

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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SPEKTRAL OLARAK AYRIŞTIRILAN YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ
ENERJİSİ İLE STİRLİNG MOTORDA GÜÇ ÜRETİMİ
VE PERFORMANS DEĐERLENDİRMEŐİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürhan KÜLAHLI

TEMMUZ 2013

UŞAK

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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SPEKTRAL OLARAK AYRIŞTIRILAN YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ
ENERJİSİ İLE STİRLİNG MOTORDA GÜÇ ÜRETİMİ
VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürhan KÜLAHLI

TEMMUZ 2013

UŞAK

Gürhan KÜLAHLI tarafından hazırlanan SPEKTRAL OLARAK AYRIŞTIRILAN YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMİYLE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ STIRLING MOTORUNUN TEST EDİLMESİ VE PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr.Canan KANDİLLİ

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Mehmet AKTAŞ

Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi



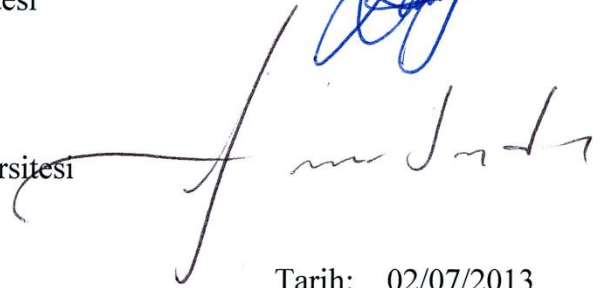
Yrd.Doç.Dr. Canan KANDİLLİ

Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi



Yrd.Doç.Dr. Yavuz SOYDAN

Makine Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi

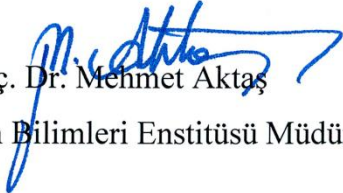


Tarih: 02/07/2013

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Mehmet Aktaş

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gürhan Külahlı



**SPEKTRAL OLARAK AYRIŞTIRILAN YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ
ENERJİSİ İLE
STIRLING MOTORDA GÜÇ ÜRETİMİ
VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Gürhan KÜLAHLI

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEMMUZ 2013**

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı günden güne önem kazanmaktadır. Güneş en önemli yenilenebilir enerji kaynağımızdır. Güneşten, aydınlatma ve çeşitli yöntemlerle ısı enerjisi elde edilmesi gibi çok farklı kullanım alanlarında yararlanmak mümkündür. Bunlardan biride yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile enerji elde etmedir.

Birim yüzeye gelen güneş ışınımı enerjisinin düşük oluşu yoğunlaştırıcı sistemlerin kullanılması fikrini doğurmuştur. Çizgisel ve noktasal olarak iki farklı kategoride incelenebilen yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin elektrik ve termal enerji üretimi, Stirling motorlarla bütünleştirilmesi, güneş enerjili aydınlatma sistemlerinde kullanımı gibi birçok kullanım alanı mevcuttur. Noktasal odaklayıcı güneş enerjisi sistemlerde odak bölgesinde yüksek yoğunluklu bir ışınım elde edilmektedir.

Bu çalışmada spektral olarak ayrıştırılan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemiyle bütünleştirilmiş Stirling motoru test edilmiş ve performansı hakkında bilgi verilmiştir. Sistem bileşenleri olan parabolik çanak çift eksenli takip sistemi, soğuk ayna, fiber optik kablo demeti ve Stirling motoru sunulmuştur. Performans analizi Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yapılmış ve sistem bileşenlerinin

sıcaklıkları, Stirling motorun devir sayısı, rüzgar hızı, yatay ve dikey ışınım parametreleri incelenmiştir. Sistemin sıcaklık ve ışınım dağılımı hakkında bilgi edinmek için termal kamera ile ölçümler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımı sırası ile $397-906 \text{ W/m}^2$ ve $658-948 \text{ W/m}^2$ aralıklarında değerler alırken, Stirling motorun enerji ve ekserji verimlerinin sırası ile $0,12-0,23$; $0,23-0,55$ değerleri arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu :

Anahtar Kelimeler : Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, Spektral ayrıştırma, Stirling motor, Enerji-ekserji analizi

Sayfa Adedi : 108

Tez Yöneticisi: Yrd.Doç.Dr.Canan KANDİLLİ

**POWER GENERATION BY A STIRLING ENGINE WITH SPECTRALY
DECOMPOSED CONCENTRATED SOLAR ENERGY AND PERFORMANCE
EVALUATION
(M.Sc. Thesis)**

Gürhan KÜLAHLI

**USAK UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JULY 2013**

ABSTRACT

The use of renewable energy sources is getting more important day by day. Sun is the most important renewable energy source. There are many application areas of sun such as lighting and obtaining heat energy with various methods. One of them is to produce energy by concentrated solar energy.

Low density of solar radiation per unit area has emerged the idea of using concentrator systems. Concentrating solar energy systems which could be studied in two different categories such as imaging and non-imaging has many using area such as production of electricity and thermal energy, integration with Stirling engines and using in solar powered lighting system. High-intensity radiation is obtained on focus region for the imaging concentrators.

In this study, Stirling engine integrated with spectrally decomposed concentrated solar power has been tested and given information about the performance. System components such as parabolic dish, dual-axis tracking system, cold mirror, fiber optic cable bundle and Stirling engine were presented. Performance analysis of the system was performed in Department of Mechanical Engineering in Uşak University and experimental data including temperature of system components, wind speed, horizontal and vertical radiation and rotation speed of Stirling engine were obtained.

Thermal camera images were provided to obtain information on irradiance and temperature distribution of the system. It is observed that while global and direct normal solar radiation have values between 397-906 W/m^2 and 658-948 W/m^2 respectively, the energy and exergy efficiency values of the Stirling engine varied from 0.12 to 0.23 and from 0.23 to 0.55 respectively at the end of the study.

Science Code :

Key Words : Concentrated solar energy, spectral decomposition, Stirling engine, Energy and exergy analyses

Page Number : 108

Adviser : Assist.Prof.Dr.Canan KANDILLI

TEŞEKKÜR

110M039 numaralı TUBİTAK projesi kapsamında tamamlanan tez çalışmamda desteklerinden dolayı TUBİTAK'a, bana yardımcı olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, bilgi birikimleri ile beni yönlendiren Değerli Danışmanım Yrd.Doç.Dr. Canan KANDİLLİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan, maddi ve manevi katkıda bulunan aileme ve nişanlım Merve'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
İÇİNDEKİLER.....	X
ÇİZELGE LİSTESİ	XIII
ŞEKİL LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİ	3
2.1 Güneş Enerjili Toplayıcıların Sınıflandırılması	4
2.1.1 Sabit güneş enerjisi toplayıcıları	6
2.1.2. Güneş takip sistemli odaklı güneş toplayıcıları	8
2.2 Yoğunlaştırıcı Toplayıcıların Analizleri	16
2.2.1 Yoğunlaştırma Oranı	16
2.2.2 Yoğunlaştırıcıların Isıl Performansı	18
2.2.3 Yoğunlaştırıcıların Optik Performansları	20
2.2.4 Odaklama geometrisi.....	21
2.2.5. Paraboloidal Yoğunlaştırıcılar	26

3. STIRLING MOTORLAR	28
3.1 Stirling Çevrimi	28
3.2 Stirling Motor Tipleri	30
3.2.1 Tek Etkili Stirling Motorları	30
3.2.2. Çift Etkili Stirling Motorları	36
3.3 Stirling Motorunun Avantajları ve Dezavantajları	37
3.4 Güneş enerjili Stirling motorlar	39
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	43
5. TEZİN AMACI, ÖNEMİ ve KAPSAMI	47
6. KURAMSAL ANALİZ	50
6.1 Termodinamik Analiz	50
7. SİSTEM TANITIMI ve DENEY TASARIMI	56
7.1 Yoğunlaştırıcı Çanak	58
7.2 İzleme Sistemi	58
7.3 Soğuk Ayna	59
7.4 Stirling Motor	59
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
8.1 Termodinamik analiz	61
8.2 Belirsizlik analizi	80

9. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
9.1 Sonuç	82
9.2 Öneriler	83
KAYNAKLAR.....	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1 Güneş toplayıcılarının sınıflandırılması	5
Çizelge 8.1 Deneylerde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1 Güneş ile dünya arasındaki ilişki.	3
Şekil 2.1.1 Birleşik parabolik toplayıcıların şematik gösterimi	7
Şekil 2.1.2 Tek eksenli çift eksenli izleme sistemleri	9
Şekil 2.1.3 Parabolik oluklu toplayıcıların şematik görünümü	10
Şekil 2.1.4 Parabolik oluklu toplayıcı	11
Şekil 2.1.5 Frensel toplayıcı sistem şematik görünümü	11
Şekil 2.1.6 Doğrusal frensel yansıtıcı sistemin şematik görünümü	12
Şekil 2.1.7 Frensel yansıtıcı sistemin örneğinin şematik görünümü	13
Şekil 2.1.8 Frensel yansıtıcı sistemin örneğinin şematik görünümü	13
Şekil 2.1.9 Parabolik çanak yansıtıcı şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.1.10 Parabolik çanak ve Stirling motoru	15
Şekil 2.1.11 Heliostat sistem	15
Şekil 2.2.1 T_s sıcaklığında, açıklık alanı A_a , alıcı alanı A_r , güneşten uzaklığı R olan yoğunlaştırıcının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.2.2 Lineer noktasal yoğunlaştırıcı odak düzlemindeki akı dağılımına bir örnek.....	20
Şekil 2.2.3 Birleşik parabolik yoğunlaştırıcıların kesit görünüşü	22
Şekil 2.2.4 Birleşik parabolik yoğunlaştırıcıların tam kesit görünüşü.....	23
Şekil 2.2.5 Noktasal parabolik yoğunlaştırıcının kesiti	24
Şekil 2.2.6 Lineer toplayıcılar için odakta oluşan görüntünün boyutu	24
Şekil 2.2.7 Açıklık-Odak uzaklığı oranının fonksiyonu olan olarak ϕ ,	25

Şekil 2.2.8 Merkezden ve kenarlardan yansıyan ışınım	25
Şekil 3.1.1 Stirling termodinamik çevrimi	28
Şekil 3.1.2 Stirling çalışma prensibi	29
Şekil 3.2.1 Alfa tipi motorun temel parçaları ve çalışma prensibi	31
Şekil 3.2.2 Beta tipi motorun şematik resmi ve çalışma prensibi.....	33
Şekil 3.2.3 Gama tipi motorun çalışma prensibi	35
Şekil 3.5.1 Bundesministerium für Forschung und Technologie kurumuna ait olan Stirling motor.....	39
Şekil 3.5.2 Schlaich Bergemann şirketine ait olan Stirling motor	40
Şekil 3.5.3 Stiftung Energieforschung şirketine ait olan sistem	40
Şekil 3.5.4 EU-Kommission şirketine ait olan sistem	41
Şekil 3.5.5 KEMS şirketine ait olan Stirling motor.....	41
Şekil 3.5.6 Infinia şirketine ait olan Stirling motor	42
Şekil 6.1.1 Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi aydınlatma ve güç üretimi birleşik sistemi enerji dönüşüm şeması	51
Şekil 7.1 Deney sisteminin genel görünüşü	56
Şekil 7.2 Deney sisteminin arkadan görünüşü	57
Şekil 7.4.1 Çalışmada kullanılan Stirling motor	60
Şekil 8.1 Zamana bağlı olarak yatay toplam, açıklık alanı toplam ve direkt normal güneş ışınımı verileri (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	62
Şekil 8.2 Yatay güneş ışınımına bağlı olarak Stirling sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklığının değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	62

Şekil 8.3 Direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak Stirling sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklığının değişimi(a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	64
Şekil 8.4 Yatay toplam güneş ışınımına bağlı olarak motor devir sayısının değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	64
Şekil 8.5 Stirling motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	66
Şekil 8.6 Stirling motor devir sayısının direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran	66
Şekil 8.7 Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran Haziran	68
Şekil 8.8 Stirling motor devir sayısının (a) yatay toplam güneş ışınımına, (b) direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi.....	69
Şekil 8.9(a) Stirling motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına, (b) Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi	70
Şekil 8.10 (a) Sistemin bütününe ait ısıl kamera görüntüsü(b)Isıl görüntü alındığı anda deney sistemi görüntüsü.....	71
Şekil 8.11 Soğuk ayna ve Stirling motora ait termal kamera görüntüleri.....	72
Şekil 8.12 Fiber optik kablo girişine ait termal kamera görüntüleri.....	73
Şekil 8.13 Stirling motora ait termal kamera görüntüleri	74
Şekil 8. 15 Standart güneş enerjisi spektrumu	75
Şekil 8.14 Stirling motora ait termal kamera görüntüleri	75
Şekil 8.16 Soğuk aynaların spektral ayrıştırma özeliğini	76
Şekil 8.17 Test odasında fiber optik kablo demeti çıkışındaki ışınım ve odada sağlanan aydınlık düzeyi.....	77

Şekil 8.18 Stirling motor enerji ve ekserji veriminin (a) yatay toplam güneş ışıını, (b) direkt normal güneş ışıınına bağı olarak değışimi78

Şekil 8.19 Stirling motor enerji ve ekserji veriminin (a) devir sayısı, (b) motor alıcı sıcaklığına bağı olarak değışimi79

SEMBOLLER

A	Alan (m^2)
C	Özgül ısı ($J/kg K$)
C_{max}	Yoğunlaşma oranı
D	Çap (m)
d	Görüntü çapı (m)
$E\dot{x}$	Ekserji oranı (W)
f	Odak uzaklığı (m)
G	Güneş ışınımı (W/m^2)
\dot{Q}	Enerji oranı
T	Sıcaklık (K)
F	Görüş faktörü
S	Soğurulan ışınım

Yunan Alfabeti

ε	Ekserji verimi
η	Enerji verimi
ρ	Yansıtıcılık
φ	Maksimum verim

Alt indisler

a	ortam
ap	açıklık
b	ışın
con	taşınım
$dish$	çanak
f	odak
in	giriş
m	ayna
max	maksimum
min	minimum
o	optimum
out	çıkış
rad	ışınım
rim	kenar
s	Stirling
t	toplam
u	yararlı

KISALTMALAR

UV	Ultraviyole ışınım
IR	Kızılötesi ışınım
LTD	Düşük sıcaklık farkı
MTD	Orta düzeyde sıcaklık farkı
ÜÖN	Üst ölü nokta
AÖN	Alt ölü nokta
PLC	Programlanabilir mantıksal denetleyici
LDR	Foto direnç
CPC	Birleşik parabolik yoğunlaştırıcı
CPV	Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemler
PVT	Isıl fotovoltaik sistemler

1. GİRİŞ

Petrol fiyatlarının arttığı ve fosil yakıtların hızla tükendiği ve sera gazlarının etkisiyle küresel ısınmanın etkilerinin gittikçe daha fazla hissedildiği günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek arttırmaktadır.

