilmektedir[4].

Türkiye 36° ve 42° enlemleri arasında kuzey yarımkürede yer aldığı için güneş enerji potansiyeli oldukça yüksektir[5]. Türkiye'nin yıllık güneş enerji potansiyeli 1,3 milyar ton petrole eşittir [6]. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, ortalama toplam ışıma şiddeti günlük toplam 3,6 kWh/m²-gün olduğu tespit edilmiştir[7-9]. Şekil 1' de Türkiye'nin yıllık güneş radyasyonu atlası görülmektedir [10]. Şekilde görüldüğü gibi özellikle Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz bölgeleri güneş enerjisi uygulamaları için oldukça elverişlidir.

Güneş enerjisinden elektrik üretiminde parabolik tip güneş enerjisi toplayıcıları, güneş enerji kule sistemleri, ayna-ısı makinesi sistemleri, güneş bacaları ve fotovoltaiik sistemler kullanılmaktadır.



Şekil 1. Türkiye'nin yıllık toplam güneş radyasyon atlası [10].

Parabolik oluklu toplayıcı sistemlerinde güneş radyasyonu bir ısı transfer akışkanını ısıtmak için bir cam tüp içerisinde yer alan bir metalik tüp üzerine odaklanır. Bir ısı değiştirici içerisinde ısıtılmış akışkanın dolaşmasıyla, kızgın buhar üretilir. Kızgın buhar kullanılarak türbin-jeneratör sisteminde elektrik üretilir[11-12].

Güneş enerji kule sistemi, bir kule, kulenin üzerine yerleştirilmiş bir alıcı, kulenin etrafına yerleştirilen heliostatlar, bir buhar jeneratörü ve bir buhar türbininden oluşmaktadır. Heliostatlar güneş ışınlarını güneş enerji kulesi üzerindeki alıcıya odaklamakta ve elde edilen termal enerji bir çalışma maddesi kullanılarak türbin jeneratör sistemine aktarılmaktadır[11-12].

Ayna-ısı makinesi sisteminde güneş enerjisi bir alıcı üzerine odaklanır. Alıcı güneş radyasyonunu ısıya dönüştürür ve ısı bir ısı motorunun çalışma maddesine direkt olarak transfer edilebilir ya da alıcı bir çalışma maddesine ısıyı aktararak buhar türbini-elektrik jeneratörüne iletir. Parabolik ayna-ısı makinesi sisteminde Stirling ya da Brayton çevrimi ile çalışan ısı makineleri kullanılmaktadır[13]. Bu ısı makineleri arasında Stirling motoru en yaygın olanıdır[14].

Fotovoltaik piller, yüzeylerine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Güneş pillerinin yüzey alanları 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Fotovoltaik pillerin yüzeylerine ışık düştüğünde elektrik gerilimi oluştururlar[15].

Güneş bacalarının temel bileşenlerini sistemin ortasına yerleştirilen kule (baca), kule etrafına yerleştirilen altında havanın güneş radyasyonu ile ısıtılmasını sağlayan cam toplayıcı ve ısınan havanın kinetik enerjisinden elektrik üreten rüzgâr türbininden oluşmaktadır [16].

Parabolik oluklu toplayıcı, güneş enerji kuleleri ve parabolik ayna-ısı makinesi sistemlerinin verimleri sırası ile %21, %23 ve %29'dir[17]. Fotovoltaik hücrelerin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüşüm verimi %5-20 arasında değişmektedir. Bu sistemler arasında parabolik ayna/ısı-motoru sistemi ön plana çıkmaktadır[18].

Bu çalışmada çanak/stirling motor gücü sistemiyle kurulacak olan 1 MW gücündeki güneş enerjisi santralinin maliyet analizi yapılmış olup, ayrıca İzmir iklim koşullarında sistem performans değerlendirmesi yapılmıştır.

