

A Review of Past-to-Present Literature for Stirling Engines

Mehmet Sait Cengiz (Corresponding author)
Department of Technical Vocational School, Bitlis Eren University,
Vocational School Campus Bitlis, Turkey, E-mail: msaitcengiz@gmail.com

Mehmet Salih Mamis
Department of Electrical and Electronics Engineering, İnönü University,
Faculty of Engineering İnönü Main Campus Malatya, Turkey

Abstract

Turkey is rank first among EU countries in total solar power potential; however, this potential cannot be adequately assessed and used. Although Spain could be more efficient production model for our country due to the similar climatic conditions, owing to cultural and economic relations with Germany, Turkey has preferred to produce electricity by the PV panels. But Turkey's real solar potential is heat-sourced and this corresponds to 80% of its entire solar potential. Therefore, Spain that has similar climate conditions to our country can be considered as a model for rational use of solar potential. Spain upgraded to 4th in all over the world in last decade in generating electricity from solar by using its heat-heat-sourced CSP solar potential. In this paper, besides making assessments for Turkey, a review of past-to-present literature is conducted for Stirling engines and it is considered that the survey results will serve as an important source related to Stirling engine in the preparation of article, paper and books.

Key Words: Stirling Engine, Thermal Energy, Dish/Stirling Systems

Geçmişten Günümüze Stirling Motorlar için Literatür Çalışması

Özet

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli açısından AB ülkeleri arasında ilk sırada olmasına rağmen bu potansiyeli yanlış kullanmakta ve bu potansiyelden yeteri kadar faydalanmamaktadır. Ülkemiz iklim koşullarına benzerlik gösteren İspanya örneği Türkiye için daha verimli bir üretim yöntemi olabileceken, gerek kültürel gerekse ekonomik ilişkiler nedeniyle Almanya'nın güneşten faydalanma yöntemi olan güneş ışınımından faydalanarak FV paneller aracılığıyla elektrik üretmeyi tercih etmekteyiz. Türkiye'nin asıl güneş potansiyeli ısı kaynaklıdır ve tüm güneş potansiyelimizin %80'ine tekabül etmektedir. Dolayısıyla ülkemiz ile benzer iklim koşullarına sahip olan İspanya güneş potansiyelimizi akılcı kullanmak için model olarak seçilebilir. İspanya son 10 yılda ısı kaynaklı CSP güneş potansiyelini kullanarak tüm dünyada güneşten elektrik üretimi açısından 4. sıraya yükselmiştir. Ülkemizde güneşten elektrik üretiminde Stirling motor sistemli üretim yöntemleri benimsenmelidir. Çünkü Sabit FV panelli sistemlerde sıcaklık dezavantaj olup verimi azaltırken, Stirling motorlar gibi ısı kaynaklı CSP sistemlerinde ise sıcaklık verimi yükselten en önemli parametredir. Araştırma sonuçları makale, bildiri ve kitap hazırlanmasında Stirling motorlarla ilgili önemli bir kaynak teşkil edecektir.

Anahtar Kelimeler: Stirling Motor, Termal Enerji, Çanak/Stirling Sistemler

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 üretim kaynakları, üretim miktarlarına göre, birincil enerji kaynakları ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılabilirler. Birincil enerji kaynakları fosil kaynaklar (kömür, petrol, vb.) ve nükleer enerji olup, ikincil enerji kaynaklarıysa yenilenebilir enerji kaynakları olarak da adlandırılan güneş,

jeotermal, gel-git, dalga, rüzgâr enerjisi gibi enerji türlerini kapsamaktadır. Günümüzde enerji talebini karşılamak için genellikle kömür, petrol, doğalgaz gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak bu yakıtların yakın bir gelecekte tükeneceği bilinmektedir. Çünkü endüstrileşmenin artmasıyla her geçen gün fosil kaynaklar azalmaktadır. Aynı şekilde, nükleer santrallerinin temel enerji kaynağı olan uranyum ve toryum rezervleri de oldukça sınırlıdır.

Günümüz koşullarında dünya enerji ihtiyacının %88'ini karşılayan fosil yakıtların kullanımı çevresel kirliliğinin artmasına ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Kömür, doğalgaz ve petrol gibi binlerce yılda oluşmuş kaynaklar yaşam kalitesini artırmak amacıyla tüketildikçe; atıkları ile hava, su ve toprak kirletilmektedir. Bunlardan dolayı atmosfere salınan egzoz gazları giderek artarak yaşama zarar vermektedir. Atmosferdeki CO₂'nin artması küresel ısınmayı artırmakta, SO₂, NO_x, HC ve partiküllerin emisyonu da çevresel problemlere neden olmaktadır. Oluşan bu kirlilik ekolojik dengeyi bozarak, dünya yaşamı için bir tehdit olma aşamasına gelmiştir. Ayrıca uranyum ve toryum gibi madenler az buldukları için stratejik maddeler olup, savaş veya siyasi menfaatler için bu maddelere sahip ülkeler tarafından, diğer ülkelere baskı yapmak amacıyla kullanılabilir özelliktedirler. Bu yüzden nükleer enerji aynı zamanda bir enerji bağımlılığı olarak görülmelidir.

1970'li yıllarda oluşan petrol krizleri, gelişmiş ülkeleri alternatif enerjilere yönlendirmiştir. Dünyanın hemen hemen her yöresinde yenilenebilir enerji kaynaklarının birkaç çeşidine rastlamak mümkündür. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı değerleri yaklaşık 1000W/m²'dir. Ülkemiz 36° ve 42° kuzey enlemleri arasında olup, güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyeli yüksektir. Türkiye'nin yıllık güneşten elektrik üretim potansiyeli 1.3 milyar ton petrole eşdeğer düzeyde ve ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saattir.