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki kısa süreçte aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanır. Bugün yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar, yakılınca biten ve yenilenmeyen enerji kaynaklarıdır. Oysa hidrolik (su), güneş, rüzgâr ve jeoısıl gibi doğal kaynaklar yenilenebilir olmalarının yanı sıra temiz enerji kaynakları olarak karşımıza çıkmaktadır [1].

Güneş enerjisi çok büyük tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Dünya üzerine düşen enerji miktarı $1,8 \times 10^{11}$ MW civarındadır. Bu miktar dünya üzerindeki bütün kaynaklardan sağlanan enerji miktarından birkaç bin kat daha fazladır. Bununla birlikte güneş enerjisi dünyanın her yerinde çeşitli kullanım alanları için yeterli miktarda bulunan bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle güneş enerjisi şu andaki ve gelecekteki bütün ihtiyaçlarımızı karşılayabilecek umut verici bir kaynak olarak görülmektedir [2].

Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte Fotovoltaik Güneş Teknolojisi ve Isıl Güneş Teknolojileri olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Fotovoltaik hücreler denen yarı-iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. İkinci seçenek ise güneşten ısı enerjisi elde etmektir. Bu ısı doğrudan kullanılabilceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir [3].

Ancak birim yüzeye gelen güneş ışınımı enerjisinin düşük oluşu yoğunlaştırıcı sistemlerin kullanılması fikrini doğurmuştur. Çizgisel ve noktasal olarak iki farklı kategoride incelenebilen yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin elektrik ve ısıl enerji üretimi, Stirling motorlarla bütünleştirilmesi, güneş enerjili aydınlatma sistemlerinde olduğu kullanımı gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur [4].

Bu çalışmada, güneşi çift ekseninde izleyen noktasal odaklayıcı paraboloidal çanak ile spektral olarak ayrıştırılmış yoğunlaştırılmış güneş ışınımının ısı formunu Stirling motorla mekanik güç eldesinde kullanma potansiyeli değerlendirilmiş, termodinamik

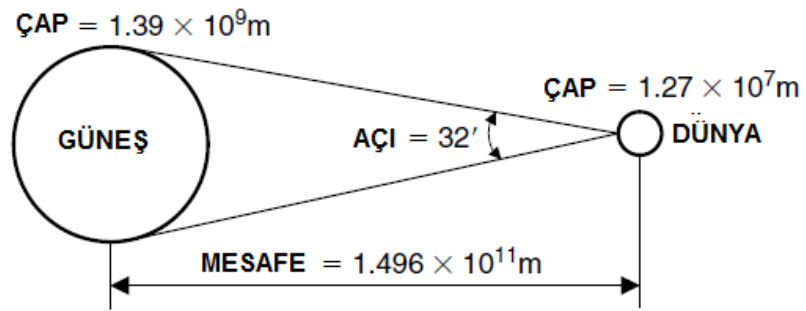
modellemesini ortaya konulmuş ve elde edilen güç miktarı ile enerji-ekserji verimleri değerlendirilmiştir. Bu sistemle, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin tüm spektrumundan etkin bir şekilde yararlanılmasını sağlayacak yeni bir yaklaşım olan “spektral ayrıştırma yaklaşımı” ortaya konmuştur. Bu çalışmada, spektral ayrıştırma yaklaşımı kullanılarak, odakta toplanan yoğunlaştırılmış güneş ışınımının görünür bölge kısmı, optik elemanlar ile paraboloidal çanağın kör noktasında bulunan fiber optik kablo demetine aydınlatma amaçlı olarak yansıtan, geriye kalan ve ısı özelliği taşıyan yoğunlaştırılmış güneş ışınımı ise odaktaki bir Stirling motora doğrudan aktararak mekanik güce çevirebilen yeni bir sistem tanıtılmış, termodinamiğin 1. ve 2. yasası ışığında enerji ve ekserji modeli sunulmuştur.

Çalışmanın ‘Güneş Enerjisi’ bölümünde güneş enerjisi ile ilgili bilgiler verilmiş, güneş enerjili toplayıcılar değerlendirilmiştir. ‘Stirling Motorlar’ bölümünde Stirling çevrimi açıklanmış, Stirling motor tipleri hakkında bilgiler verilmiştir. ‘Önceki Çalışmalar’ bölümünde, spektral ayrıştırma yaklaşımı ile yoğunlaştırılmış güneş ışınımı ve Stirling motorlar hakkında literatür özetleri sunulmuştur. “Termodinamik Modelleme” bölümünde ise birinci ve ikinci yasa ilkeleri doğrultusunda tasarlanan bu yeni sistemin enerji ve ekserji modellemesi ortaya konmuştur. “Sistem Tanıtımı” bölümünde spektral ayrıştırma yaklaşımı ile yoğunlaştırılmış güneş ışınımından en etkin biçimde yararlanmayı amaçlayan ve Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde kurulan deney sistemi tanıtılmıştır. “Bulgular ve Tartışma” bölümünde, Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’ne kurulan deney düzeneğinden elde edilen veriler ve termodinamik modelleme doğrultusunda sistemin Stirling motor kısmının performansı ortaya konmuş, spektral ayrıştırma yaklaşımı incelenmiş, sistemin belirsizlik analizi yapılmış, sonuç olarak yeni tasarlanan bu sistemin performansına etki eden parametreler değerlendirilmiştir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, yaşam için en önemli kaynaklardan biridir. Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarına bakıldığında, bunların hemen hepsinin güneş kökenli olduğunu görürüz. Gün ışığı şeklinde Güneş'ten yayılan enerji dünyamızı aydınlatır. Fotosentez yoluyla Dünya üzerindeki hayatın hemen hemen tamamının var olmasını sağlar ve Dünya'nın iklimi ile hava durumu üzerinde önemli etkilerde bulunur.

Güneş 1.39×10^9 m çapa sahip yoğun sıcak gazdan oluşan bir küredür. Güneşin dünyadan uzaklığı 1.5×10^8 km olup güneş ışınları boşlukta 300.000 km/s hızla hareket ederek 8dk 20s de dünyamıza ulaşırlar. Dünyadan bakıldığında güneş halkası 32° lik bir açı oluşturur. Bu oran özellikle toplayıcılar için önemlidir. Çünkü toplayıcıların optik davranışlarının analizinde en küçük açılar bile etkilidir. Güneş 5760 K dış yüzey sıcaklığına sahiptir ve merkezine doğru inildiğinde sıcaklık daha fazla yükselmektedir. Bu sıcaklığın nedeni, güneşin, hidrojenin helyuma dönüştüğü sürekli bir füzyon reaktörü olmasından ötürüdür. Güneşten dışarıya verilen toplam enerji 3.8×10^{20} MW olup güneşin yüzeyinden metrekare başına 63 MW enerji çıkışı olmaktadır. Bu enerji dışarıya doğru bütün yönlere dağılır. Dünya, yayılan ışınımın 1.7×10^{14} kW lık küçük bir kısmını alır. Ancak bu yayılan ışınım değerinin 84 dk yansmasıyla bile dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayabileceği tahmin edilmektedir [5].



Şekil 2.1 Güneş ile dünya arasındaki ilişki [5]

Güneş ışınımının tamamı yeryüzüne ulaşmaz, % 30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının % 50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam

mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ışınma neden olur. Güneşten gelen ışınımın % 20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yeryüzüne gelen güneş ışınımının % 1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Dünya'ya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir [6].

Dünya üzerinde Türkiye, 36°-42° N enlemleri arasında yer almakta ve güneş kuşağı içerisinde bulunmaktadır. Yıllık ortalama güneşlenme süresi Türkiye'nin yıllık ortalama Güneş Işınımı 1303 kWh/m²yıl, ortalama yıllık güneşlenme süresi ise 2609 saat olup, yılın %29,8' ini oluşturmaktadır.

2.1 Güneş Enerjili Toplayıcıların Sınıflandırılması

Güneş toplayıcıları, güneş enerjili sistemlerin en önemli parçalarıdır. Güneşten aldığı ışınımı soğurarak ısı enerjisine çevirmekte ve içerisindeki dolaşımda bulunan akışkana aktarmaktadır. Toplayıcı içerisinde dolaşımda bulunan ısı transfer akışkanı olarak genellikle yağ, hava veya su kullanılmaktadır.

Güneş toplayıcıları basit olarak iki grupta toplanmaktadır. Birinci grubu sabit toplayıcılar, ikinci grubu ise yoğunlaştırılmış toplayıcılar oluşturmaktadır. Birinci gruptaki toplayıcılar güneşten gelen ışınları yüzeylerinde tutmaktadırlar. İkinci grup toplayıcılar ise konkav yüzeylerine gelen ışınları yansıtarak bir noktada birleştirip yüksek sıcaklık elde etmekte kullanılmaktadırlar.

Güneş toplayıcılarının kullanım alanlarının ayırt edilmesindeki bir diğer yöntem de yoğunlaştırma oranı olarak tanımlanmaktadır. Yoğunlaştırma oranı bir başka deyişle alansal odaklama oranı; yansıtıcı yüzey kesit alanının alıcı yüzey kesit alanına bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu oran büyüdükçe elde edilen sıcaklık değerleri artış göstermektedir. En düşük alansal odaklama oranı düz levhalı toplayıcılarda, en yüksek odaklama oranı ise heliostat sistemlerde elde edilebilmektedir. Güneş enerjisi toplayıcılarının hareket durumlarına göre sınıflandırılması alıcı tipi yoğunlaştırma oranı sıcaklık aralığı belirtilerek aşağıdaki çizelgede verilmiştir [5].

Çizelge 2.1 Güneş toplayıcılarının sınıflandırılması [5]

Hareket Durumu	Toplayıcı Tipi	Alıcı Tipi	Yoğunlaştırma Oranı	Sıcaklık Aralığı (°C)
Sabit	Düz levha	Düz	1	30-80
	Vakum tüplü	Düz	1	50-200
	Birleşik parabolik toplayıcı	Borulu	1-5	60-240
Borulu		5-15	60-300	
Tek eksenli izleme sistemi	Fresnel sistemli	Borulu	10-40	60-250
	Silindirik oluk	Borulu	15-50	60-300
	Parabolik oluk	Borulu	10-85	60-400
	Çift eksenli izleyici	Parabolik çanak yansıtıcı	Noktasal	600-2000
Heliostat sistemler		Noktasal	300-1500	150-2000

2.1.1 Sabit güneş enerjisi toplayıcıları

Bu tipteki toplayıcılar optimum bir performans elde edecek şekilde sabitlenmiş ve güneşi takibi yapmayan toplayıcılar olup üç ana grupta incelenebilir.

- 1- Düz levhalı toplayıcılar
- 2- Vakum tüplü toplayıcılar
- 3- Birleşik parabolik toplayıcılar [5]

2.1.1.1 Düz levhalı toplayıcılar

Düz levhalı toplayıcıların temel olarak, yutucu plaka saydam örtü ısı taşıyıcı borulardan oluşmaktadır. Güneş ışınları saydam örtüden geçerek yutucu plakaya gelir. Yutucu plaka ışınları büyük bir kısmını soğurarak elde ettiği ısıyı ısı taşıyıcı borulara aktarır. Yutucu plakanın kayıplarını azaltmak için ise plakanın arka kısmı yalıtım malzemesi ile kaplanır.

Bu tip toplayıcılarda ısı transfer akışkanının ulaşabildiği maksimum sıcaklık derecesi yaklaşık olarak 80°C dir. Isı taşıyıcı borular yutucu plaka üzerine aralıklı yerleştirilirler. Borular arasında kalan yutucu plaka yüzeyleri borulara tutturularak kanat işlevi görürler. Isı yutucu plaka yüzeylerinden borulara, oradan da suya aktarılır. Bu tip toplayıcılar için, yüksek ısı iletkenliği olan ve korozyondan etkilenmeyen bakır ve alüminyum malzemeler seçilir.

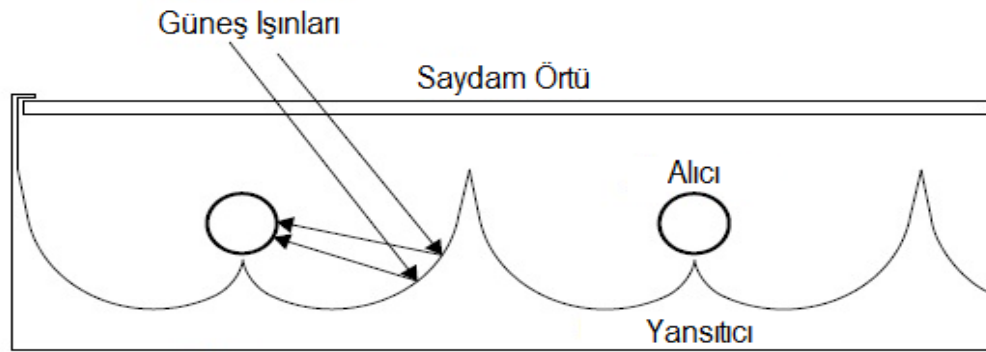
Saydam örtünün esas görevi, toplayıcıdan çevreye taşınım ile ısı kaybını azaltmak ve yutucu yüzeyi yağmur, dolu ve toz gibi dış etkenlerden korumaktır. Güneşten gelen ışınım kısa dalga boyludur, yutucu yüzeyden yansıyan ve yayılan ışınım ise uzun dalga boyludur. Bu yüzeyden saydam örtünün; kısa dalga boylu ışınımı geçirme oranının büyük, yutucu levhadan yayılan uzun dalga boylu ışınımı da geçirme oranının küçük olması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan örtü malzemesi yüksek geçirgenlik oranına sahip olmalı, yutma ve yansıtma oranları minimum olmalıdır [5].