2. Stirling Motor Güç Sistemleri

Stirling motoru, *sıcak hava motoru* olarak da bilinir. Dıştan yanmalı motorlu bir ısı makinesi tipidir. Isı değişimi prosesi, ısının mekanik harekete dönüşümünün ideal verime yakın olmasına izin verir. (Carnot çevriminin pratik olarak uygulanması ile)

1816 yılında İskoç rahip Reverent Robert Stirling tarafından icat edilmiştir. Motoru geliştirme işini daha sonra mühendis olan kardeşi James Stirling devam ettirmiştir. Mucitler, zamanın buhar makinelerine güvenilir bir alternatif oluşturmayı öngörmüştür. Buhar makinelerinin kazanları sık sık yetersiz malzeme kullanımı ve buharın yüksek basıncı nedeniyle patlıyordu. Stirling motorları sıcaklık farkını doğrudan harekete dönüştüren bir sistemdir. Bu motor bir taş ocağından su pompalamak için kullanılmıştır [19-23].

19. yüzyılda içten yanmalı motorların icadı ile Stirling motorları üzerine yapılan çalışmalar kesintiye uğramıştır. Stirling motorlarının ticari olarak kullanımı Birinci Dünya Savaşı'na kadar oldukça azalırken, su pompalamak ve vantilatör fanlarına hareket vermek gibi bazı özel amaçlar için küçük boyutlarda kullanılmıştır [22].

20. Yüzyılın başlarından itibaren petrolün kullanımında ve İçten Yanmalı Motorlarda (İYM) meydana gelen büyük gelişmeler bir ölçüde Stirling motorunun gelişimini olumsuz etkilemiş ve Stirling motorları İYM ile rekabet edememişlerdir. 20. Yüzyılın son yarısında meydana gelen petrol krizleri ve petrole 30-60 yıl ömür biçilmesi İYM'in yerine ikame edilebilecek yeni makineler üzerinde araştırmaları gündeme getirmiş ve Stirling motorları ile ilgili önemli gelişmeler 1960 yılından sonra kaydedilmiştir. 1973 yılındaki petrol ambargosu güneş enerjisi teknolojilerinin gelişiminde çok büyük etken olmuştur. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için tasarlanan Çanak/Stirling sistemleri 1980'li yıllarda ticari üretim için geliştirmeye başlanmıştır. Tam kapalı tip Stirling motorlarının yapılması ile motorda farklı çalışma gazları kullanma imkanı ortaya çıkmış ve aynı zamanda motor yüksek basınçlarda çalışma gazı ile doldurularak daha küçük hacimli motorlardan daha yüksek güç elde etme imkanı ortaya çıkmıştır. Özellikle Helyum ve Hidrojen gibi ısı depolama kapasiteleri havaya göre çok yüksek olan gazların kullanımıyla Stirling motoru güç çıkışında önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bugün dünyanın birçok ülkesinde araştırma kurumları ve çeşitli şirketler tarafından Stirling motorları ile ilgili çalışmalar büyük bir hızla sürdürülmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinde NASA başta olmak üzere, General motor, Ford motor, Cummins motor ve birçok üniversite tarafından araştırmalar sürdürülmekte ve bu araştırmalara önemli kaynak ayrılmaktadır. Yine dünyanın önde gelen kurumlarından MAN (Almanya), Philips (Hollanda), United Stirling (İngiltere) ve birçok firma bu çalışmalarını devam ettirmektedir[22].

Modern Çanak/Stirling sistemlerin ilk uygulanması 1984 yılında Advanco şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir[24]. Advanco şirketinin geliştirdiği toplayıcı ile otomotiv uygulamaları için geliştirilen United Stirling 4-95 Mark II Stirling motoru kullanıldığı bu sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.

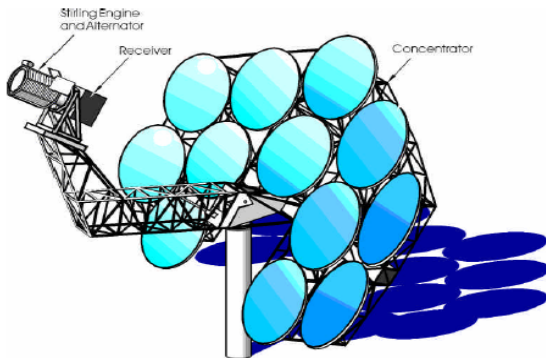


Şekil 2. Adavonco/Vanguard 25kWe Çanak/Stirling Sistemi[24]

Bu sistem %29,4 verimle 25 kWe güç üretebilmektedir. Bu sistem Sanda National Laboratuvarı'nda üretilen %31,25 verimli *solar-to-grid* modeline kadar en verimli güneş sistemidir. Ancak yüksek maliyeti nedeniyle sadece bir adet üretilmiş ve test amaçlı kullanılmıştır[25].