Eğer bir ülke, bölge veya yörede doğrudan güneş ışınımı bol ise yani bulutlu gün sayısı az ise iklim ılıman veya sıcak ise rüzgar şiddetli değilse güneş ışınımının aynalar veya mercekler yardımıyla dar bir alanda yoğunlaştırılması sonucu güneşin ısı özelliğinden elektrik üretmek avantajlıdır. Türkiye'nin orta ve güney bölgeleri yani Ege bölgesinin bir bölümü, Akdeniz, İç Anadolu, Güneydoğu ve Doğu Anadolu'nun yarısı CSP sistemler ile elektrik üretmeye uygun olup tüm ülkenin güneş potansiyelinin %80'nini ihtiva etmektedir

2. Stirling Motorlar

Stirling motorlar dıştan ısı verme prensibine göre çalışırlar. Bir hareket mekanizması, bir ısıtıcı, bir rejeneratör, bir soğutucu, bir güç pistonu, bir piston ile motorun bloğundan oluşurlar. Çeşidi ne olursa olsun ısıtıcı, rejeneratör ve soğutucu stirling motorlarının temel parçalarıdır. Hareket mekanizmasının görevi piston ve displacer'i birbiri ile zamanlamalı olarak hareket ettirmek sureti ile termodinamik çevrimi gerçekleştirmektir. Stirling motorlarda güneş bir alıcı üzerine toplanır. Güneşten gelen radyasyonu alıcı odaklayıcı sayesinde ısıya dönüştürerek, ısı çalışma maddesi olan hava, helyum veya hidrojen gibi gaz özellikli maddeye aktarılmasını sağlar.

2.1. İlk Nesil Stirling Motorlar

Stirling motoru (ısı motoru) 1816 tarihinde 4081 patent no'suyla icat eden kişi Robert Stirling'dir. Stirling motorları çalıştırmak basit ve güvenlidir. Sessiz çalışırlar, buhar motorlarına göre verimliliği daha yüksek olduğu için popülerdirler. İlk nesil stirling motorları 100 W ile 4 kW arasında elektrik üretmişlerdir [52].

Bu motor 1818 yılında bir taş ocağından su pompalamak amacıyla kullanılmıştır. Bu motorda, bir güç pistonu, sıcak ve soğuk bölgeler arasında havayı hareket ettiren bir displacer ile bir rejeneratör bulunmaktadır [52, 61].

Stirling motorlarının gücünü arttırmak için 1820 yılında Robert Stirling ve kardeşi James Stirling basınçlı dolgu uygulayarak çevrimini gerçekleştiren gazın miktarını arttırma yoluna denemişlerdir. Robert Stirling 1850'li yıllara kadar, displacer'li tipten, iki ve üç silindirli motorlar imal etmiş ancak bu motorların performansı imal ettiği ilk motor kadar yüksek olmamıştır. Sonradan imal edilen motorların performanslarının düşük olması, bu motorlardaki ölü hacmin yüksek olmasına bağlanmaktadır [61].

1853 yılında, John Ericsson, 9 rpm'de 220 kW güç üreten 4,2 m çaplı piston sahip deniz taşıtlarında kullanılan stirling motoru imal etmiştir. 1860'lı yıllarda Almanya'da Lehman tarafından tek silindirli, displacer'li bir motor yapılmış ve rejeneratör kullanılmamasına rağmen çok iyi sonuçlar elde etmiştir. İmalatı 1915 yılına kadar devam eden bu motorların verimi %7'yi geçmemiştir [52]. Stirling motoru ilk dönemi içten yanmalı motor bulunması ve elektrik motorunun hızlı gelişimi ile duraklamıştır.

2.2. Stirling Motorların için İkinci Dönem

19. yüzyılın sonlarında içten yanmalı motorların icadı, elektrik üretimi ve dağıtımının gelişmesi, malzeme teknolojisinin yetersizliği, metal işleme bilimindeki yetersizlikler gibi sebeplerle Stirling motorları alanındaki çalışmaları kesintiye uğratmıştır. Birinci dünya savaşı sonunda 1920'li yıllardan itibaren tarımsal sulama ve küçük ölçekli elektrik üretimi gibi amaçlarla İngiltere de tekrar kullanılmaya başlanmıştır [61].

1937 yılında Philips Araştırma Laboratuvarların da, özellikle Asya ve Afrika'da düzenli güç kaynağı bulunmayan bölgelerde radyolar için küçük ve sessiz elektrik jeneratörü olarak kullanmak amacıyla Stirling motorları üretimine başlanmıştır. Philips firması 16 W'lık bu tasarımından sonra günümüze kadar güçleri 224 kW'a kadar ulaşan 54 farklı tasarımla Stirling motorlarının gelişimine büyük katkıda bulunmuştur [33, 61].

Stirling motoru ikinci dönemi 1937'de başladı [1]. Stirling motoru Eindhoven, Hollanda'da Philips Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirildi.

İlk olarak uzak bölgelerde kullanılan radyolar için küçük bir termal güç olarak, elektrik jeneratörlerinin geliştirilmesi ve benzeri teçhizat üzerinde denendi [33, 61].

Teknolojik gelişmeyle endüstride kullanılan yeni malzemeler Stirling motorun başarısının temeli olmuştur. Philips araştırma ekibi, paslanmaz çelik gibi yeni malzemeler kullanarak daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Başarının bir diğer sebebi de ilk nesil Stirling motorlara göre daha fazla tecrübe edinilmesiyle verimin yaklaşık %30 artmış olmasıdır [33, 61].