2.1.1.2 Vakum tüplü toplayıcılar

Günümüzde vakum tüp teknolojisi, geleneksel düz levhalı toplayıcılardan daha iyi performansa sahiptir. Geliştirilen bu tasarım, bor camdan yapılmış vakumlu iki tabaka tüpten ve yutucu yüzeyden oluşur. Bu vakum bir termos gibi ısı enerjisiyi % 93'e kadar koruyarak, daha yüksek verim elde etmektedir. Elde edilen bu ısı enerjisi borular yardımı ile gerekli yerlere aktarılır. Yüksek enerji verimi ve dairesel yapıları sayesinde güneş ışığını gün boyu dik açı ile alırlar [5].

2.1.1.3. Birleşik parabolik toplayıcılar

Birleşik parabolik toplayıcılar gelen güneş ışınlarının büyük bir kısmını emici yüzeye yansıtan toplayıcılardır. Üstünde bulunan yansıtıcı yüzeyler sayesinde, parabolik açıklıktan gelen güneş ışınlarını toplayıcının alt kısmına yerleştirilen yutucu yüzeye aktarmaktadırlar. Yutucu yüzeyler, düz, kama, borulu, çift borulu gibi çeşitli türlerde olabilmektedir.

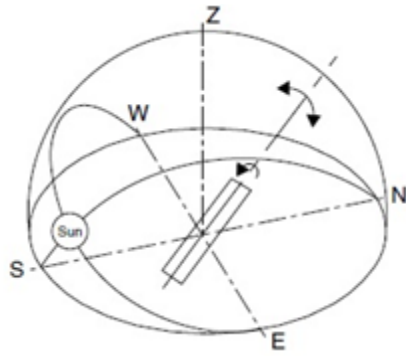


Şekil 2.1.1 Birleşik parabolik toplayıcıların şematik gösterimi [5]

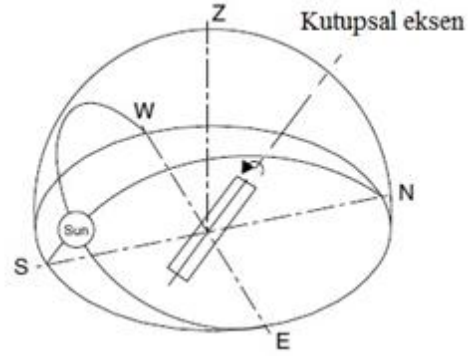
Birleşik parabolik toplayıcılar, üstünde bulundukları yansıtıcı yüzey sayesinde gelen güneş ışınının geniş açılarda yakalanmasını sağlarlar. Yansıtıcı yüzeyler parabolik yüzeye yerleştirilmiştir. Bu yansıtıcı yüzeye gelen herhangi bir açıdaki güneş ışınları, yansıtıcı yüzeyin parabolik olmasından dolayı yutucu yüzeye aktarılmasını sağlarlar. Birleşik parabolik toplayıcıların şematik gösterimi Şekil 2.1.1 sunulmuştur [5].

2.1.2. Güneş takip sistemli odaklı güneş toplayıcıları

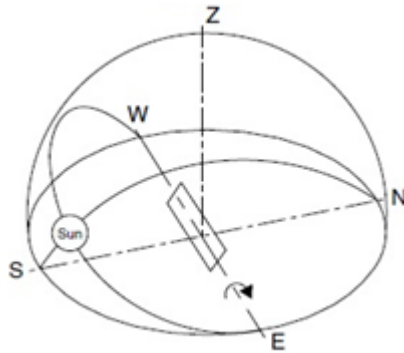
Güneş enerjisini bir noktaya veya bir yüzeye yansıtıp toplayan bu sistemler, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu sistemde ulaşılabilecek sıcaklık değerlerine, düz levhalı güneş toplayıcıları ile ulaşmak neredeyse imkansızdır. Güneş takip sistemli odaklı güneş toplayıcıları, birçok şekilde tasarlanabilir. Yansıtıcı yüzey parabolik veya silindirik, yutucu yüzeyler ise düz, silindirik, konveks veya konkav şeklinde olabilmektedir. Yutucu yüzeylerin üst kısımları açık ya da camla kaplanmış olabilmektedir. Yoğunlaştırma oranı, parabol açıklığı ile yutucu yüzey arasındaki oran olarak ifade edilmekte olup bu sistemlerin oranı yüksektir. Eğer sistem optik olarak uygun bir biçimde tasarlanmış ve konumlandırılmış olursa yoğunlaştırma oranı artırılıp istenilen yüksek sıcaklık elde edilebilir. Güneş takip sistemli toplayıcılarda güneş takip mekanizması iki tipte imal edilmektedir. Şekil 2.1.2'de görüldüğü gibi, bunlar tek eksenli takip, çift eksenli takip sistemleridir. Tek eksenli takip mekanizmasında sistem, sadece doğu batı doğrultusunda hareket etmektedir. Çift eksenli sistemlerde ise güneş ışınlarının en yoğun olduğu yöne doğru sistem kendini hareket ettirmektedir.



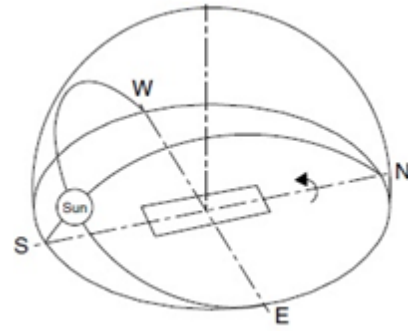
a) Çok yönlü izleme



b) Doğu- Batı kutupsal izleme



c) Kuzey -Güney yatay eksenli izleme



c) Doğu- Batı yatay eksenli izleme

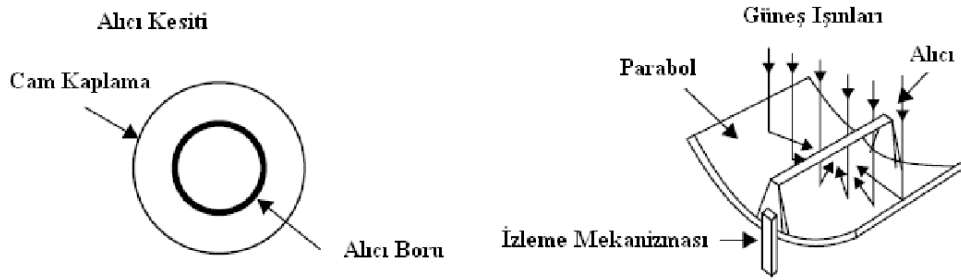
Şekil 2.1.2 Tek eksenli çift eksenli izleme sistemleri [5]

Odaklı güneş enerjisi sistemleri 4 gruba ayrılabilir;

- 1- Parabolik oluk tipi toplayıcı
- 2- Fresnel mercekler
- 3- Parabolik çanak
- 4- Heliostat sistemi [5]

2.1.2.1. Parabolik oluk tipi toplayıcılar

Parabolik oluklu toplayıcılarla, 400°C sıcaklığa ulaşılabilen ve 50°C–400° C sıcaklık aralığında verimli olarak çalışabilmektedir. Parabolik oluk tipi toplayıcılar yansıtıcı özelliğe sahip bir malzemenin parabolik şekilde bükülmesi ile imal edilmektedir. Üzeri cam örtü ile örtülü yutucu yüzey odak hattına doğrusal bir şekilde yerleştirilmiştir. Parabolik yüzeye gelen güneş ışınlarını yansıtarak soğurucu kısma aktarmaktadır. Odaklanmış güneş ışınları, yutucu yüzey tarafından emilerek, ısı enerjisi olarak çalışma akışkanına aktarılıp yararlı ısı enerjisi elde edilir. Parabolik oluk tipi toplayıcılarda güneşi tek eksenle izleme yeterli olabilmektedir. Parabolik oluklu toplayıcılara ait şematik gösterim, Şekil 2.1.3’de görülmektedir.



Şekil 2.1.3 Parabolik oluklu toplayıcıların şematik görünümü [5]

Parabolik oluk tipi toplayıcılar eğer doğu-batı ekseninde yerleştirilmişler ise güneş ışınlarını güney kuzey doğrultusunda, eğer sistem güney kuzey doğrultusunda yerleştirilmiş ise güneş ışınlarını doğu batı doğrultusunda izleyeceklerdir.

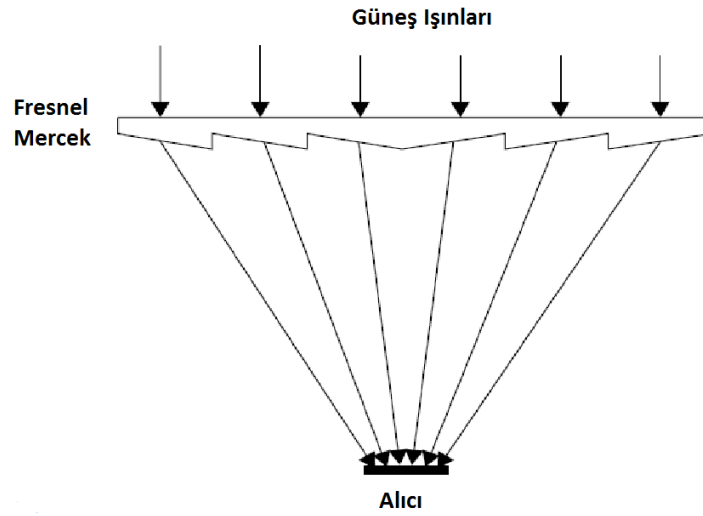
Parabolik oluk tipi toplayıcıların alıcı boru üzeri cam kaplama ile kaplanır. Bu kaplama sayesinde, alıcı borudaki ısı kaybı azaltılmaya çalışılmaktadır. Yalnız alıcı boru üzerinde bulunan cam örtüden dolayı sistemden yansıyan ışınlar tam olarak alıcı boruya ulaşamazlar. Alıcı boru ile cam örtü arasındaki ısı kaybını engellemek için iki malzeme arası vakumlanır. Bu tip toplayıcılarda alıcı borunun uzunluğu genellikle 25 ile 100 metre arasında değişmektedir. Parabolik oluklu toplayıcı uygulaması Şekil 2.1.4’de görülmektedir [5].



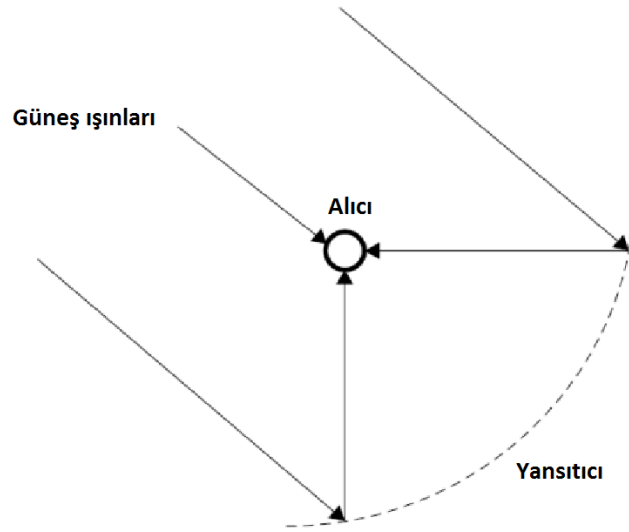
Şekil 2.1.4 Parabolik oluklu toplayıcı [5]

2.1.2.2. Fresnel mercekler

Fresnel toplayıcıların iki çeşidi mevcuttur. Bunlar Şekil 2.1.5 de gösterilen Fresnel mercekler ve şekil 2.1.6 de gösterilen Fresnel yansıtıcılarıdır.

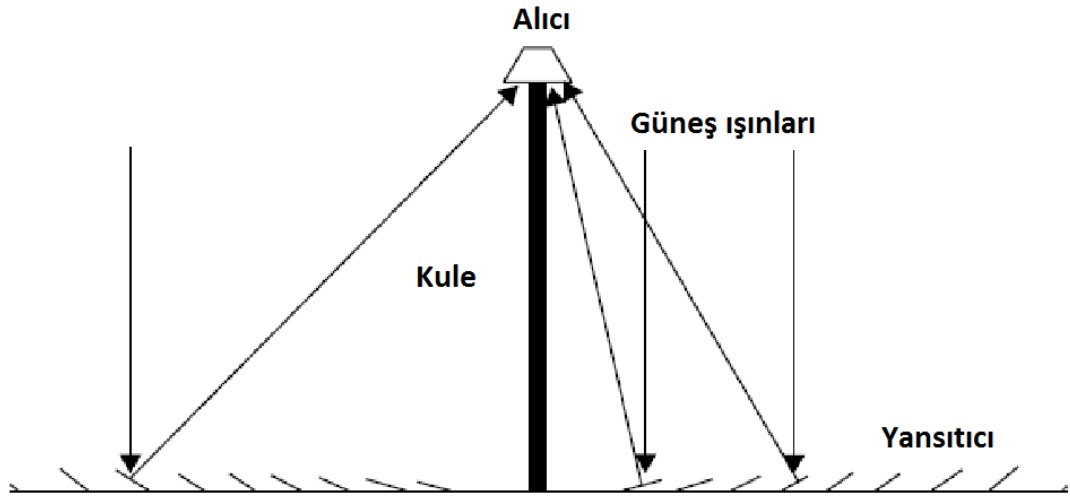


Şekil 2.1.5 Fresnel toplayıcı sistem şematik görünümü [5]



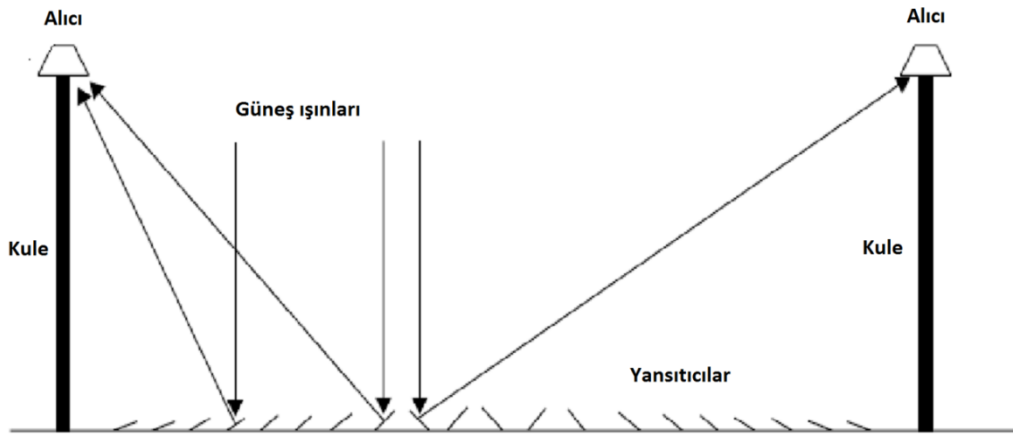
Şekil 2.1.6 Doğrusal fresnel yansıtıcı sistemin şematik görünümü [5]

Fresnel mercekler güneş ışınlarını içerisinden geçirip bir noktaya odaklayacak şekilde plastik malzemeden imal edilmiştir. Fresnel yansıtıcılar ise parabol yansıtıcılar gibi çalışır. Ancak parabol şeklinde olmasına gerek olmadan düz zemine monte edilerek üstünde alıcısı bulunan kuleye yoğunlaştırma yapabilmektedir. Şekil 2.1.7' de de temsili bir toplayıcı eleman gösterilmiştir. Bu durumda hareket ettirme zorunluluğu olmadan büyük bir soğurucu inşa edilebilir. Böyle bir sistemin en büyük avantajı parabolik cam reflektörlere göre düz, esnek ve daha ekonomik olmasıdır. Buna ek olarak sistem yere yakın kurularak yapısal gereksinimler azaltılabilmektedir.