2.1. Çanak/Stirling Güç Sistemi Bileşenleri

Stirling motorlarında, çalışma gazının ısıtılması için kullanılacak enerji kaynağının türü çok çeşitli olabilir. Çalışma gazının sıcaklığını sıcak kaynak sıcaklığına yükseltmek için herhangi bir yakıt yada enerji türü kullanılabilir. Örneğin odun, kömür gibi katı yakacaklar kullanılabileceği gibi petrol ürünleri veya diğer sıvı yakıtlar ve gaz yakıtlar (L.P.G., Doğal gaz) çalışma gazının ısıtılmasında kullanılabilir. Stirling motorlarında kullanılması planlanan ve kolektör sisteminin kurulması dışında enerji maliyeti için hiç bir masraf gerektirmeyen diğer bir enerji türü de güneş enerjisidir. Güneşten gelen direk güneş ışınları bir toplayıcı ile Stirling motorunun ısıtıcısına odaklanarak ısıtıcıdan geçen çalışma gazının ısıtılması sağlanır. William Beale tarafından serbest pistonlu Stirling motorunun yapılması ile özellikle güneş enerjisi uygulamalarında önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Güneş enerjisi toplayıcı tarafından toplanarak Stirling motoru ısıtıcısına verilir. Burada ısı enerjisi doğrudan Stirling motoru ısıtıcısına aktarılabileceği gibi güneş ışınları bir kaynama hücresine odaklanarak buradaki bir sıvı metal ile (genellikle potasyum yada sodyum) ısı enerjisi ısıtıcı borularına aktarılabilir[22,26].



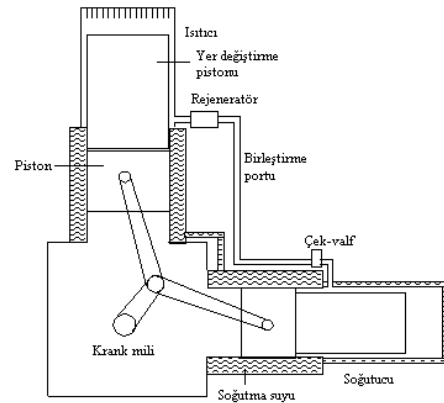
Şekil 3. Çanak/Stirling motor şematik gösterimi[28]

Stirling programı çerçevesinde Stirling motoru için tasarlanan ve yapılan tam parabolik toplayıcı düzlem parça aynalardan oluşmuş ve güneş enerjisini çizgisel olarak ısıtıcı üzerine odaklamaktadır. Toplayıcı gövdesi fiberden yapılmış olup, gövdeyi kuvvetlendirmek amacıyla içerisine demir çubuktan yapılmış kafes yerleştirilmiştir. Yapılan araştırmada bu çaplı bir ayna yapma imkanı bulunmadığından güneş ışınlarının toplanması için düzlem parça aynalar kullanılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi dört kademeli bir küreden oluşmaktadır. Bu küre alt kısmından kesilmiş ve motorun ısıtıcısı buradan kolektörün içerisine yerleştirilmiştir. Toplayıcının çapı 1.6 metre olup toplam alıcı yüzeyi 2 m² civarındadır. Yaz aylarında güneşin etkili olduğu saatlerde birim alana düşen güneş enerjisi miktarı 750 Watt/m² civarında olup, ayna verimi de %95 olarak belirlenmiş ve toplayıcının sağladığı enerji miktarı da 1,4 kW civarındadır. Güneş ışınlarının Stirling motoru ısıtıcısına odaklanmasından kısa bir süre sonra ısıtıcı yüzey sıcaklığı 750 °C civarına ulaşmaktadır[22].

2.1.1. Stirling Motor ve Çevrimi

Bir çanak /stirling motor sisteminde, motor bir türbin içinden ya da piston ile genişleterek soğukken, bir çalışma akışkanının sıkıştırılması, sonra sıkıştırılmış çalışma akışkanının ısıtılması şeklinde çalışır. Bu motorlar diğer konvansiyonel motorlar gibi ısı enerjisini iş üretmek için. İş üretmek için mekanik güce çevirir. Mekaniksel güç elektrik jeneratörleri tarafından elektriksel güce çevrilir[32].