Daha fazla enerji kaynağı ihtiyacı, Philips ve diğer birçok endüstriyel laboratuvarlar tarafından bu konudaki çalışmaları arttırmıştır. Stirling motorun geliştirme çabaları ikinci dönemde de devam etmiştir.

2.3. Endüstriyel Amaçlı Stirling Motorlar

Stirling motorları üzerinde çalışmalar ikinci Dünya Savaşı yıllarında Almanya'da devam etmiştir. Savaşın kısa bir süre sonra Brilliant Araştırma ve Mühendislik Stirling motorları ile çalışan küçük jeneratör setleri üretilmiştir. Transistörün icadı ve kuru bataryaların iyileştirilmesi ile bu motorlara olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır.

1953 yılında Meijer tarafından, altı kenar mekanizması (rhombic-drive mechanism) olarak adlandırılan mekanizma Stirling motorlarında uygulanmıştır. Bu sistemde piston yan yüzeyine net bir yatay kuvvet gelmediğinden piston sürtünmesi ve aşınması azalmaktadır. Meijer tarafından 1953 yılında, hidrojen, helyum ve hava gibi farklı çalışma maddeleri ile yapılan testlerde en iyi performans değerleri hidrojen ile elde edilmiştir [61].

1954'te Philips araştırma ekibi farklı bir çalışma sıvısı olan hidrojeni kullanarak bir motor geliştirmiştir. Bu motor % 36 ısı verim de 977 K sıcaklık değerinde 30 kW güç üretti. Aynı motorun verimliliği daha sonra %38'e yükseltildi. 1958 yılında GM ve Philips firmaları arasında Stirling motoru imalatı amacıyla yapılan lisans anlaşması 1970'lere kadar devam etmiştir. Başta askeri amaçlı jeneratör setleri olmak üzere, uzay araçlarında, deniz altılarda, taşıtlarda ve lokomotiflerde kullanılmak üzere Stirling motorları üzerinde çalışmalar yapılmıştır [45, 49].

Bu konudaki diğer lisanslar ise 1967-1968 yıllarında MAN ve MQM Alman Batı konsorsiyumu, Birleşik Stirling Malmö, İsveç Philips tarafından yapılmıştır. 1973 yılında, Philips / Ford deneysel otomotiv amaçlı Stirling motoru için çalışmalar yaparak başarılı sonuçlar elde etmiştir [6, 7].

1968 yılında Philips firmasının lisans garantisi ile United Stirling ve MAN-MWM firmaları bir konsorsiyum kurmuşlardır. 1970'li yıllarda taşımacılıkta ve gemi motoru olarak kullanmak üzere Stirling motorları imal etmişlerdir [61].

1971 yılında GM firması, Ford Motor Şirketi ile anlaşarak 1977 yılına kadar yedi yıllık ve 180 milyon dolarlık bir çalışma sonunda otomobiller için Stirling motorları geliştirmiştir. Bu motorlar 1976 yılında Ford Pinto ve Ford Taunus" marka araçlarda kullanılmıştır. 60 kW gücünde olan bu motorlar, çalışma maddesi olarak hidrojen kullanmıştır. 1980-1985 yılları arasında ABD'nin enerjiden sorumlu birimi DOE tarafından otomobiller için Stirling motoru geliştirmek amacı ile bir araştırma yaptırılmıştır. Bu araştırma kapsamında Mod I ve Mod II olmak üzere iki motor imal edilmiş ve test edilmiştir. Motorların piston-displacer tipinden ve dört silindirli olduğu, hareket mekanizmasında birbiri ile irtibatlı çalışan 2 krank bulunduğu belirtilmektedir. Mod II nin performansı çeşitli yönlerden benzin ve dizel motorları ile kıyaslanmış, yakıt ekonomisi, emisyon ve tork yönünden başarılı bulunmuştur [48].

1984 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde güneş enerjisinden elektrik üretmek amacıyla Arizona'da Stirling Enerji Sistemleri Şirketi (Stirling Energy Systems Incorporation.) kurulmuştur. Arizona ve Nevada'da güneş enerjisi test alanlarında odaklı kolektörlü Stirling sistemleri ile 118 000 kWh'ten fazla elektrik üretilmiştir [26, 33, 36].

2.3. Kırsal Alan Stirling Motorları

Trayser ve Eibling uzak bölgelerde kullanılmak için 50 W taşınabilir güneş enerjili jeneratör tasarım çalışması yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda makul bir maliyetle güneş enerjili hafif taşınabilir, güvenilir bir stirling motoru yapmanın mümkün olduğu görülmüştür [60].

Gupta ve arkadaşları kırsal uygulamalar için 1 ve 1,9 kW güneş enerjili pistonlu motorlar geliştirdi. Motor verimleri minimum % 2.02 ile maximum % 5.7 arasında ve ortalama %5.5 genel verimlilikte olduğu tespit edildi [25].

Pearch ve arkadaşları 1 kW kombine ısı ve güç sistemini analiz etmiştir. Sonuç olarak konutlarda elektrik talebinin % 30'unun üretilebileceği ve elektrik maliyetinin yaklaşık % 25 oranında azaltılabileceğini göstermiştir [44].

Podesser kırsal köylerde elektrik üretimi için, bir biokütle fırının baca gazı ile ısıtılan bir Stirling motoru tasarlamıştır. 600 rpm'de 33 bar ve 3.2 kW bir shaft gücünün çalışma gaz basıncı ile, % 25 genel verimlilik elde etmiştir [46].