Şekil 2.1.7 Frensel yansıtıcı sistemin örneğinin şematik görünümü [5]

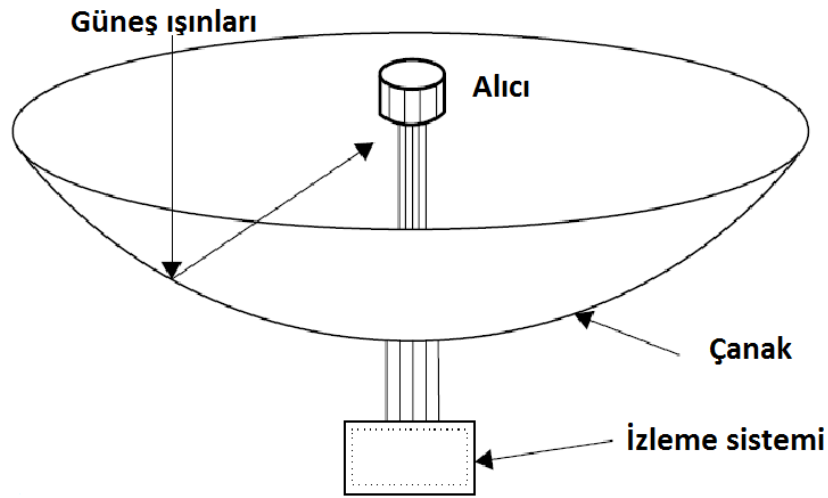
Frensel yansıtıcı sistemlerde dezavantaj olarak görülen diğer bir durum ise yansıtıcı yüzeylerin birbirlerini gölgelemeleridir. Yansıtıcı yüzeylerin birbirlerini gölgelemesini önlemek için yansıtıcılar birbirinden ayrı şekilde döşenmelidir. Ayrı şekilde döşendiği zaman ise yer sıkıntısı oluşturmaktadır. Bu durum kule yüksekliğini artırarak giderilebilir ancak bu da sistemin maliyetini arttırmaktadır. Bu istenmeyen durumu giderebilmek için iki ayrı alıcı kule tasarımı yapılabilmektedir. Sistem şematik olarak, Şekil 2.1.8'de görülmektedir [5].



Şekil 2.1.8 Frensel yansıtıcı sistemin örneğinin şematik görünümü [5]

2.1.2.3. Parabolik çanak toplayıcılar

Parabolik çanak toplayıcılar iki ekseninde de hareket yapabilen ve güneş ışınlarını çanak kısmının ortasında toplayan, odaklamayı noktasal olarak yapan sistemlerdir. Alıcı kısım, odaklanmış güneş ışınlarının sistem içerisindeki akışkana termal enerji olarak aktarılmasını sağlamaktadır. Bu sistemler genellikle elektrik üretiminde kullanılmaktadırlar. Sistem, şematik olarak Şekil 2.1.9'da görülmektedir.



Şekil 2.1.9 Parabolik çanak yansıtıcı şematik gösterimi [5]

Parabolik çanak yansıtıcılarla çalışma akışkanına aktarılan ısı enerjisi 1500° ve üzerine ulaşabilmektedir. Parabolik çanak yansıtıcılar her zaman güneş ışınlarını tek noktaya en uygun güneşlenme açısı ile aldıklarından verimi en yüksek güneş enerjisi sistemleridir. Bu sistemler 600 ila 2000 arasındaki yoğunlaştırma oranına ulaştıkları için yüksek termal verime sahiptirler. Toplayıcı ve alıcı kısımları çeşitli malzemelerden yapılabildiklerinden malzeme seçiminde esnek koşullara sahiptirler. Bu sistemin örnek bir resmi Şekil 2.1.10'da görülmektedir [5].



Şekil 2.1.10 Parabolik çanak ve Stirling motoru [5]

2.1.2.4. Heliostat sistemler

Çevresinde bulundurduğu yansıtıcı aynalar sayesinde güneş ışınlarını bir noktada toplayan sisteme heliostat sistemler adı verilir. Yoğunlaştırma oranları 300 ila 1500 arasında olduğundan sistemin enerji verimliliği yüksektir. Termal enerji depolama açısından üstünlükleri bulunmaktadır. Elde edilen güç bakımından diğerlerine göre fazla olduğu için, ekonomik açısından diğer sistemlere göre üstünlükleri mevcuttur. Heliostat sistemli güneş enerjisi santrali Şekil 2.1.11’de görülmektedir [5].



Şekil 2.1.11 Heliostat sistem [5]

2.2 Yoğunlaştırıcı Toplayıcıların Analizleri

Bu bölümde yoğunlaştırıcı güneş enerjisi toplayıcıların geometrisi, karakteristikleri, optik ve ısıl performansları ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. Bu bölümde sunulan bilgiler, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi için önemli bir temel niteliğinde olup, tasarım, boyutlandırma ve performans değerlendirmesi için dikkate değer bir başvuru kaynağı oluşturmaktadır.

Birçok çalışmada düzlemsel toplayıcılarla elde edilebilecek enerjiden çok daha yüksek enerji yoğunluğu istenir. Enerji dağılımındaki sıcaklık, ısı kaybı oluşturan alanların azaltılması ile arttırılabilir. Böyle yüksek enerji yoğunluğu elde etmek isteniyorsa eğer güneş enerjisinin yoğunlaştırılması gerekir [7].

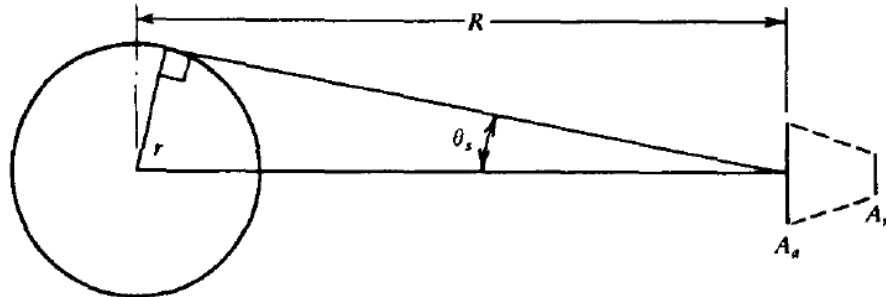
2.2.1 Yoğunlaştırma Oranı

Yoğunlaştırma oranının en yaygın tanımı, alan yoğunlaştırma oranı, açıklık alanının, alıcı alanına oranı olarak tanımlanır. Akı yoğunlaştırma oranı ise alıcıya gelen ortalama enerji akısının, açıklığa gelen akıya oranıdır. Bununla birlikte bölgesel yoğunlaştırma oranı, alıcının herhangi bir noktası için tanımlanır.

Alan yoğunlaştırma oranı

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad 2.2.1$$

Bu oran bir üst sınıra sahiptir. Bu üst sınırdaki yoğunlaştırmanın üç boyutlu (paraboloid gibi) ya da iki boyutlu (çizgisel) olmasına bağlıdır.



Şekil 2.2.1 T_s sıcaklığında, açıklık alanı A_a , alıcı alanı A_r , güneşten uzaklığı R olan yoğunlaştırıcının şematik gösterimi [7]

Şekil 2.2.1 de gösterildiği gibi, açıklık alanı A_a , alıcı alanı A_r olan dairesel bir yoğunlaştırıcı ele alalım. Güneş siyah bir cisim olmasa da, yaklaşık bir analiz için T_s sıcaklığında siyah cisim olarak düşünülebilir. Böylece güneşten dünyadaki herhangi bir alıcıya olan ışımla ısı transferi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q_{s \rightarrow r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad 2.2.2$$

İdeal bir alıcı $A_r T_r^4$ e eşit bir enerji yayınlar ve bu $E_{r \rightarrow s}$ nin bir bölüntüsüdür.

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r \rightarrow s} \quad 2.2.3$$

T_r ve T_s eşit olduğunda termodinamiğin II. Yasası $Q_{s \rightarrow r}$ ve $Q_{r \rightarrow s}$ nin de eşit olması gerektirir. Eşitlik 2.2.2 ve 2.2.3 ten

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r \rightarrow s} \quad 2.2.4$$

$E_{r \rightarrow s}$ nin maksimum değeri tek olduğundan, dairesel yoğunlaştırıcılar için maksimum yoğunlaştırma oranı:

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{dairesel, \max} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad 2.2.5$$

Benzer olarak lineer yoğunlaştırıcılar için

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{lineer, \max} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad 2.2.6$$

Böylelikle $\theta = 0,27^\circ$ ise, maksimum yoğunlaştırma oranı dairesel yoğunlaştırıcılar için 45000, çizgisel yoğunlaştırıcılar için 212 olacaktır. Enerjinin iletilerek yüksek sıcaklıklara ulaşılması için, hem yüksek yoğunlaştırma oranı hem de yoğunlaştırma ve yönlendirme sistemleri için optik kusursuzluk gerekir [7].

2.2.2 Yoğunlaştırıcıların Isıl Performansı

Yoğunlaştırıcıların performans hesabı, düzlemsel toplayıcıların ısı performans hesabı ile genel olarak aynıdır. Birim açıklık alanı tarafından soğurulan ışınlam (S), ışınlam ve yoğunlaştırıcı ile alıcının optik karakteristikleri kullanılarak tahmin edilmelidir. Alıcılardaki ısı kayıpları tahminlenmelidir. U_L kayıp katsayısı genellikle alıcının yüzey alanına bağlıdır. Alıcıdaki sıcaklık eğilimi akış faktörü F_r ile ölçümlenir.

Alıcılardaki ısı kayıplarının hesaplama yöntemi, düzlemsel toplayıcılarınkı kadar kolay değildir. Yoğunlaştırıcı toplayıcılar düzlemsel toplayıcılara göre, alıcılarındaki şekil ve tasarımları farklıdır, ulaştıkları sıcaklıklar fazladır, tasarımları zordur. Bu yüzden ısı kayıplarının hesaplanması için yoğunlaştırıcı toplayıcılarda düzlemsel toplayıcılar gibi tek bir genel yöntem vermek zordur.

Yoğunlaştırıcı alıcıların ısı kaybının karakteri, düzlemsel güneş enerjisi toplayıcılarınkı gibidir. Alıcılar geçirgen bir örtü ile kaplı olabilmektedir. Bu durumda yutucudan dışarıya olan ısı kaybı taşınım ve ışınlamla olmaktadır. Düzlemsel toplayıcılarda olduğu gibi, kayıplar gelen ışınlam yoğunluğundan bağımsız olarak hesaplanabilmektedir.

Isıl analiz yapabilmek için gerekli olan değerler; toplayıcı verim katsayısı F , ısı kayıp katsayısı U_L , toplayıcının ısıyı çekme faktörü F_R 'dir. F_R ve U_L bilindiğinde, toplayıcı kazancı düzlem toplayıcılarınkı gibi hesaplanabilir.

Isıl kaybı U_L 'nin hesaplanması için bir örnek verelim. Alıcı olarak kullanılabilen örtüsüz, silindirik vakum tüpü varsayalım. Bu durumda alıcı için toplam kayıp katsayısı:

$$U_L = h_w + h_r + U_{cond} \quad (2.2.7)$$

Lineerleştirilmiş ışınlam katsayısı:

$$h_r = 4\sigma\bar{\varepsilon}\bar{T}^3 \quad (2.2.8)$$

Burada \bar{T} ışınlam için ortalama sıcaklıktır, ε ise soğurucu yüzeyin yutuculuğudur. Eğer akış yönündeki sıcaklık değerlerinin büyüklüğü nedeniyle h_r için tek bir değer

kabul edilemezse, toplayıcı her biri h_r katsayılarına sahip 2 ya da 3 parçaya bölünmüş gibi kabul edilebilir.

Taşınım ile ısı kaybı hesabında, silindirler için h_w aşağıdaki bağıntı ile tahminlenebilir:

$$h_w = \frac{8,6V^{0,6}}{L^{0,4}} \quad (2.2.9)$$

olup rüzgar hızı V , tüpün uzunluğu L dir. İletim kayıpları tahmini, toplayıcının ölçümleri ya da konstrüksiyonun ayrıntıları temel alınarak yapılmalıdır.