Çanak/Stirling motor sistemleri için bir dize termodinamik çevrimler ve sistemde kullanılan sıvılar kullanılabilir. Bu çevrimler Rankine çevrimi Brayton açık ve kapalı çevrim, ve Stirling çevrimleridir. Kullanılan sıvılar ise su veya organik akışkanlardır. Bu ısı makineleri arasında Stirling çevrimi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemde güneş ışınları tek ya da iki eksenli parabolik aynalar kullanılarak bir alıcı üzerine yansıtılmaktadır. Alıcı ısıyı absorbe ederek, ısı makinesinin çalışma maddesine aktarır. Çalışma maddesi olarak hidrojen ya da helyum gazları kullanılmaktadır[30-32]. Şekil 4'de Stirling motor sistemi görülmektedir.

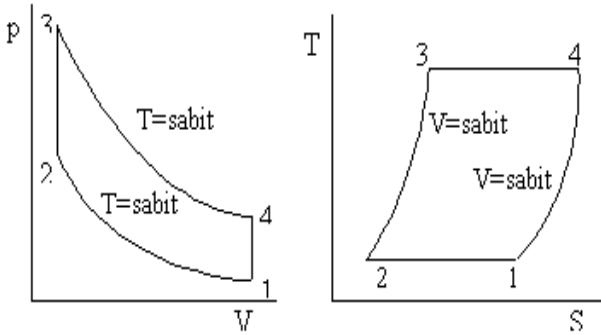


Şekil 4. Prototip Stirling motorunun şematik görünümü[27].

Stirling çevrim de motorlar dıştan helyum veya hidrojen gazını ısıtılmasını tarafından ısıtılarak yüksek sıcaklık ve yüksek basınç elde edilir. Yüksek performanslı stirling motorlarda çalışma sıcaklığı 700 °C ve aynı şekilde basınç değeri 20 MPa değere ulaşır. Stirling çevrimi olarak, çalışma gazı dönüşümlü ısıtılır ve sabit sıcaklık ve sabit

hacim işlemleri ile soğutulur. Stirling motorlarında çevrimde genellikle sabit hacimli soğutma sırasında verimlilik artırıcı re-jeneratörü dahil ısı yakalar ve gaz sabit hacimde ısı değişmesi olur[30-32].

Stirling çevrimi iki sabit hacim ve iki sabit sıcaklık işleminden meydana gelmektedir. Bu çevrime göre çalışan makinelerde 1-2 işlemi sabit sıcaklıkta sıkıştırma işlemidir. Bu işlemin sabit sıcaklıkta gerçekleşebilmesi için çalışma gazından ısı çekilmesi gerekmektedir. 2-3 işleminde harici bir kaynaktan çalışma gazına ısı verilmesi gerekmektedir. 3-4 işleminde sabit sıcaklıkta genişleme işlemidir, çalışma gazı pistona iş yaptırır. Genişleme işleminin sabit sıcaklıkta gerçekleşebilmesi için çalışma gazına ısı verilmesi gerekir. Çevrimde 4-1 işlemi son işlemidir. Bu işlem sırasında çalışma gazından dışarıya sabit hacimde ısı atılması gerekmektedir. Stirling motorlarında 4-1 sabit hacimde durum değişimi işlemi boyunca dışarıya atılan ısı bir re-jeneratörde depo edilerek 2-3 sabit hacimde durum değişimi işlemi boyunca aynen çalışma gazına geri verilir. Böylece çalışma gazına dışarıdan ısı verme işlemi yalnızca 3-4 sabit sıcaklıkta genişleme işleminde ve çalışma gazından ısı alınması işlemi de 1-2 sabit sıcaklıkta sıkıştırma işlemi boyunca yapılmaktadır. Şekil 5'de Stirling çevrimine ait p-V ve T-S diyagramları görülmektedir[27].



Şekil 5. Stirling çevrimine ait p-V ve T-S diyagramları[27].