Dixit ve Ghodke lokal bir güç kaynağı üzerinde çalışmıştır. Katı yakıt kombinasyonunu kullanarak kompakt bir güç elde etme sistemi geliştirmiştir. Sistem bir ısı borusu tabanlı, biokütle enerji odaklı stirling motoru şeklindedir. Çeşitli enerji kayıplarının hesaplanması ile birlikte motorun ısıl tasarımı yapılmıştır [18].

2.4. Stirling Motor Optimizasyon Uygulamaları

Genellikle bir stirling motorunun tasarımı maksimum verim noktası ve maksimum güç noktası gibi iki sınırlayıcı parametreye bağlıdır. Markman ve arkadaşları termal-akı ve mekanik-elektrik kayıplarını ölçerek verimlilik artırılmaya çalışılmıştır. 200 W'lık stirling motoru kullanılarak deneyler yapılmıştır [38].

Orunov ve arkadaşları tek silindirli Stirling motoru optimum parametreleri hesaplamak için bir yöntem sunmuştur. Motorun kütlesi ve boyutunun verim açısından önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Optimum parametrelerin doğru bir seçim kullanılarak verime katkı sağlayacağı görülmüştür [43].

Abdalla ve Yacoub bir stirling motoru ile bir çöp yakma tesisinden atık ısıyı kullanarak elektrik üretimi yapmıştır. Deniz suyunu kullanarak soğutma yapmıştır. Soğutma suyu olarak deniz suyu kullanarak ve %50 ısı geri kazanım verimliliği varsaymış ve motor veriminin %27 geliştirilebileceğini iddia etmiştir [1].

Nakajima ve arkadaşları yaklaşık 0,05 cm³ pistonlu mikro Stirling motoru geliştirmiş. 10 Hz'de 10 mW bir motor çıkış gücü bildirmiştir. Bu motora yönelik sorunlar tartışılmıştır [40].

Aramtummaphon gaz ısıtmalı buhar kullanılarak açık çevrim Stirling motorları testlerini yapmıştır. İlk motor, 950 rpm maksimum hızda yaklaşık 1.36 kW güç üretmiş ve ikinci motor, 2200 rpm maksimum hızda yaklaşık 2.92 kW güç üretmiştir [3].

Hirata ve arkadaşları küçük bir 100 W displacer-tipi Stirling motoru Ecoboy-SCM81 performansını değerlendirdi. Rejeneratör, ölü hacim alan kaybı ve prototip motor için sürtünme kayıpları ve basınç kaybı göz önüne alındığında, izotermal bir yöntem kullanan bu analiz modeli, motor performansını artırmak için geliştirilmiştir. Prototip motor için bazı iyileştirmeler tartışılmıştır [27].

Costea ve FEIDT bazı parametreleri için optimum varyasyon aralığı, ya da çalışılan durumların her çıkış gücüne göre, kaynak sıcaklık farkları ve ısı transfer değerlerinin bazı önemli farklılıklarına dikkat çekmiştir [12].

Wu ve arkadaşları Bir Stirling motoru optimum performans analiz. Geri dönüşsüz Stirling motoru döngüsünün optimum performans ısı transferi, rejenerasyon süresi ve rejenerasyon etkileri tartışıldı. Yapılan çalışma sonucunda stirling motorları performansın değerlendirilmesi ve geliştirilmesi için yeni bir teorik temel oluşturmuştur [66].

Wu ve arkadaşları ileri optimal performansı çalışmıştır. Termodinamik performans bağlı sonlu zaman, optimizasyon kriterleri ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar kuantum Stirling çevrimi klasik termodinamikten farklı olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni olarak çalışma sıvılarının farklı karakterde olması teşhisi konulmuştur [68].

Wu ve arkadaşları Stirling motorda performansa karşılık gelen uygun termal verimlilik ve güç çıkışı çalışması yapmıştır [67].

Gu, ve arkadaşları kompozit çalışma sıvısı kullanarak, yüksek verimli stirling motoru tasarlanması hedeflenmiştir. İki bileşenli sıvı-gaz, tek ve çok-fazlı akışkan birlikte kullanılarak hacimsel değişim incelenmiştir. Sonuçlar geleneksel stirling motorları ile karşılaştırılmış ve çalışma sıvısının tercihi tartışılmıştır. Çalışma sıvısı olarak sülfürheksaflorid kullanarak ısıl verim ve optimum yoğunlaşma basıncının avantajlı olacağı önerisinde bulunulmuştur [65].

Winkler ve Lorenz ince boru şeklindeki katı oksit yakıt hücrelerinde ısı motorlarının sisteminin entegrasyonunu değerlendirmiştir. Yüksek verimlilik ve endüstriyel projeler için daha fazla teknolojik gelişmenin gerekli olduğu kanaatine varılmıştır [65].

Hsu ve arkadaşları bir serbest pistonlu Stirling motorlu entegre bir sistem incelemiştir. Serbest pistonlu Stirling motoru performansı ısı transfer modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada verimlilik ve optimum güç çıkışları için analiz yapılmıştır [29].

2.5. Güneş Enerjili Stirling Motorları Geliştirme Çabaları

1962’de Parker ve Malik tarafından tek silindirdirli bir rhombic-drive Stirling motoru imal edilmiş ve güneş enerjisi ile test edilmiştir. Güneş enerjisi bir çanak ayna ile sodyumlu bir ısı borusuna odaklanmış ve ısı borusu tarafından motora iletilmiştir. Parker ve Malik in bu sistemden 2.5 kW civarında güç elde etmiştir [61].

1864 yılında, Ericsson reflektör kullanarak güneş enerjili sıcak hava motoru tasarlamıştır [67].

Ürdün ve Ibele 1864-1870 yılları arasında, Ericsson, Stirling motoru ısıtmak için parabolik oluk kolektörleri kullanan buharlı bir sistem önerdi. 1870 yılında, Stirling motoru güneş enerjisi ile çalışacak şekilde Ericsson tarafından tekrar tasarlanmıştır [14, 21, 31, 54].