Çizgisel yoğunlaştırıcılarda vakum tüplerinde silindirik soğurucu bulunmaktadır. Bu geometride ışıınım katsayısı h_r eşitlik 2.2.8 ile hesaplanabilir. Eğer silindir vakumlanmış ise taşınım katsayısı $h_{c,r}$ ihmal edilebilir. Bu durumda toplam kayıp katsayısının soğurucu yüzey alanına bağlı değişimi şöyle verilebilir:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (2.2.10)$$

U_L hesaplandıktan sonra, T_c örtüdeki enerji balansı ile kontrol edilir. Eğer örtü tarafından soğurulan ışıınım ihmal edilirse, enerji dengesi

$$A_c(h_{r,c-a} + h_w)(T_c - T_a) = A_r h_{r,r-c}(T_r - T_c) \quad (2.2.11)$$

bağıntısı ile verilir. Örtü sıcaklığı ise;

$$T_c = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_c (h_{r,c-a} h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_c (h_{r,c-a} h_w)} \quad (2.2.12)$$

olarak bulunur. Eğer gerekirse, T_c 'yi bulmak için ikinci bir iterasyon yapılır. Örtü tarafından soğurulan ışıınımın ya da soğurucudan örtüye taşınım ile ısı transferin hesaplanması gerekirse, Eşitlik 2.2.11 te uygun terimler hesaplanır [7].

2.2.3 Yoğunlaştırıcıların Optik Performansları

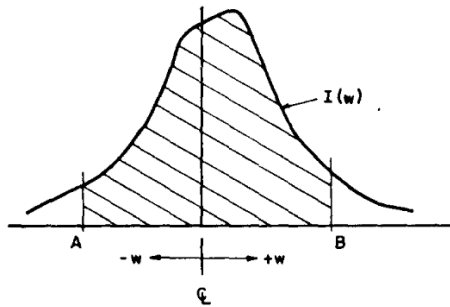
Yoğunlaştırıcıların optik özellikleri, geometrilerine bağlı olarak değişir. Bu bölümde verilecek olan kavramlar tüm yoğunlaştırıcılar için kullanılabilir. Gölgesiz bir açıklık alanının birim yüzeye soğurduğu ışınım S aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$S = I_b \rho (\gamma \tau \alpha) K_{\gamma \tau \alpha} \quad (2.2.13)$$

Buradaki τ , alıcıdaki herhangi bir örtü sisteminin geçirgenliğidir. α , yansıtılmış ya da geçirilmiş ışınım için yutucunun soğuruculuğudur. $K_{\gamma \tau \alpha}$ gelme açısını düzeltir ve açıklığa gelen ışınımın gelme açısının normalinden hesaplama yapmak için kullanılır.

Düşük yoğunlaştırma oranına sahip toplayıcılar dışında, açıklık düzlemine gelen etkin ışınım (I_b) tüm toplayıcılar için yalnızca direkt ışınımdır. Düşük yoğunlaştırma oranına sahip sistemler için, difüz ışınım da alıcıya yansıtılacaktır ancak bunun miktarı yoğunlaştırıcının alma açısına bağlıdır.

ρ yoğunlaştırıcının yüzey malzemesinin yansıtıcılığıdır. Eğer toplayıcı silindirik soğurucuları ise difüz yansıtıcılık indisi, yoğunlaştırıcı kırıcı ise, o halde ρ kırıcılık geçirgenliği olacaktır. Diğer üç faktör ise γ, τ ve α olup, bunlar açıklığa gelen ışınımın açısına bağlıdır.



Şekil 2.2.2 Lineer noktasal yoğunlaştırıcı odak düzlemindeki akı dağılımına bir örnek [7]

γ , kesme faktörü, alıcının soğurma yüzeyinde yansıtılan, ışımının bir oranıdır. Bu kavramın tanımlanması noktasal yoğunlaştırıcı toplayıcılar için yararlıdır. Eğer Şekil 2.2.2 de görüldüğü gibi alıcı A dan B ye genişletilirse; kesme faktörü

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(y)dy}{\int_{-\infty}^{\infty} I(y)dy} \quad (2.2.14)$$

olarak hesaplanır. Yoğunlaştırıcı sistemlerin kullanımındaki amaç, soğurucu alanın küçültülerek, buradaki ısı kaybının azaltılmasıdır. Noktasal yoğunlaştırıcı toplayıcıların çoğu, yansıyan ışımının büyük bir bölümünü kesmek için yeterince geniş alıcılarla yapılır; fakat görüntülerin düşük yoğunluklu uçlarını kesmek için yeterince geniş değildir [7].

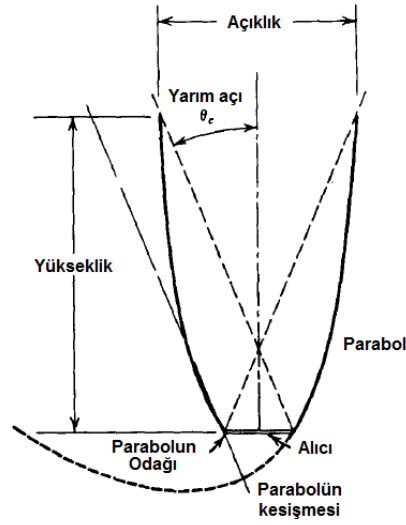
2.2.4 Odaklama geometrisi

Yoğunlaştırıcılar odaklama türlerine göre, çizgisel ve noktasal olmak üzere iki grupta incelenirler.

2.2.4.1 Çizgisel yoğunlaştırıcıların optik özellikleri

Yoğunlaştırıcılar mevsimsel ya da yıllık çerçevede güneşi en az izleme gereksinimi duyacak şekilde tasarlanabilir. Çizgisel yoğunlaştırıcıların çok geniş bir sınır açısıyla açıklığa gelen ışınımı yansıtma kapasitesi vardır. Bu geniş açıklık, yoğunlaştırıcının alış açısı olarak tanımlanır. Alış açısı içinde gelen tüm ışınım alıcıya yansıtılır.

Çizgisel yoğunlaştırıcıların en çok kullanılan çeşidi Birleşik Parabolik Yoğunlaştırıcılar (CPC)'dir. Oluk tipi yoğunlaştırıcılar kadar kullanışlıdır. CPC ana hatlarıyla Şekil 2.2.3 de gösterilmektedir.



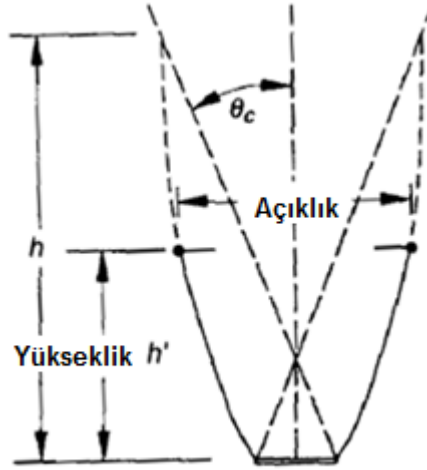
Şekil 2.2.3 Birleşik parabolik yoğunlaştırıcıların kesit görünüşü [7]

CPC nin kenarları paraboldür. Her parabol yüzeyi CPC nin eksenine paralel oluncaya kadar genişler. CPC eksenine açıklığın karşı kıyısındaki parabollerden birinin odak bağlantı çizgisi arasındaki açı yarı alışı açısı θ_c dir. Eğer yansıtıcı ideal ise, açıklığa $\pm \theta_c$ yarı alışı açısı ile gelen her ışınım alıcıya yansıtılacaktır.

Bu tip toplayıcılar için alan yoğunlaştırma oranı, yarı alışı açısının bir fonksiyonudur. İdeal bir iki boyutlu sistem için yoğunlaştırıcı oranı aşağıdaki gibi verilir:

$$C_i = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad 2.2.15$$

Düzlem alıcılı CPC'lerde yansıtıcı ve alıcı arasında boşluk olmalıdır. Bu durum yansıtıcının, alıcıdan ısı taşıyan bir kanat rolü oynamasını engellemek içindir. Boşluk yansıtıcı alanında bir kayba neden olur ve buna bağlı olarak performansta da azalma meydana gelir. Bu nedenle boşluk küçük tutulmalıdır.



Şekil 2.2.4 Birleşik parabolik yoğunlaştırıcıların tam kesit görünüşü [7]

İki kanat arasına konulan düzlem alıcı da önemlidir. Farklı alıcı şekilleri de kullanılabilir. L uzunluğundaki açıklık, $\pm\theta_c$ açıları arasında gelen ışınım $L \sin \theta_c$ yayına sahip tümsek bir soğurucu yerleştirilebilir [7].

2.2.4.2 Çizgisel Odaklı Yoğunlaştırıcı Geometrisi

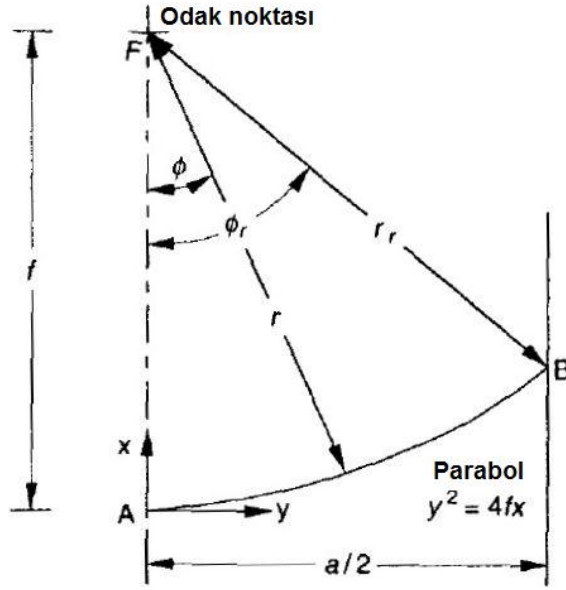
Orta yoğunlaştırma oranına sahip parabolik çizgisel odaklı yoğunlaştırıcılar deneysel ve analitik olarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiş olup ve 100-500°C sıcaklık aralığında çalışırlar. Bu yoğunlaştırıcılarda kullanılan alıcı silindirik ve vakum kaplıdır.

Bu yoğunlaştırıcıların nasıl çalıştığını anlamak için yoğunlaştırıcının ve görüntünün (odak çevresinde ışınım akışının dağılımı) optik özelliklerinin tanımlanması gerekir. Bu tip yoğunlaştırıcılar için gölgesiz birim açıklık alanında soğurulmuş ışınım Eşitlik 2.2.13'de verilmiştir. S' 'yi değerlendirmek için, yansıtıcı tarafından oluşturulan görüntünün karakteristiklerini bilmek gereklidir.

Şekil 2.2.5'de koordinat sisteminde çizgisel odaklı parabolik yoğunlaştırıcıların kesiti verilmiştir. Bu koordinat sisteminde parabol denklemi aşağıdaki gibi verilir:

$$y^2 = 4fx$$

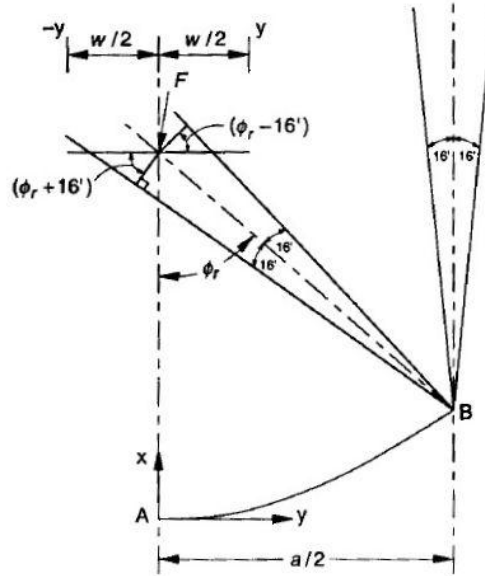
2.2.15



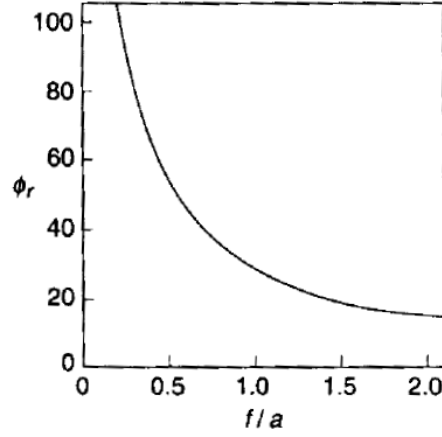
Şekil 2.2.5 Noktasal parabolik yoğunlaştırıcının kesiti [7]

Şekilde açıklık çapı a , odak uzunluğu f ile gösterilmiştir. Şekil 2.2.5' teki ışın demeti maksimum r_r ayna yarıçapının olduğu kenardaki B noktasında yansıtıcıya gelmektedir. ϕ_r Kenar açısı ise;

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left(\frac{a}{2r_r} \right) \quad 2.2.16$$



Şekil 2.2.6 Lineer toplayıcılar için odakta oluşan görüntünün boyutu [7]

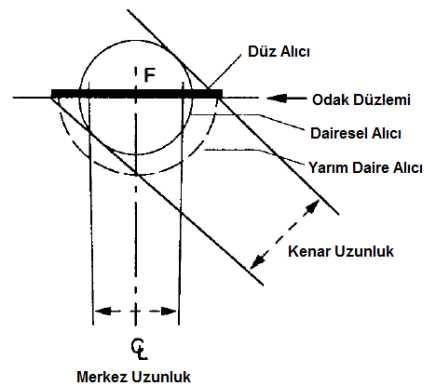


Şekil 2.2.7 Açıklık-Odak uzaklığı oranının fonksiyonu olan olarak ϕ_r [7]

Şeklinde ifade edilir. Şekil 2.2.7'te ϕ_r , f/a 'nın fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Parabolik yansıtıcının herhangi bir noktasında r yerel ayna yarıçapı aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \theta} \quad 2.2.17$$

Güneş ışınımı, $0,53^\circ$ lik açisal genişlik oluşturan bir koni oluşturur. İncelemelerde yoğunlaştırıcı simetrik ve direkt ışınımın açıklığa normal geldiği kabul edilir. Bu nedenle yoğunlaştırıcıya gelen direkt ışınım, parabolün düzlemine paraleldir.



Şekil 2.2.8 Merkezden ve kenarlardan yansıyan ışınım [7]

Şekil 2.2.8, odak bölgesinin genişliğinin parabolün kenarından yansıyan ışınımı nasıl belirlediğini gösterir. Odak düzlemindeki güneş görüntüsünün genişliği, kenar açısı

arttıkça artar. Diyagramdan görüldüğü üzere, bu alıcıların herhangi birinin yüzeyine gelen ışımın açısı şekle bağlı olarak değişir. Silindirik alıcının çapı D ise

$$D = 2r_r \sin 0.267 = \frac{a \sin 0.267}{\sin \phi_r} \quad 2.2.17$$

Parabolün odak düzlemindeki düzlem alıcı için (Şekil 2.2.8'te gösterildiği gibi F boyunca y-z düzlemi) genişlik W

$$W = \frac{2r_r \sin 0.267}{\cos (\phi_r + 0.267)} = \frac{a \sin 0.267}{\sin \phi_r \cos (\phi_r + 0.267)} \quad 2.2.18$$

W aynı zamanda, yarı dairesel alıcının çapıdır.