Stirling motoru dıştan ısı vermeli bir motordur, içten yanmalı motorlara ve diğer ısı motorlarına kıyasla bir çok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Stirling motorları diğer motorlara kıyasla en büyük termik verime sahiptir ve uzun dönemde veriminin % 50 yâda daha fazla olacağı tahmin edilmektedir.
- Stirling motoru her türlü yakıtı kullanabilir, bu yakıt gaz, sıvı yâda katı, fosil, fosil olmayan veya biokütle yâda güneş radyasyonu olabilir.
- Az bakım gerektirir, çünkü valf, buji ile ateşleme, dizel enjeksiyon sistemi yoktur ve silindirler kuru yağlanır.
- Fosil kökenli yakıtlarla çalıştırıldığında dışarıya yanmadan dolayı emisyonlar düşüktür, NOx, CO ve yanmamış hidrokarbon emisyonları düşüktür.
- İçten yanmalı motorlara nazaran titreşimleri daha azdır, düzgün moment değişimine sahiptir, titreşimlere neden olan periyodik moment değişimi azdır.
- Gürültü azdır, içten yanmalı motorlarda silindir içerisinde çok yüksek basınç ve şoklardan meydana gelen gürültüler Stirling motorunda dıştan ısı sürülmesi ile önlenmektedir.

- İçten yanmalı motorlara oranla maliyeti daha ucuzdur. Yardımcı sistemler azdır, kam mili, supap, yağ filtresi ve pompası, hava filtresi gibi parçalar yoktur. Bu yüzden imalatı çabuk, kolay ve ucuzdur[21,22,26,27].

Stirling motorları bazı dezavantajlarda sahiptir. Bunlar:

- Tüm devrelerin büyük termik ataletlerine bağlı olarak düşük hızlanma ivmesi
- Bir çok kısımlarının tasarımının deneysel bilgi gerektirmesi,
- İçten yanmalı motorlara oranla daha büyük kütle ve oranlar,
- Çalışma ve krank boşlukları arasında güvenli yalıtım güçlüğü,

olarak gösterilebilir[21,22,26,27].

3. 1 MW Gücünde Örnek Santral'in Performans ve Maliyet Analizi İncelemesi

Enerji santrallerinde maliyet unsurlarının değerlendirilmesinde, genellikle santralin ilk yatırım maliyeti ve birim enerji üretim maliyeti dikkate alınmaktadır. Santralin birim enerji üretim maliyeti, santralin kullanım ömrü boyunca yapılan bütün harcamaları (ilk yatırım maliyeti, işletme/bakım maliyetleri) kapsayan, santralden birim enerji elde edilmesi için gerekli olan maliyeti ifade eden ekonomik bir değerlendirme kriteridir. Enerji santrallerinde elektrik enerjisi üretimine etki eden faktörler, santralin ilk yatırım maliyeti ve işletme/bakım maliyetidir[29].

İlk yatırım maliyeti, santralin işletmeye başlamadan önce enerji üretimine hazır hale getirilmesi amacıyla, makina-teçhizat, bina, arazi vb. temel elemanlar için yapılan harcamalardır. Enerji santral maliyetlerinin en büyük kısmı ilk yatırım maliyetleridir[29].

İşletme/bakım maliyetleri ise santral kurulumu sonrası santralden enerji üretmek için yapılması gereken harcamalardır. İşletme maliyetleri, sabit işletme maliyeti ve değişken işletme maliyeti olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sabit işletme maliyeti çalışanların maaşları ve primler, santral genel ve idari harcamaları, santral destek ekipmanları, planlanmış bakımlar gibi maliyetlerdir. Değişken işletme maliyetleri ise santralde kullanılan yakıtlar, enerji, su, kimyasallar, katalizörler, gazlar, yağlayıcılar, tükenebilir malzeme ve kaynaklar ile atıkların neden olduğu maliyetlerdir. Kömür ve doğalgaz yakıtlı termik santral, nükleer santral, hidroelektrik santral, rüzgâr enerji santralleri (kara ve deniz üstü), güneş enerji santrali, jeotermal enerji santrali ve biyokütle enerji santrali için \$/kW cinsinden ilk yatırım maliyetleri, \$/kW-yıl cinsinden sabit işletme maliyetleri ile \$/MWh cinsinden hesaplanır. İlk yatırım maliyeti bir birim güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet, sabit işletme maliyeti bir yılda santralden birim güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet ve değişken işletme maliyeti bir birim enerji elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet olarak değerlendirilmiştir.