Spencer 1872 yılında, Ericssonun küresel ayna konsantratörü kullanan bir açık-döngü sıcak hava motoru inşa ettiğini duyurdu. Bu motor ilk güneş enerjili sıcak hava motoru oldu. Aynı zamanda motor New York’ta güneşli bir günde, öğle saatlerinde 420 rpm’de çalıştığını duyurmuştur [54].

Meinel ve Meinel, Ericssonun güneş enerjili motorlarının, sadece güneşte kullanılabileceğini ve bunların maliyetinin geleneksel motorlara göre 10 kat daha fazla olduğunu bu nedenle uzak bölgelerde ekonomik olacağını savunmuştur [31].

Reader ve Hooper, 1908 yılında bir güneş enerjili Stirling motorun su pompalama sistemleri için kullanılabileceğini önermiştir [47].

1950-1955 döneminde, Ghai ve Khanna Hindistan’da bir parabolik kolektör kullanarak güneş enerjili Stirling motoruyla çalışmış ve güneş enerjili Stirling motorun ısı kaybı sorunlarına değinmiştir [22].

Ürdün ve Ibele ise su pompası için 100 W güneş enerjili Stirling motorunu incelemiştir [61].

Ghai, içten yanmalı motorlara rağmen Stirling motorların ekonomik ve cihazın teknik basitlik noktasına dikkat çeken bir çalışma yürütmüştür [22].

1984 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde güneş enerjisinden elektrik üretmek amacıyla Arizona’da Stirling Enerji Sistemleri Şirketi (Stirling Energy Systems Incorporation.) kurulmuştur. Arizona ve Nevada’da güneş enerjisi test alanlarında odaklı kolektörlü Stirling sistemleri ile 118 000 kWh’ten fazla elektrik üretilmiştir [26, 33, 36].

Daniels, Çanak sistemli 15 W güneş enerjili Stirling motorunun kapsamlı incelenmesini anlatmıştır [14].

Ahmed ve arkadaşları, çanak/Stirling ve hidrojen kullanarak elektrik üretimi için 50 kW güneş enerjili Stirling motoru çalışması yapmıştır. Kontrol sisteminin seçimi, kış sezonunda çalışmaya başlama nedeniyle tasarım hataları ve izleme sistemi sorunlarını anlatmıştır [2].

Childs ve arkadaşları, güneş enerjili deniz suyu arıtması için, hidrolik tahrikli pompa ve enerji geri kazanım teknolojisi geliştirmiştir. Bu sistem ile modern güneş dönüşüm teknolojilerini birleştirmiştir. Bir güneş çanak/Stirling motorunun günlük 10 saat ortalama üretimi için % 22 verimliliğe ulaştığını göstermeye çalışmıştır [11].

Audy ve arkadaşları uzay istasyonu uygulamaları için bir takip sistemli Stirling motoru kullanarak bir güneş dinamik güç sistemini incelemiştir. Dört farklı yörünge konfigürasyonu için teorik modeller geliştirilmiştir. Simülasyon sonucunda Brayton gaz türbini ile güneş dinamik güç modülünü birleştirmiştir [4].

2.6. Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemleri

Çanak / motor sistemleri güneş enerjisini mekanik enerjiye ve daha sonra da elektrik enerjisine yüksek verimde dönüştürmek için kullanılmaktadır. Verimli enerji dönüşümü için gerekli olan sıcaklığı elde etmek için, güneş çanak / motor sistemlerinde yansıtma amaçlı ayna dizileri kullanılır. Bu sistemlerin, verimliliği modüler, bağımsız kullanım ve geleneksel bir yakıt veya güneş enerjisi ile sağlanmaktadır. Birçok güneş teknolojisi arasında, bu sistemlerin en yüksek verimle elektriksel dönüşümü sağladığı bilinmektedir [62].

Yüksek sıcaklık, hidrojen veya helyum ile çalışan, yüksek-basınç Stirling motorları genellikle güneş çanak /Stirling sistemli motor kullanılmaktadır. Modern, yüksek performanslı Stirling motorları, genellikle 973 K’lık sıcaklık ve 200 bar’lık bir çalışma sıvısı basıncında çalışmaktadır. Isıya en uygun Stirling motorlarda elektriksel verimleri yaklaşık % 40 civarındadır [56, 58, 64].