Düzlem alıcı için ϕ , 0 dan ϕ_r ye kadar değişir, r f den r_r ye kadar artar ve odak düzlemindeki teorik görüntü boyutu D den W ye artar. Odak uzunluğu, görüntü boyutundaki belirleyici faktördür ve açıklık toplam enerjide belirleyici faktördür. Bu nedenle bir odaklayıcı sistemin alıcısında enerji akısının yoğunlaştırılması ya da görüntü parlaklığı, a/f oranının fonksiyonu olacaktır [7].

2.2.5. Paraboloidal Yoğunlaştırıcılar

Parabolik toplayıcıların eksen doğrultusu Şekil 2.2.5 ve 2.2.6 da sunulmuştur ve ϕ_r kenar açısı, r ayna yarıçapı lineer toplayıcılarla benzerlik göstermektedir. Bu tip toplayıcılardaki dağılım, toplayıcıların izleme sistemi hataları ihmal edilerek

$$W = \frac{2r_r \sin (0.267 + \delta/2)}{\cos (\phi_r + 0.267 + \delta/2)} \quad 2.2.19$$

olarak hesaplanır.

Küresel alıcılar için minimum gölgelenme durumunda, yoğunlaştırma oranı:

$$C_{max} = \frac{\sin^2 \phi_r}{4 \sin^2 (0.267 + \delta/2)} - 1 \quad 2.2.20$$

Düz alıcılar için

$$C_{max} = \frac{\sin^2 \phi_r \cos^2 (\phi_r + 0.267 + \delta/2)}{4 \sin^2 (0.267 + \delta/2)} - 1 \quad 2.2.21$$

Bağıntıları ile hesaplanır.

Soğurmayı arttırmak ve taşınım ile ısı kayıpları azaltmak için çukur alıcılar paraboloidal yoğunlaştırıcılarla kullanılabilirler. Çukur alıcıların soğuruculuğu kullanılarak aynı hesaplama yöntemleri izlenebilir.

Soğurulan enerji hesabı, çizgisel odaklı parabolik yoğunlaştırıcılarla aynı özelliktedir. Paraboloidal toplayıcılarla daha yüksek yoğunlaştırma oranlarına ulaşılabilir. Örtücü yüzeyler genellikle kullanılmaz. Örtü olmadığında gölgesiz açıklık alanında soğurulan enerji

$$s = I_{b,a} \rho(\gamma\alpha)_n K_{\gamma\alpha} \quad 2.2.22$$

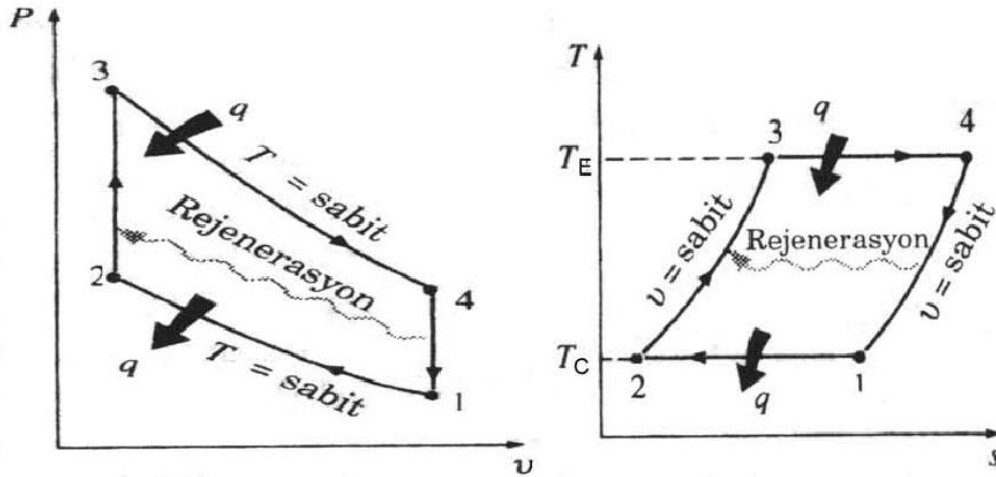
bağıntısı ile verilir [7].

3. STIRLING MOTORLAR

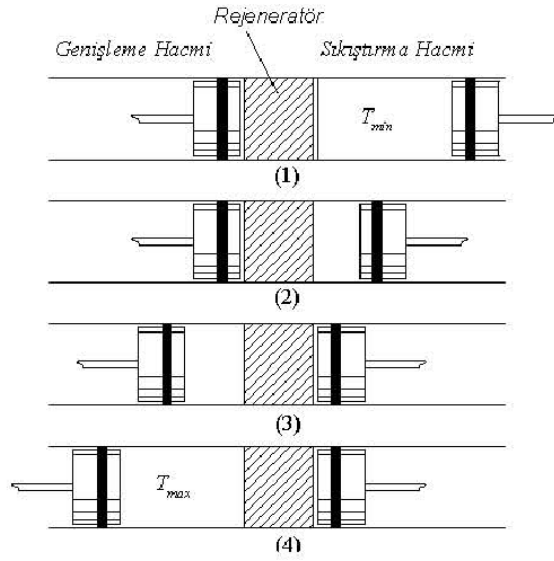
Stirling motoru, sıcak hava motoru olarak da bilinir. Dıştan yanmalı motorlu bir ısı makinesi tipidir. Isı değişimi prosesi, ısının mekanik harekete dönüşümünün ideal verime yakın olmasına izin verir.

3.1 Stirling Çevrimi

Stirling makinesi pistonlar tarafından akışkanın sıkıştırılıp genişlediği genişleme ve sıkıştırma hacimleri ile bu hacimler arasındaki bir rejeneratörden meydana gelir. Rejeneratör ısı alan ve daha sonra veren gözenekli bir metal parçadır. Bu şekildeki bir Stirling makinesinin çalışma prensibini gösteren şematik diyagram Şekil 3.1.1.'de görülmektedir. Rejeneratörle sol taraftaki piston arasındaki hacim, genişleme hacmi olarak bilinir ve bu hacim yüksek sıcaklık, T_{\max} 'ta tutulur. Rejeneratörün sağdaki hacim ise sıkıştırma hacmidir ve düşük sıcaklık T_{\min} de tutulur.



Şekil 3.1.1 Stirling termodinamik çevrimi [8]



Şekil 3.1.2 Stirling çalışma prensibi [8]

Stirling makinesinde rejeneratör boyunca bir sıcaklık farkı ($T_{max}-T_{min}$) mevcuttur ve ideal çevrimde aksenel ısı iletimi ihmal edilir. Carnot çevriminde de olduğu gibi pistonların sürtünmesiz hareket ettiği ve pistonlar arasındaki çalışma akışkanı kaçağı olmadığı kabul edilir.

Şekil 3.1.2’de de görüldüğü gibi başlangıçta sıkıştırma hacmi pistonu üst ölü noktada ve genişleme hacmi pistonu rejeneratör yüzeyine yakın üst ölü noktadır. Dolayısıyla çalışma akışkanı soğuk sıkıştırma hacminde bulunur. Bu durumda hacim maksimum, basınç ve sıcaklıklar minimum değerdedir.

1-2 sabit sıcaklıkta sıkıştırma sürecinde, sıkıştırma pistonu üst ölü noktaya doğru hareket ederken, genişleme pistonu hareketsiz kalır. Çalışma akışkanı sıkıştırma hacminde sıkıştırılır ve basınç artar. Q_s ısıyı sıkıştırma hacminden çevreye sabit sıcaklık şartlarında atılır.

2-3 sabit hacim sürecinde, sıkıştırma pistonu rejeneratöre doğru hareket ederken genişleme pistonu rejeneratörden uzaklaşır. Dolayısıyla, çalışma akışkanı, rejeneratörün gözenekli metal ortamı üzerinden sıkıştırma hacminde doğru akar. Çalışma akışkanı rejeneratörden geçerken sıcak metal ortamdan olan ısı transferi ile sıcaklığı T_{min} 'den T_{max} 'a yükselir. Sabit hacimde metal ortamdan geçerken sıcaklıkta meydana gelen artış, basınçta da artışa neden olur.

3-4 sabit sıcaklıkta genişleme sürecinde, genişleme pistonu alt ölü noktaya doğru hareketine devam ederken, sıkıştırma pistonu rejeneratörün bitişiğinde, üst ölü noktada hareketsiz kalır. Genişleme pistonu hareketine devam ederken, hacim artar ve basınç azalır. Bu esnada sisteme sabit sıcaklık şartlarında Q_g ısı aktarılır.

4-1 sabit hacim sürecinde, her piston tarafından çalışma akışkanının genişleme hacminden, gözenekli rejeneratörden geçerek sıkıştırma hacmine aktardığı çevrimin en son sürecidir. Metal ortamdan geçiş esnasında, çalışma akışkanından matrise ısı transfer edilir, çalışma akışkanı sıcaklığı düşer ve sıkıştırma hacminde akışkanın sıcaklığı T_{min} olur [9].

3.2 Stirling Motor Tipleri

Stirling motorlarını sınıflandırırken çalışma maddesinin nasıl kontrol edildiği tanımlayıcı bir özelliktir. Stirling motorlarında akış, valf ve hacim değişimi olmak üzere iki şekilde kontrol edilebilir.

Stirling motorları genel olarak kendi aralarında tek etkili ve çift ekli motorlar olarak iki ana grupta sınıflandırılırlar [10].

3.2.1 Tek Etkili Stirling Motorları

Tek etkili Stirling motorları aynı veya farklı silindirlerde olmak üzere, genişleme ve sıkıştırma hacimleri ile bunları birleştiren bir ısı değiştirgecinden meydana gelir. Tek etkili Stirling motorlarında çalışan elemanların her ikisi de piston olabileceği gibi, biri piston, diğeri yer değiştirme pistonu (displacer) olabilir.

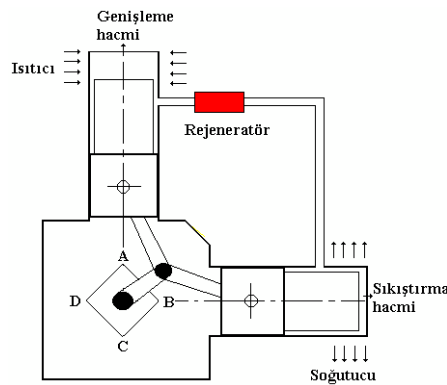
Piston-yer değiştirme pistonlu tip Stirling motorlarında güç pistonunun üst ve alt yüzeyleri arasında büyük basınç farkı vardır. Yer değiştirme pistonunun ise üst ve alt yüzeyleri arasında aerodinamik akış kayıplarından başka basınç farkı yoktur.

Pratikte Stirling motorlarının çalışma prensibi modelden modele farklılık göstermektedir. Herhangi bir model için yapılan açıklama diğeri bir model için yeterli fikir vermemektedir. Bu sebeple bu kısımda Alfa, Beta ve Gama tipi motorların çalışma prensipleri ayrı ayrı açıklanmaktadır.

3.2.1.1. Alfa Tipi Stirling Motoru

Alfa (α) tipi motorlarda birbirinden ayrı iki silindir, ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratör vasıtasıyla birbirine birleştirilmiştir. Silindirler V şeklinde düzenlenebildiği gibi, birbirine paralel yan yana da olabilir. Çalışma maddesinin bir çevrim oluşturacak biçimde soğuk ve sıcak silindirler arasında sirkülasyon yapmasını sağlamak için pistonlar birbirine göre 90° 'lik faz farkı ile hareket ettirilmektedir. Bu faz farkı V tipi motorlarda silindirlerin birbirlerine göre 90° 'lik dik açı ile birleştirilmesi sayesinde gerçekleştirilmektedir. Eğer silindirler paralel olarak yerleştirilmişse, pistonlar krank milinde bulunan ve aralarında 90° 'lik açı olan iki ayrı muylu ile hareket ettirilmektedir [10-12].

Şekil 3.2.1'te Alfa tipi bir Stirling motorunun temel parçaları ve çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Her iki biyel kolu krank mili üzerinde bulunan tek bir kol muylusundan hareket almaktadır. Kol muylusu A noktasında iken sıcak silindirin pistonu üst ölü nokta (ÜÖN)'da bulunmakta olup aşağıya dönme pozisyonundadır. Soğuk silindirin pistonu ise silindirin ortalarında olup ÜÖN'ya doğru hareket etmektedir. Kol muylusu A noktasından B'ye geldiğinde soğuk silindirin pistonu ÜÖN'ya ulaşır. Sıcak silindirin pistonu ise silindirin ortasına gelir. Bu süreçte soğuk silindirdeki çalışma maddesi hacmi değişmemek şartıyla sıcak silindire aktarılmıştır. Geçiş esnasında rejeneratör ve ısıtıcıdan ısı alarak sıcaklığını yükseltmiştir. Sonuç olarak bu işlem sabit hacimde durum değiştirme işlemidir.



Şekil 3.2.1 Alfa tipi motorun temel parçaları ve çalışma prensibi [11]

Kol muylusu B noktasından C'ye giderken her iki piston aşağıya doğru hareket eder. Kol muylusu C'ye geldiğinde çalışma maddesinin çoğunluğu sıcak silindirde, bir miktarı da soğuk silindirde bulunmaktadır. Bu işlem esnasında çalışma maddesinin çoğunluğu sıcak silindirde genişlediğinden sıcak silindirin cidarlarından ısı olarak sıcaklığını korumaya çalışır. Bu sebeple bu işlem sabit sıcaklık altında genişleme kabul edilmektedir.