Mevcut güç sistemlerinin iyileşmesinde ve yeni yapılacakların tasarımında enerjinin yalnızca dönüşümü değil kullanılabilirliğinde de araştırılması gerekir. Bir sistemin performans analizinde literatür oldukça fazla çalışma

mevcuttur. Bu çalışmada sadece güç sisteminin kapasite faktörü, güneşin üretimdeki miktarı ve her modülün yıllık MWh cinsinden değerleri verilmiştir.

Performans parametreleri, ilk yatırım ve işletme maliyetleri Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda, ilk yatırım maliyeti bir birim

güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet, sabit işletme maliyeti bir yılda santralden birim güç elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet ve değişken işletme maliyeti bir birim enerji elde edilmesi için ödenmesi gereken maliyet olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Çanak/Striling motor güç sistemi performans ve maliyet değerleri

SANTRAL PARAMETRELERİ	BİRİMLER	Tip 1 (Ticari Motor)	Tip 2 (Isı Borusu Alıcısı)
Performans			
Kapasite Faktörü	%	50	50
Güneş Fraksiyonu	%	50	50
Çanak/Motor Gücü	kW	25	27,5
Çanak/Motor Modül Yıllık Enerji	MWh/yr/dish	109,6	120,6
Santral Bileşen Fiyatları			
Yoğunlaştırıcı		1.550	500
Alıcı		80	90
Hibrit sistem		400	325
Motor		260	100
Genaratör		45	40
Soğutma Sistemi		40	30
Elektriksel Sistemler		35	25
Yardımcı Bileşenler	\$/kW	300	250
Genel Faaliyet Giderleri		150	125
Mühendislik Ücreti		286	149
Devreye Alma		35	20
Stok Değerleri		12	4
Kimyasal Ürün Stok		12	6
Alan, @\$16250/ha		26	26
Toplam Sermaye		3.231	1.690
Operasyon ve Bakım Maliyetleri			
İşçilik		1,20	0,60
Materyal	¢/kWh	1,10	0,50
Toplam		2,30	1,10

Tablo 1’den alınan değerlere göre performans değerlendirmesinin de Tip 1 ve Tip 2 sistemleri kapasite faktörü güneşin sistemdeki kısmı oranında eşit %50 değerinde kullanılan modüllerin güçleri ise sırasıyla 25 ve 27,5 kW değerlerinde olmaktadır. Buna göre de bir modülün yıllık üretimi Tip 1 için 109,6 MWh Tip 2 için 120,6 MWh değerindedir.

Bu çalışmada örnek olarak yapılması planlanan 1 MW gücündeki santralin Tip 1 için 40 Tip 2 için 36 modüle ihtiyaç vardır. Bunların maliyetleri Tablo 1’den alınan değere göre sırasıyla 3,2 milyon \$ ve 1,7 milyon \$ değerindedir. Bununla birlikte Tip 1’in 40 modülünde 4.384 MWh Tip 2’in 36 modülünde 4.341 MWh yıllık elektrik enerjisi üretilecektir.

Elektriğin günümüz için son satış fiyatı olan 40 Kr (0,4 TL) civarındadır bunu dolar kuruna çevirdiğimizde 1 kWh elektrik 0,15\$ değerindedir. Bu iki santralin ürettiği elektrik enerjisi kazanç değeri Tip 1 için 657.600 \$ Tip 2 için 651.150 \$ değerindedir. Bu mali kazanç değerlerinden her bir kWh başına operasyon ve bakım değerlerini çıkardığımızda her iki tip santral için net kazanç değerleri sırasıyla; 556.768\$ ve 603.696 \$ yıllık kazanç değerleri vardır. Elde edilen bu değerlerde santrallerin birim kWh başına elde edilen gelir değeri Tip 1 için 0,127 \$/kWh Tip 2 için 0,139 \$ olmuştur.

4. Sonuç

Bugün gelinen noktada, özellikle petrol ve kömüre dayalı birincil enerji kaynaklarının tüketimi, dünyanın doğal kaynaklarının üçte birini, ormanların yüzde 12’sini, okyanuslardaki biyolojik çeşitliliğin üçte birini; tatlı sularının ise yüzde 50’sini yok etmiştir. Söz konusu enerji kaynaklarının bir diğer dezavantajı, yenilenemez olmalarıdır.