Şu anda kinematik Stirling motorları, Kockums (Birleşik Stirling) 4-95 25-kWe, Stirling Termal Motorlar STM 4-120 25-kWe ve SOLO 161 11-kWe çanak/stirling için kullanılan motorlar için örnekler sistemlerdir. Güneş çanak / motor teknolojisi eski güneş teknolojilerden biridir. 1970'lerin ve 1980'lerin başında, modern güneş çanak / motor teknolojisi Advanco Corporation, Stirling AB, McDonnell Douglas Aerospace Corporation'dan (MDA), ABD Enerji Bakanlığı (DOE), ve NASA'nın Jet Propulsion Laboratory tarafından geliştirilmiştir. Birleşik Stirling Güç Dönüşümü Birimi (PUC) kullanarak Advanco Vanguard sistemi, 25-kWe nominal çıkış modülü,% 29,4 elektrik dönüşüm verimliliğine ulaşmıştır. MDA, kendi tasarımı çanak ve Stirling PKB'ye sahip bir sistemi ticarileştirmek için bir çok çalışma yapmıştır [62]. Daha sonra MDA donanım haklarını Southern California Edison (SCE)'ye satmıştır. SCE ise çanak / motor teknolojisine sahip güneş takip sistemleriyle 1988 yılında, yıllık ortalama %23 verimlilik elde etmiştir [40-43]. Bu amaçla Çanak/Stirling Ortak Girişim Programı (DSJVP) 1991 başlatılmıştır [9]. Programın amacı, uzak bölgelerde uygulamalar için 5-10-kWe çanak / stirling sisteminin geliştirilmesidir. 25-kWe çanak / motor sistemi USJVP geç 1993 başlandı Düşük maliyetli gelişmiş operasyonel esneklik sunan sistemler SAIC tarafından tahmin edilmiştir [10]. Gelişmiş çanak sistemi ADDS kullanılarak SOLO 161 Stirling güç dönüşüm ünitesi uzak noktalar için güç üretimi (9-kWe) çanak / Stirling güneş enerjisi sistemi çalışması yapılmıştır [17]. Davenport ve arkadaşları Salt River Projesi (SRP) de SunDish sisteminin prototipi, operasyonel sonuçları incelenmiştir. Bu proje SRP, SAIC, STM ve DOE işbirliği ile yapıldı. Güneş enerjisi mevcut değilken bir depoda toplanan metan gazı yakıt olarak kullanılmıştır. Onlar da SunDish sisteminin prototipi ile çalışmasından kaynaklanan tasarım değişiklikleri ve sistem iyileştirmelerine değinmiştir [16]. Davenport ve arkadaşları çanak / stirling güç sistemleri (SAIC / STM Sun Dish sistemleri) ikinci nesil çalışmasını yapmıştır. Bu çalışma motor-çanak sistemlerine birçok iyileştirmeler getirmiştir. Güvenilirliği, sistem performansını artırmak, kurulumu kolaylaştırmak ve üretim sırasında karşılaşılan sorunları düzeltmek için bu çalışma yapılmıştır. 1998 yılında 20 kW güç elde edilirken 2002 yılında 23,3 kW güç üretilmiştir.% 26 verimliliğe ulaşılmıştır [15].

2.7. Güneş Enerjili Stirling Motor Optimizasyonu

Bir güneş enerjisi kolektör sistemi enerji üretimi, güneş kolektörü ve sistemin maliyeti ve uygun güç çıkış optimum değerleri veren çalışma koşulları için bir ısı giriş kaynağı olarak kullanıldığı zaman dikkate alınmalıdır.

Howell ve Bannerot, Güneş çanak sistemi tarafından desteklenen Carnot, Stirling, Ericsson ve Brayton çevrimi motorlarının çalışma çıkışını maksimize etmek güneş kolektörü çıkış sıcaklığının optimum değer tespitine yönelik çalışmalar yürütmüştür [28].

Eldighidy ve arkadaşları. Bir düzlem reflektör ile kullanılan bir düz plaka toplayıcı tarafından emilen maksimum güneş enerjisi koşullarını optimize etmeye çalışmıştır [20].

Daha sonra, Eldighily, Otto hava çevrimi maksimum çalışma çıkışı için güneş kolektörü optimum çıkış sıcaklıklarını araştırmıştır. Bu işlemi, havayı çalışma gazı olarak kullanan standart stirling çevriminde uygulamıştır [19].

Gordon güneş odaklı ısı motorları optimizasyonu enerji üretimi açısından teorik olarak incelenmiştir. Sonuçlar yüksek verim ve maksimum güç parametreleri açısından yorumlanmıştır [23].

Costea ve arkadaşları, basınç kayıpları ve güneş stirling motoru çevrim performansına gerçek ısı transferinin etkisi incelenmiştir [13].

3. Sonuçlar

- Bilimsel çalışmalara kaynak teşkil edebilecek bir çalışma yürütülerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır

- Bu çalışma sonucunda FV panelli sistemlerin ülkemiz için (%20'si hariç) çok kullanışlı olmadığı görülecektir. Sıcak havanın verimi düşürücü olumsuz etkisi CSP sistemlerle avantaja dönüştürülerek verimi artırıcı bir etki yaratacaktır. Türkiye'de FV üretim yerine CSP kaynaklı enerji üretiminin benimsenebileceği görülmektedir.

- Dışardan enerji satın almak yerine yerli imalat yapılarak stirling motorlar aracılığıyla güneşten elektrik üretimi sayesinde ülke ekonomisine katkı sağlanabileceğine dikkat çekilmeye çalışılmıştır.