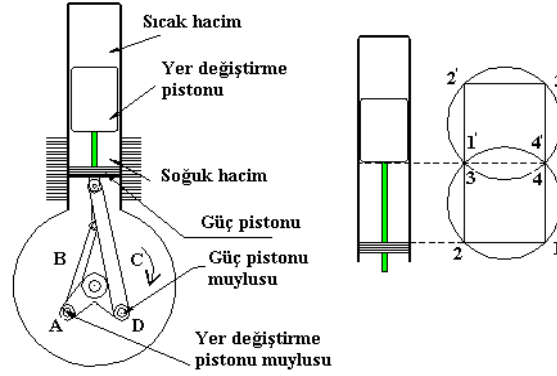
Kol muylusu C noktasından D'ye giderken soğuk silindirin pistonu alt ölü nokta (AÖN)'ya doğru, sıcak silindirin pistonu ise ÜÖN'ya doğru hareket etmektedir. Bu işlem esnasında iki silindirin toplam hacmi değişmemektedir. Sıcak silindirdeki hacim azalması kadar soğuk silindirde hacim genişlemesi olmaktadır. Kol muylusu D noktasına ulaştığında sıcak silindirde bulunan çalışma maddesinin yarısı hacim değişmemek şartıyla soğuk silindire aktarılmaktadır. Sonuç olarak kol muylusunun C'den D'ye hareketi sabit hacimde soğutma işlemini gerçekleştirmektedir.

Kol muylusu D noktasından A'ya giderken her iki piston ÜÖN'ya doğru hareket etmektedir. Kol muylusu A'ya ulaştığında sıcak silindirin hacmi sıfır olmakta, soğuk silindirin hacmi de yarıya düşmektedir. Çalışma maddesinin hemen hemen tamamı soğuk silindir içerisinde sıkıştırıldığından, soğuk silindirin cidarlarına ısı vererek sabit sıcaklıkta durum değişimi sağlanmaktadır. Kol muylusu A noktasına vardığında çevrim tamamlanmış olmaktadır [11-13].

3.2.1.2. Beta Tipi Stirling Motoru

Şekil 3.2.2.'de Beta (β) tipi bir Stirling motorun şematik resmi görülmektedir. Beta tipi motorlarda çevrim, aynı silindir içerisinde çalışan bir piston ve bir yer değiştirme pistonu tarafından gerçekleştirilmektedir. Yer değiştirme pistonun kuyruğu güç pistonunun ortasından geçmektedir. Soğuk hacim güç pistonu ile yer değiştirme pistonu arasında, sıcak hacim ise yer değiştirme pistonunun üst tarafında bulunmaktadır. Sıcak hacmin güç pistonu ile yer değiştirme pistonu arasında, soğuk hacmin yer değiştirme pistonunun üst tarafında bulunduğu motor tipleri de görülmektedir. Burada motorun çalışması açıklanırken birinci hal göz önünde bulundurulacaktır. Yer değiştirme pistonu ile silindiri arasında kalan boşluk aynı zamanda rejeneratör görevi de yapmaktadır.

Piston ve yer değiştirme pistonunun Şekil 3.2.2’de görülen pozisyonu sabit hacimde soğutma işlemine başlangıdır. Gç pistonu ve yer değiştirme pistonunun her ikisi birden AN civarında bulunmaktadır.



Şekil 3.2.2 Beta tipi motorun Şematik resmi ve çalışma prensibi [11]

Yer değiştirme pistonu AN’den uzaklaşma, gç pistonu AN civarında sabit kalma pozisyonundadır. Çalışma maddesinin yarısı soğuk hacimde yarısı sıcak hacimde bulunmaktadır. Yer değiştirme pistonu muylusu A noktasından B noktasına gelirken gç pistonu yerinde kalacaktır. Yer değiştirme pistonu muylusu B noktasına geldiğinde yer değiştirme pistonu ile piston arasındaki soğuk hacim maksimum değerine ulaşacak, sıcak hacim ise sıfır veya minimum değerinde olacaktır. Bu durumda çalışma maddesinin tamamı soğuk hacimde bulunmaktadır. Yer değiştirme pistonu muylusunun A noktasından B noktasına hareketi esnasında çalışma maddesinin işgal ettiği toplam hacim sabit kaldığından bu süreç sabit hacimde soğutma işlemidir. Bu işlemin sonunda gç pistonunun tepesi ve yer değiştirme pistonunun eteği Şekil 3.2.2’te görülen 2 noktasına gelmektedir.

Yer değiştirme pistonu muylusu B noktasından C noktasına giderken yer değiştirme pistonu N civarında sabit kalacak, gç pistonu AN’den N’ya doğru hareket edecektir. Bu hareket esnasında çalışma maddesinin hemen hemen tamamı yer değiştirme pistonu ile gç pistonunun arasındaki soğuk hacimde sıkıştırma işlemine tabi tutulacaktır. İşlem esnasında çalışma maddesinden soğuk cidarlara ısı akışı olduğu için bu işlemin sabit sıcaklıkta gerçekleştiği kabul edilmektedir. Bu işlemin sonucunda yer değiştirme pistonunun eteği ve gç pistonunun tepesi 3 noktasında

bulunmaktadır. Yer değiştirme pistonunun eteği ile g¼ç pistonunun tepesi arasındaki mesafe yer değiştirme pistonu kursunun yarısından fazladır.

Yer değiştirme pistonu muylusu C noktasından D'ye giderken g¼ç pistonu ÜÖN civarında sabit kalacak, yer değiştirme pistonu ÜÖN'dan AÖN'ya doğru kendi kursunun yarısından fazla hareket edecektir. Bu hareket esnasında çalışma maddesinin işgal ettiği toplam hacim sabit kalmaktadır. Bu işlem esnasında soğuk hacimde bulunan çalışma maddesi sıcak hacme geçecektir. Çalışma maddesi bu işleminde sabit hacimde ısıtılmaktadır. İşlemin neticesinde g¼ç pistonunun tepesi ile yer değiştirme pistonunun eteği arasında birbirine temas etmeyecek kadar küçük bir boşluk kalacaktır. Yer değiştirme pistonu muylusu D noktasına geldiğinde yer değiştirme pistonunun eteği ve g¼ç pistonunun tepesi 4 noktasında olacaktır. G¼ç pistonu ve yer değiştirme pistonunun bu pozisyonunda çalışma maddesinin hemen-hemen tamamı sıcak hacimde sıkıştırılmış, yüksek basınç ve sıcaklıkta iş yapmaya hazır bulunmaktadır [10-12].

Yer değiştirme pistonu muylusu D noktasından A noktasına giderken yer değiştirme pistonu AÖN civarında sabit kalacak, g¼ç pistonu kendi kursunun yarısından fazla AÖN'ya doğru hareket ederek iş zamanının gerçekleştirecektir. Bu işlemin sonunda çevrim tamamlanmaktadır.

3.2.1.3. Gama Tipi Stirling Motoru

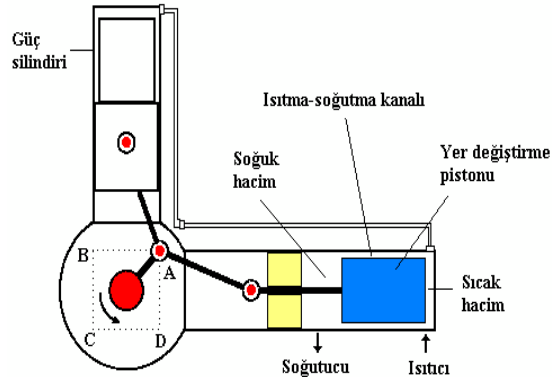
Gama (γ) tipi motorlarda iki silindir vardır. Birinci silindir çalışma maddesinin genişleme ve sıkıştırılmasını sağlar. İkinci silindir yer değiştirme pistonu tarafından çalışma maddesinin ısıtılmasını ve soğutulmasını sağlar. Rejeneratör silindir içine veya dışına yerleştirilebilir.

şekil 3.2.3'te gör¼ld¼ęü gibi krank milinin 360 derecelik hareketi 4 eşit kısma ayrılarak motorun termodinamik s¼releri tanımlanabilir.

Biyel muylusu A noktasında iken hem g¼ç pistonu hem de yer değiştirme pistonu ÜÖN civarında olup, g¼ç pistonu ÜÖN'ya yaklaşmakta, yer değiştirme pistonu ise ÜÖN'dan uzaklaşmaktadır. Çalışma maddesinin tamamı soğuk hacimde olup evre noktasına giderken g¼ç pistonu ÜÖN'ya varacak ve tekrar eski yerine dönecektir. Bu sebeple g¼ç pistonunun ÜÖN'da sabit kaldığı kabul edilebilir. Yer değiştirme pistonu

ise aşağıya doğru hareket ederek krank çapına yakın bir yol kat edip, soğuk hacimde bulunan çalışma maddesini sıcak hacme aktaracaktır. Bu işlem esnasında çalışma maddesi yer değiştirme pistonu ile silindiri arasında bulunan ısıtma-soğutma kanalından geçerken kanalın cidarlarından ısı alarak sıcaklığını yükseltir.

Yer değiştirme pistonu milinin hacmi göz ardı edilirse, işlem esnasında soğuk hacim daralırken sıcak hacim aynı miktarda genişlemektedir. Bu sebeple bu işlem çalışma maddesinin sabit hacimde ısıtıldığı kabul edilmektedir. Biyel muylusu B noktasına ulaştığında çalışma maddesinin tamamı sıcak hacimde toplanmış olup basınç ve sıcaklık maksimumdur.



Şekil 3.2.3 Gama tipi motorun çalışma prensibi [11]

Biyel muylusu B noktasından C noktasına giderken, yer değiştirme pistonu bulunduğu yerden AÖN'ya varıp tekrar bulunduğu yere gelecektir. Bu sebeple yer değiştirme pistonunun AÖN'da sabit kaldığı kabul edilmektedir. Güç pistonu ise AÖN'ya doğru krank çapına yakın bir mesafe kat ederek iş zamanını gerçekleştirir. İşlem esnasında çalışma maddesi hem genişleyerek iş yapmakta hem de ısıtma-soğutma kanalından geçerken ısı almaktadır. Bu işlemde çalışma maddesinin sıcaklığının sabit kaldığı kabul edilmektedir. Biyel muylusu C noktasına vardığında çalışma maddesinin yarısı sıcak hacimde diğer yarısı güç silindirinde bulunmaktadır. Çalışma maddesinin tamamının sıcaklığı sıcak kaynak sıcaklığına yakındır.

Biyel muylusu C noktasından D noktasına doğru giderken, güç pistonu AÖN civarında sabit kabul edilebilir. Yer değiştirme pistonu ise AÖN'dan ÜÖN'ya doğru krank çapına yakın bir yol kat ederek sıcak hacimdeki çalışma maddesini soğuk

hacme süpürür. Bu işlem çalışma maddesinin sabit hacimde soğutulmasıdır. Biyel kolu D noktasına vardığında çalışma maddesinin çoğunluğu soğuk hacimde, geri kalanı da güç silindirinde bulunmaktadır. Çalışma maddesinin basıncı minimum seviyesindedir. Soğuk hacimde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığı çevre sıcaklığının biraz üzerinde, güç silindirinde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığı da sıcak kaynak sıcaklığının biraz aşağısındadır.

Biyel muylusu D noktasından A noktasına giderken yer değiştirme pistonunun ÜÖN civarında sabit kaldığı kabul edilebilir. Güç pistonu ise AÖN'dan ÜÖN'ya doğru krank çapına eşit bir yol kat ederek önünde bulunan çalışma maddesini sıcak hacim üzerinden soğuk hacme aktarır. Bu işlemde çalışma maddesi bir taraftan sıkıştırılırken bir taraftan da ısıtma-soğutma kanaldan geçerken kanalın cidarlarına ısı bırakmaktadır. İşlem çalışma maddesinin sabit sıcaklıkta ısı vermesi kabul edilmektedir. Biyel muylusu A noktasına vardığında çevrim tamamlanmış olmaktadır [10-14].

3.2.2. Çift Etkili Stirling Motorları

Çift etkili Stirling motorlarında, motorun düzenlemesi bir silindirin genişleme hacmi ile diğer bir silindirin sıkıştırma hacmi arasına ısı değiştirgeçleri yerleştirmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Burada Stirling motoru sayısı ile silindir sayısı birbirine eşittir. Bu motorların en büyük avantajı, tek etkili Stirling motorlarınının yarısı kadar parçaya sahip olmalarıdır [10].

3.3 Stirling Motorunun Avantajları ve Dezavantajları

Stirling motoru, içten yanmalı motorlar dahil diğer ısı motorlarına göre birçok avantajı olan dıştan yanmalı motordur. Stirling motorlarının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Avantajları:

- a) Stirling motorları gaz, sıvı ya da katı her türlü yakıtı ve ısı kaynağını kullanabilir. Güneş enerjisi veya nükleer enerji ile de çalışabilir.
- b) Stirling motorları gürültüsüz ve titreşimsiz çalışır. Sisteme ısı sürülmesi sürekli olduğu için gürültü yok denilecek kadar azdır. Basınç değişimlerinin sinüzoidal olması, emme ve egzoz supapları gibi mekanik parçaların olmayışı, gürültüyü azaltıcı, bakımı ve montajı kolaylaştırıcı etkenlerdir.
- c) İçten yanmalı motorlarla kıyaslandığında termik verim daha yüksektir.
- d) Isı sürülmesi motor çalışmaya başlamadan gerçekleştiği için ilk hareket kolaylığı sağlamaktadır.
- e) Uzun ömürlüdür. Çünkü dıştan ısı verme sebebiyle yanma ile oluşan kirlenmelerin olmayışı aşındırmayı en aza indirir. Ayrıca içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma basıncı hareketli parçalara temas etmemektedir.
- f) Az bakım gerektirir, çünkü ateşleme ve enjeksiyon sistemleri ile supap gibi yardımcı parçalara ihtiyaç duyulmamaktadır.
- g) Yardımcı sistemlerin ve hareketli parça sayısının az olması sebebiyle içten yanmalı motorlara oranla maliyeti daha ucuzdur. Ayrıca imalat, bakım ve onarımı ucuz, kolay ve çabuktur.
- h) Yağlama yağının soğutma özelliği olmadığı için içten yanmalı motorlardaki gibi ısı kaybı olmaz. Ayrıca yağ sarfiyatı daha az ve yağ değişim aralığı daha uzundur.
- i) Stirling motorları temel olarak bir genişleme hacmi, bir sıkıştırma hacmi ile ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratörden meydana geldiği için çok değişik mekanik düzenlemelerde imal edilebilir.