Gerek yenilenebilir enerji piyasalarının günümüz itibarıyla sahne olduğu gelişmeler, gerekse bu alana yapılmakta olan yatırımlar göstermiştir ki, yenilenebilir enerjilere olan ilgi önümüzdeki yıllarda da artarak sürecektir.

Özellikle dünya enerji istatistikleri üzerinde yapmış olduğumuz analizler göstermiştir ki, yenilenebilir enerji piyasaları hem sürdürülebilir kalkınma açısından hem de iklim değişikliği ve küresel ısınmanın önlenmesi açısından, neredeyse tek alternatif durumuna gelmektedir. Dünyadaki enerjilerin orijini güneş enerjisi olup, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu enerjisini güneşten doğrudan veya dolaylı olarak almakta ve dolayısıyla bu kaynaklar sürekli olarak yenilenirler.

Birçok yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi ile elektrik üretiminde başlıca iki sistem kullanılmıştır. Birincisi,

güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemlerdir. Fakat geçen 20 yıl içerisinde fotovoltaik sistem uygulamalarının artışına rağmen, teknolojinin karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek oluşu, geniş çapta elektrik üretimi için yetersiz olduğunu ortaya çıkarmıştır. İkinci seçenek ise, güneş enerjisinin yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak odaklanması sonucunda elde edilen kızgın buhardan, bilinen yöntemlerle elektrik üretimidir.

Bu çalışmada ikinci seçenek olan güneş enerjisinin ısısını kullanan sistem olan çanak/stirling motor güç sisteminin inceleme amaçlı iki tipi için performans ve maliyet değerlendirmesi yapılmıştır. Bu sistemler %32 verimle güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi yapan diğer santrallerden en az 2 kat daha verimlidir. Yapılan analizlerde Tip 2 'in Tip 1'e göre mali analizde daha üstün olduğu performans değerlendirmesinde yalnız modül gücünde %10 artış göstermiştir. Her iki sistemde 1 MW kurulu güç için amorti süreleri Tip 1 için 6 yıl Tip 2 için 2,8 yıldır. Bu durum, her iki sistem içinde amorti süreleri bakımından kabul edilebilir. Amorti sürelerinin pozitif etkisinin yanında bu sistemlerin diğer bir pozitif yönü fotovoltaik güç sistemlerinin kapladığı alana oranla 12,5 kat daha küçük bir alana sahiptir. Bu değerlerde çanak/stirling motor güç sistemi için 1,6 ha/MW olmaktadır. Avantajların en büyük dezavantajı sisteminin bileşenlerinin diğer üretim teknolojilere deki bileşenlere daha pahalı olmasıdır. Bunun sonucu olarak günümüzde kullanım yaygınlığı istenilen seviyede değildir.

Bu çalışmada performans ve maliyet analizi yapılan çanak/stirling motor güç sistemi önümüzdeki 10 yılda elektrik enerji üretiminde istenen performans ve mali değerleri yakalayacak ve piyasadaki mevcut oranını arttıracaktır. Günümüz satış oranları yıllık olarak Tip 1 için 2.000 adet Tip 2 için 30.000 adet modül değerlerindedir. Bu satış değerleri mevcut elektrik güç sisteminde payı şuan için çok az olsa da ekipmanların (yoğunlaştırıcı, motor..) fiyatların düşmesiyle bu satış oranları artacaktır.

Şu ana kadar yapılan operasyonel ve test deneyimleri göz önüne alındığında güneş bileşenleri ve ara ekipman bileşenlerin güvenilirliği ve dayanıklılığını pozitif yönde olduğunu gösterdi. Bunun yanı sıra günümüzde çanak/motor teknolojinin maliyet ve performans analizlerinin ticarileşme konusunu düşünen girişimciler açısından cazip hale geldiği söylenebilir. Girişimciler megavatlık tesislerle ilgili riskler olmadan daha küçük protip şeklindeki sistemleri değerlendirebilir ve bu sistemleri içeren tesisler kurabilirler. Bu çalışmada bu teknoloji ile güneş enerjisinden elektrik enerji üretimini amaçlayan yatırımcılar için kaynak olacaktır.