- FV paneller dış ülkelerden ithal edilmektedir. Ancak Stirling motorlu sistemler tamamen yerli iş gücü ve ulusal kaynaklar ile imal edilebilmektedir. Bu şekilde hem istihdama katkı sağlanacak hem kendi öz kaynaklarımızdan faydalanarak imalat yapılmış olacaktır. FV panel gibi teçhizatın dış ülkelere satın alınması yerine kendi hammaddemizi işleyerek Stirling motorlu sistemlerin imalatını yapılabileceği ve ülke ekonomisine bu şekilde bir katkı sağlanabileceğine dikkat çekilmeye çalışılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Abdalla S. ve Yacoub SH. (1987), "Feasibility prediction of potable water production using waste heat from refuse incinerator hooked up at Stirling cycling machine", *Desalination*, 64(1), 491–500.
- [2] Al-Rebaia A. ve Hansen J. (1987), "50 kW Solar concentrators with stirling generators-results of the first six mounts of operation in Saudi Arabia Abs.", I.S.E.S. Solar World Congress, 13-15.
- [3] Aramtummaphon D. (1996), "A study of the feasibility of using heat energy from producer gas for running Stirling engine by steam as working Fluid", Master thesis, King Mongkut's University of technology Thonburi.
- [4] Audy Ch. ve Fischer M. Messerschmid EW. (1999), "Nonsteady behaviour of solar dynamic power systems with Stirling cycle for space stations", *Aerosp Sci Technol* 11(1), 49–58.
- [5] Bilgin Z. (2006), "Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [6] Beale, W. (1992), "Small Stirling Free-Piston Engines For Cogeneration", Sunpower Inc., Ohio.
- [7] Beale, W.T. ve Lane, N.M. (1996), "Stirling Engines For Gas Fired Micro-Cogen and Cooling Strategic Gas Forum, 90-95.
- [8] Bean, J. R. ve Diver, R. B. (1992), "The CPG 5-kW dish-stirling development program", 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 298- 302.
- [9] Bean J. R. ve Diver RB. (1992), "The CPG 5-kWe dish/Stirling development program", In:Proceedings of the IECEC, 154-160.
- [10] Beninga, K. Davenport, R. Sellars, J. Smith, D. ve Johansson, S. (1997), "Performance results for the SAIC/STM prototype dish/Stirling systems". In: Proceedings of the 1997 ASME International Solar Energy Conference, 97-107.
- [11] Childs. WD, Dabiri, AE. Al-Hinai, HA. ve Abdullah, HA. (1999), "VARI-RO solar-powered desalting technology", *Desalination* 66(1), 125-155.
- [12] Costea, M. ve Feidt M. (1998), "The effect of the overall heat transfer coefficient variation on the optimal distribution of the heat transfer surface conductance or area in a Stirling engine", *Energy Convers Manage* 39(1), 1753–63.
- [13] Costea, M. Petrescu, S. ve Harman, C. (1999), "The effect of irreversibilities on solar Stirling engine cycle performance", *Eng Convers Manage* 40(1) 23–31.
- [14] Daniels F. (1964), "Direct use of the sun's energy", Yale University Press, New Haven.
- [15] Davenport, RL. Butler, BL. Taylor, R. Forristall, R. Johansson, S. ve Ulrich, J. (2002), "Operation of second generation dish/Stirling power systems", In:Proceedings of the ASES 2002 Solar Conference, 202-212.
- [16] Davenport, RL. Mayette, J. ve Forristall, RE. (2001), "The salt river project sundish/Stirling system. In: Proceedings of the ASME Solar Forum, 201-221.
- [17] Diver, R. Andraka, CE. Rawlinson, KS. Goldberg, V. ve Thomas, G. (2001), "The advanced dish development system project", In: Proceedings of the Solar Forum, 201-231.
- [18] Dixit, DK. ve Ghodke, SV. (1992), "Renewable energy powered Stirling engines-a viable energy alternative In: Sayigh AAM, editor. Renewable energy technology and the environment", Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress, 934–938.
- [19] Eldighidy, SM. (1993), "Optimum outlet temperature of solar collector for maximum work output for an Otto air-standard cycle with ideal regeneration". *Solar Energy*, 5(1), 175–82.
- [20] Eldighidy, SM. Taha, IS. ve Darwish, MA. (1979), "Optimum conditions for maximum solar energy absorbed by flat plate collector augmented by plane reflector", In: Proceedings of the Energy Symposium (ISATED), 28–32.

- [21] Ericsson, J. (1870), "Sun power; the solar engine", Contributions to the Centennial Exhibition, 571–577.
- [22] Ghai, ML. (1955), "Small solar power plants", Solar energy research. London.
- [23] Gordon, JM. (1988), "On optimized solar-driven heat engines", Sol Energy 40(1):457–461.
- [24] Gu, Z. Sato, H. ve Feng, X. (2001), "Using supercritical heat recovery process in Stirling engines for high thermal efficiency", Appl Therm Eng 21(2), 1621–1630.
- [25] Gupta, R. K. Deshpande, A. M. ve Brave, K. M. (1978), "Development of 1 kW solar powered reciprocating engine for rural application", International Solar Energy Congress, 2016-2020.
- [26] Goswami, Y.D. (1998), "Solar thermal power technology present status and ideas for the future", Energy Sources Part A, 20(2), 137-145.
- [27] Hirata, K. Iwamoto, S. Toda, F. ve Hamaguchi, K. (1997), "Performance evaluation for a 100 W Stirling engine", In: Proceedings of Eighth International Stirling Engine Conference, 19–28.
- [28] Howell, JR. ve Bannerot, RB. (1997), "Optimum solar collector operation for maximizing cycle work output", Sol Energy 19(2), 149–53.
- [29] Hsu, S. T. Lin, F. Y. ve Chiou, JS. (2003), "Heat-transfer aspects of Stirling power generation using incinerator waste energy", Renewable Energy, 28(2), 59–69.
- [30] Jaffe, L. D. (1998), "Test result on parabolik dish concentrators for solar thermal power systems", Solar Energy, 42(2), 173-187.
- [31] Jordan, R.C. Ibele, W. E. (1955), "Mechanical energy from solar energy", In: Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix. 81–101.
- [32] Kaushika, N. D. ve Reddy, K. S., (2000), "Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system", Energy Conversion & Management, 41(3), 713-726.
- [33] Kongtragool, B. ve Wongwises, S. (2007), "Performance of low-temperature differential Stirling engines", Renewable Energy, 32(4) 547-566.
- [34] Lopez, C.W. ve Stone, K. W. (1992), "Design and performance of the Southern California Edison Stirling dish", In: Proceedings of the 1992 ASME-JSES-KSES International Solar Energy Conference, 713-726.
- [35] Lopez, C. W. Ve Stone K. W. (1993), "Design and performance of the Southern California Edison Stirling dish", Sandia National Laboratories, Albuquerque, Report SAND, 7093-7098.
- [36] Mancini, T. (1994), "The DOE solar electric program", In proceedings of the 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1790-1795.
- [37] Mancini, R. T. (1997), "Solar-Electric Dish Stirling System Development", Sandia National Labs., Albuquerque, USA.
- [38] Markman, M. A. Shmatok, Y.I. ve Krasovkii, V.G. (1983), "Experimental investigation of a low-power Stirling engine", Geliotekhnika, 19(1), 19–24.
- [39] Meinel, A.B. ve Meinel, M.P. (1976), "Applied solar energy: an introduction" Wesley.
- [40] Nakajima, N. Ogawa, K. ve Fujimasa, I. (1989), "Study on micro-engines: miniaturizing Stirling engines for actuators", Sensor Actuator, 20(4), 75–82.
- [41] Norm Enerji. (2014), "Türkiyede Güneş Enerjisi", http://www.normenerji.com.tr/menu_detay.asp?id=11738, 04.04.2015.
- [42] Odeh, S. ve Behnia, M. (2009), "Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling", Heat Transfer Engineering, 30(6), 499-505.
- [43] Orunov, B. Trukhov, V. S. (1983), "Tursunbaev IA. Calculation of the parameters of a symmetrical rhombic drive for a single-cylinder Stirling engine". Geliotekhnika, 19(3), 29–33.