5. Kaynaklar

- [1] Okyay, Y., Kütahya koşullarında fotovoltaik sistemin deneysel incelenmesi ve ekonomik analizi]], Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-18 (2006).
- [2] Akkaya, S., Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi ve bir rüzgâr enerjisi uygulaması]], Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-8 (2007).
- [3] Zan, B., Bir fotovoltaik sistemden optimal gücün sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 11-14 (2006).

- [4] Özkılıç Keleş, C., Türkiye'de binalarda enerji verimliliği açısından fotovoltaik sistemlerin kullanılmasına yönelik bir inceleme, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-40 (2008).
- [5] Saylan, L., Şen, O., Toros, H., Arısoy, A., —Solar energy potential for heating and cooling systems in big cities of Turkey, *Energy Conversion and Management*, 43 (14): 1829–1837 (2002).
- [6] Oğulata, R. T., Potential of Renewable Energies in Turkey, *J. Energy Engrg.*, 133 (1): 63-68 (2007).
- [7] Balat, H., Contribution of green energy sources to electrical power production of Turkey: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (6): 1652–1666 (2008).
- [8] Evrendilek, F., Ertekin, C., Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey, *Renewable Energy*, 28 (15): 2303–2315 (2003).
- [9] Akpınar, A., Kömürçü, M. I., Kankal, M., Özölçer, İ. H., Kaygusuz, K., Energy situation and renewables in Turkey and environmental effects of energy use, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (8): 2013–2039 (2008).
- [10] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası <http://repa.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (2015).
- [11] Minassians, A. D., Stirling engines for low-temperature solar-thermal- electric power generation, Ph.D. Dissertation, *California University Electrical Engineering and Computer Sciences*, Berkeley, 1-20 (2007).
- [12] Gasem Agha, R. K., Solar thermal electricity generation, Ph.D. Thesis, *University of Miami*, Florida, 1-15 (1993).
- [13] Farret, F. A., Godoy Simoes, M., Integration of Alternative Sources of Energy, *A John Wiley & Sons Inc. Publication*, 118-128 (2006).
- [14] Breeze, P., Power Generation Technologies, *Jordan Hill, Oxford*, 185-197 (2005).
- [15] Özgöçmen, A., Güneş pilleri kullanarak elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-10 (2007).
- [16] Metin, İ., Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan güneş kulesi içindeki doğal konveksiyonun sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-14 (2006).
- [17] Goswami, D. Y., Kreith, F., Energy Conversion, *CRC Press*, 19-45 (2008).
- [18] Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A., Yiakoumetti, K., Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, *Applied Thermal Engineering*, 27: 275–286 (2007).
- [19] Meijer, R. J., The philips stirling thermal engine, Thesis, *Technische Hogeschool Delft*, 99-103 (1960).
- [20] Finkelstein, T., Organ, A. J., Air Engines The History, Science, and Reality of the Perfect Engine, *ASME Press*, New York, 1-30 (2001).
- [21] Yücesu, H. S., Küçük güçlü güneş enerjili bir stirling motoru tasarımı, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 27-28 (1996).
- [22] Walker, G., Stirling Engines, *Clarendon Press*, Oxford, 47-71, 73-103, 107- 121, 124-156, 160-199, 203-233, 254-287 (1980).
- [23] Çınar, C., Gama tipi bir Stirling motorunun tasarımı imali ve performans analizi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-50 (2001).

- [24] EREN, <http://www.eren.doe.gov/>.
- [25] Tim McGee, Energy / Renewable Energy February 14, 2008
- [26] Özgören, Y. Ö., Stirling motorlarında ısı kayıplarının azaltılması için termal bariyer kullanımı, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-54 (2004).
- [27] Çetinkaya, S., Gaz Türbinleri, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 33-37, 45-46 (1999).
- [28] Diver, R.B., C.E. Andraka, J.B. Moreno, D.R. Adkins, and T.A. Moss, “*Trends in Dish-Stirling Solar Receiver Design*,” Proceedings of the IECEC, Reno, NV (1990).
- [29] Kaya, K., Koç, E. 2015. “*Enerji Üretim Santralleri Maliyet Analizi*,” *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 660, s. 61-68.
- [30] Stine, W.B. and R.P. Diver, *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM: 1994. Report SAND93-7026 UC-236
- [31] West, C.D., *Principles and Applications of Stirling Engines*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1986.
- [32] Walker, G., *Stirling Engines*, Clarendon Press, Oxford, England, 1980.