- [44] Pearce, J. M. Al Zahawi, B. A. Auckland, D.W. ve Starr, F. (1996), "Electricity generation in the home: evaluation of single-house domestic combined heat and power", IEE Proc-A, 14(3), 345-350.
- [45] Percival, W. H. (1974), "Historical Review of Stirling Engine Development in the United States From 1960 to 1970", ERDA, No. NASA CR-121097.
- [46] Prodesser, E. (1999), "Electricity production in rural villages with biomass Stirling engine", Renewable Energy 16(1):1049–1052.
- [47] Reader, G. T. ve Hooper, C. (1983), "Stirling engines" Cambridge University Press, London.
- Richey, A. E. (1986), "Mod II automotive Stirling engine design description and performance projections" SAE Paper, No: 860059.
- [48] Ross, A. (1977), "Stirling Cycle Engines" Solar Engines, Second Edition, Phonix, Arizona.
- [49] Rüstemli, S. Dinçer F. (2012), "Research On Effects Of Environmental Factors On Photovoltaic Panels and Modeling With Matlab/Simulink", Przegląd Elektrotechniczny, 88(2), 63-66.
- [50] Selcuk, M. K., (1985), "Dish-Stirling module performance as evaluated from tests of various test bed concentrator/Stirling engine configurations", Prepared for U.S. Department of Energy Jet Propulsion Laboratory, California.
- [51] Senft, J. R. (1993), "Ringbom Stirling engines" Oxford University Press, New York.
- [52] Simetkosky M. (1985), "Mod I Automotive Stirling Engine Mechanical Development", SAE Paper, No: 840462.
- [53] Shaltens, R. K. Schreiber, J. G. ve Wong, W. A. (1992), "Update on the advanced Stirling conversion system project for 25 kW dish Stirling application", 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 229-235.
- [54] Spencer L. C. (1989), "A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part I. A history of solar-powered devices up to 1950", Solar Energy 43(4), 191–196.
- [55] Stepanovich, T. V. Abdullaevich, T. I. ve Ivanovich, L. A., (1991), "Autonomous solar power plant on the base of stirling engine", ISEC, Dubrovnik.
- [56] Stine, W. B. ve Diver, R. P. (1994), "A compendium of solar dish/Stirling technology. Sandia National Laboratories", Report SAND93-7026 UC-236, Albuquerque.
- [57] Stone, K. W. ve Drubka, R. E. (1994), "Impact of Stirling engine operational requirements on dish-Stirling system life cycle costs", In: Proceedings of the 1994 ASME Solar Energy Conference, San Francisco.
- [58] Stone, K.W. ve Lopez, C. W. (1993), "Mc Alister R. Economic performance of the SCE Stirling dish. In: Proceedings of the IECEC, Atlanta.
- [59] Taguchi D. S. (2003), "Conceptual modeling and analysis of a solar receiver for thermochemical hydrogen generation", Master Thesis, Nevada University, , Las Vegas.
- [60] Trayser, D. A. ve Eibling, J. A. (1967), "A 50-Watts portable generator employing a solar-powered Stirling engine", Sol. Energy 11(1), 153–159.
- [61] Walker G. (1980), "Stirling engines", Clarendon Press, Oxford.
- [62] Washom, B. (1984), "Parabolic dish Stirling module development and test results", In: Proceedings of the IECEC, Paper No. 849516.
- [63] West, C. D. (1988), "A historical perspective on Stirling engine performance", In: Proceedings of the 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper 889004.
- [64] West C. D. (1986), "Principles and applications of Stirling engines", Van Nostrand Reinhold, New York.
- [65] Winkler W, ve Lorenz H. (2002), "Design studies of mobile applications with SOFC-heat engine modules" J Power Sources 10(6), 338–343.

- [66] Wu, F. Chen, L. Wu, C. Sun, F. (1998), "Optimum performance of irreversible Stirling engine with imperfect regeneration", *Energy Convers Manage* 3(9), 727–732.
- [67] Wu, F. Chen, L. Sun, F. ve Wu, C. (2000). "Finite-time exergoeconomic performance bound for a quantum Stirling engine" *Int J Eng Sci* 38(2), 239–247.
- [68] Wu, F. Chen, L. Sun, F. Wu, C. ve Zhu, Y. (1998), "Performance and optimization criteria for forward and reverse quantum Stirling cycles". *Energ Conver*