- j) Dıştan yanma sebebiyle NO_x, CO, yanmamış HC ve partikül emisyonları daha az ve kontrollüdür [15-17].

Stirling motorlarının yukarıdaki avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır.

Dezavantajları:

- a) Stirling motorları girişte ve çıkışta çalışma akışkanı içeren ısı eşanjörü gerektirir. Bu yakıt ekonomisinin sağlanması ve verimlilik optimizasyonu düşünülerek tasarım yapıldığında motorun maliyetini arttırır.
- b) Stirling motoru, özellikle de küçük sıcaklık farkları ile çalışanlar, ısı eşanjörü nedeni ile oluşturdukları gücün önemli bir kısmını kaybeder.
- c) Termal verimi maksimize etmek için soğutucu sıcaklığı mümkün olduğu kadar düşük tutulur, bu yüzden harcanan ısının kaybedilmesi güçlük yaratır. Bu sebep Stirling motorunun otomotiv sektöründe yaygınlaşamamasının faktörlerinden biridir.(Gerekli ısı ısıtma sisteminin yeterince motora kombine ve küçük ölçüde olamayışı).
- d) Düz Stirling motoru çabuk olarak devreye giremez; sıcaklığın iyice yükselmesi gereklidir. Bu tüm dıştan yanmalı motorlar için geçerlidir fakat diğer dıştan yanmalı motorların ısınma zamanı Stirling motorunununkinden kısadır.
- e) Güç çıkışı, sabittir ve bir seviyeden diğerine geçmesi çabuk olarak mümkün olmaz.
- f) Hidrojenin düşük moleküler ağırlığı, onu Stirling motoru için en iyi çalışma gazı yapar. Fakat bu küçük moleküller, motor içinde muhafaza zorluğu ve ilave yardımcı sistemler gerektirir [17].

3.4 Güneş Enerjili Stirling motorlar

1986 yılında tamamlanan Bundesministerium für Forschung und Technologie kurumuna ait olan Stirling motor, Suudi Arabistan'ın Riyam şehrinde kurulmuştur. Güneş enerjisiyle bütünleştirilmiş ilk Stirling motorlarından olup 50kW gücündedir. Stirling motoru 4 silindirli olup çalışma akışkanı olarak hidrojen kullanılmıştır. Yoğunlaştırıcı çapı 17m, yansıtıcı yüzey alanı 227 m² olan sistemin yoğunlaştırma oranı 600' dür [18].



Şekil 3.5.1 Bundesministerium für Forschung und Technologie kurumuna ait olan Stirling motor [18]

1992 yılında tamamlanan Schlaich Bergermann und Partner şirketine ait olan Stirling motor, İspanyanın Almeria şehrinde kurulmuştur. Güneş enerjisiyle bütünleştirilmiş Stirling motor 9 kW gücündedir. Yoğunlaştırıcı çapı 7,5m, yansıtıcı yüzey alanı 44 m² olan sistemin ortalama yoğunlaştırma oranı 3000'dir. Stirling motoru olarak SOLO V 160 motoru kullanılmıştır. Çanak sisteminde yarı otomatik elektronik kontrol ünitesi yer almaktadır [18].



Şekil 3.5.2 Schlaich Bergermann şirketine ait olan Stirling motor [18]

1997 yılında İspanya'nın Almeria şehrine kurulmuş olan sistem 10 kW gücündedir. Stiftung Energieforschung şirketine ait olan sistemde SOLO V 160 Stirling motoru kullanılmıştır. Yoğunlaştırıcı çapı 8,5m yansıtıcı yüzey alanı 57 m² olan sistemin yoğunlaştırma oranı 2400'dür [18].



Şekil 3.5.3 Stiftung Energieforschung şirketine ait olan sistem [18]

2000 yılında yine Almeria şehrine kurulmuş olan sistem 10 kW olup SOLO Stirling 161 motoru ile çalışmaktadır. EU-Kommission şirketine ait olan sistemin olan sistem tam otomatik bilgisayar bağlantılı izleme sistem aynı zamanda internet üzerinden de kontrol edilebilmektedir [18].



Şekil 3.5.4 EU-Kommission şirketine ait olan sistem [18]

2002 yılında tamamlanan KEMS şirketine ait olan Stirling motor Hindistan'ın Vellore şehrinde Vellore Üniversitesi'nin kampüsüne kurulmuştur. Güneş enerjisiyle bütünleştirilmiş Stirling motor 10 kW gücündedir. Yoğunlaştırıcı çapı 8,5 m, yansıtıcı yüzey alanı 57 m² olan sistemin ortalama yoğunlaştırma oranı 2400'dür. Stirling motoru olarak SOLO V 161 motoru kullanılmıştır. Stirling motorunun çalışma akışkanı Helyum gazıdır [18].



Şekil 3.5.5 KEMS şirketine ait olan Stirling motor [18]

2007 yılında İspanya ve ABD'ye kurulmuş olan sistem Infinia şirketine aittir ve ticari olarak da satılmaktadır. Güneş enerjisiyle bütünleştirilmiş Stirling motor 3 kW güç üretmekte olup kolay kurulumu sayesinde ihtiyaç duyulan elektrik miktarı göz önünde bulundurularak istenilen miktarda modül temin edilebilir.. Yoğunlaştırıcı çapı 4,7 m, yüksekliği 6,4 m olan sistem bilgisayar destekli izleme sistemi ile çalışmaktadır [18].



Şekil 3.5.6 Infinia şirketine ait olan Stirling motor [18]

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tezin konusuna temel oluşturan Stirling motorlar, Stirling motorların güneş enerjisi ile bütünleştirilmesi ve spektral ayrıştırma yaklaşımı alanlarında açık literatürde ulaşılabilen çalışmalar incelenmektedir.

Wongwises ve Kongtragool (2003) güneş enerjisi ile çalışan Stirling motorları ve düşük sıcaklık farkı (LTD) ile çalışan Stirling motorlarını çeşitli araştırmalardan yararlanarak incelemiştir. Gelecekte Stirling motorlarının çok tercih edilir makineler olacağını belirtmişlerdir. Özellikle güneş enerjili, LTD ile çalışan, gama tipli, dikey, çift pistonlu Stirling motorun daha verimli olacağını vurgulamışlardır [19].

Wongwises ve Kongtragool (2005), teorik çalışmalarında, güneş enerjisi kaynaklı LTD Stirling motorunun en yüksek soğurma sıcaklığında, konik yoğunlaştırıcı kullanılarak, maksimum verimini ortaya koymuşlardır. Güneş enerjisi ile çalışan Stirling motorunun verimi için matematiksel model geliştirmişlerdir [20].

Wongwises ve Kongtragool (2007) araştırmalarında çift pistonlu, gama türünde, LTD Stirling motorun performansını değerlendirmiştir. Deneylerinde sıcaklık kaynağı olarak projeksiyon lamba kullanmışlardır. Sonuç olarak 436 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde 52,1 d/d motor hızında maksimum 1,69 W çıkış gücü ve maksimum 0,352 Nm tork elde edilmiştir [21].

Akhan (2007) çalışmasında özgün bir Stirling sıcak hava motoru tasarlanmış ve bu tasarımın bir prototipi imal etmiştir. Beta tipi olarak tasarlanan motorda, sıkıştırma oranı, güç pistonunun çapı, geri çağırıcı kuvveti oluşturan pistonların bağlı olduğu yaylar, yer değiştirme pistonunun boyu, çalışma akışkanı, doldurma basıncı, ısıtma sıcaklığı, rejeneratör boyutları ve malzemesi gibi parametrelerin, motor karakteristiklerine etkisini incelemeyi ve termodinamik analizini yapmayı amaçlamıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, güç pistonu çapı ve kursu arttıkça, ortalama efektif basıncın azaldığını, şarj basıncı ve yer değiştirme pistonu kursu arttıkça ortalama efektif basıncın arttığını gözlemlemiştir [22].

Tlili ve ark. (2008), güneş enerjisi uygulamaları için orta düzeyde sıcaklık farkı olan (MTD) Stirling motoru uygulamaları sunmuştur. Eşanjörlerdeki enerji kayıpları ve

basınç düşümleri ile dinamik bir model kullanmak suretiyle değerlendirmeler sunmuşlardır [23].

Tavakopour ve ark. (2008) , çalışmalarında güneş toplayıcısı ile çalışan iki silindirli gama tipi LTD Stirling motorunun sistem tasarımını sunmuş, üretim test etmişlerdir. Stirling motorunun 110 °C sıcak kaynak ve 25 °C soğuk kaynak sıcaklığında maksimum gücü 14 dev/dk motor devrinde 0,27 W olarak elde edilmiştir [24].

Wongwises ve Kongtragool (2008a) araştırmalarında dört pistonlu, gama türünde, LTD Stirling motorun performansını değerlendirmişlerdir. Sistemde sıcaklık kaynağı olarak dört adet projeksiyon lamba kullanılmıştır. Sonuç olarak 439 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde 20 d/d motor hızında maksimum 6,2 W çıkış gücü ve maksimum 2,91 Nm tork elde etmişlerdir [25].

Wongwises ve Kongtragool (2008b) çalışmalarında LTD Stirling motoru üretilip performansı sunulmuştur. Motor küçük bir DC jeneratörüne bağlanmış ve bir ısı kaynağı olarak parabolik çanağı kullanarak gerçek güneş enerjisi ile test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda motordan elde edilen gücün güneş ışınımına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Motor çıkış gücü ve verimliliğinin güneş ışınımı arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır [26].

Scollo ve ark. (2008), çalışmalarında LTD Stirling motoru tasarlanmış ve bu tasarımın bir prototipini imal etmişlerdir. Testler bir 1 HP elektrik motoru 200 rpm devir hızında yapılmıştır. Sistemde 7 bar basınçlı helyum gazı kullanılmıştır [27].

Chen ve ark. (2009) çalışmalarında, ısı motoru, yanma odası ve eşanjörden oluşan bir birleşik enerji sistemi üzerinde, Bejan ve Peterson ilkelerini ayrı ayrı kullanarak araştırma yapmışlardır. Birleşik enerji sisteminin performansı, ısı değiştirici, motor devri, kayıp ısı ve tersinmezlikleri Brayton çevrimi altında analiz etmiştir. Sistemin verimliliği ve güç çıkışını hesaplamış ve bunların maksimize edilmesi için çalışmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçların, optimum performans ile birlikte enerji sistemlerinin farklı modlarda özelliklerini tartışmak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, sistemin, farklı ısı motorlu birleşik sistemlerle ve güneş odaklı ısı motor sistemleri ile çalışabilmesinin kullanışlı olduğunu ifade etmişlerdir [28].

Erol (2009) çalışmasında, düşük sıcaklıklarda çalışabilen 770 cm^3 süpürme hacmine sahip gama tipi bir Stirling motorunun tasarımı gerçekleştirmiş ve üretmiştir. Motorda bir yer değiştirme pistonu ve bir güç pistonu konsantrik olarak yerleştirmiştir. Yer değiştirme ve güç pistonları arasında 90° lik faz farkı mevcuttur. Çalışma akışkanı olarak atmosferik hava kullanmıştır. İmalatı yapılan motorun, laboratuvar şartlarında ısı kaynağı olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) yakıtlı bir ısıtıcı ile testleri yapmıştır. Alüminyum ve MDF olarak iki farklı yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde sıcak uç sıcaklığına bağlı olarak hız - moment ve hız - güç karakteristikleri incelemiştir. Alüminyum yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde maksimum motor gücü 320°C sıcak uç sıcaklığında ve 185 d/d motor hızında, 2,59 W olarak elde etmiştir. MDF yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde ise maksimum motor momenti 160°C sıcak uç sıcaklığında, 125 d/d motor hızında 0,166 Nm olarak ölçmüştür. Maksimum motor gücü ise, 160°C sıcak uç sıcaklığında ve 215 d/d değerinde 3,06 W olarak hesaplanmıştır [29].

Chang ve Ko (2009) çalışmalarında, atık ısılar ile çalışan, yanma odasına bütünleştirilmiş Stirling motoru tasarımını ve optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Termodinamik ve entropi ilkelerine çerçevesinde, sabit sıcaklıkta çıkış gücünü hesaplamışlardır [30].

Costea ve ark.(2010) çalışmalarında, hidrojen yakıt hücreleri kullanarak güneş enerjisi ile çalışan Stirling enerji santralinin tasarım, hesaplama ve optimizasyon şemasını sunmuşlardır. Sistemde ilk olarak güneş enerjisinden Stirling motoru kullanılarak elektrik üretilmiştir. Üretilen bu elektrik ile elektroliz yöntemi kullanılarak hidrojen elde edilmiştir. Hidrojen tanklarda istenildiği zaman kullanılmak üzere depolanmıştır. Enerji gereksinimi olduğunda hidrojen tanklarda yakılıp elektrik elde edilmesi sağlanmıştır. Çalışmalarının temel amacı; güneş enerjisini kullanarak bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılan hidrojen ile elektrik üretmek ve performansını tahmin edilmesinde yenilikçi bir yöntem sunmaktır. Çalışmasında günlük enerji ihtiyaçlarını dikkate alınıp gereken güç miktarı sağlamak için, yakıt hücresi sayısı ve bunun için gerekli olan alan hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda ise günlük 2,39 kg hidrojen depolandığı gözlemlenmiştir. Gün içinde

kullanılan hidrojen miktarı da hesaplanarak ortalama günlük 0,46 kg lık hidrojenin ihtiyaç olan günlerde kullanılmak üzere depo edildiği sonucuna varılmıştır [31].

Sripakagorn ve Srikam (2011) çalışmalarında, prototip bir MTD Stirling motoru geliştirmişlerdir. Sıcaklık kaynağı olarak 300°C -500°C deki parabolik güneş toplayıcısı tarafından üretilen ısı kullanılmıştır. Çalışmalarında MTD Stirling motorların düşük maliyetli malzemelerin kullanımına izin verdiğini ve mekanik tasarımın daha basit olduğunu belirtmişlerdir. Sistemde çalışma sıvısı olarak 7 bar basıncında hava kullanılan Beta-tipi bir Stirling motoru tasarlanmış ve üretilmiştir. Süpürme hacmi 165 cc ve güç çıkışı 100 W dır. Motor performansı test edilmiş ve 500°C, 7 bar basınç altında 360 rpm de 95,4 W maksimum güç ürettiği görülmüştür. Maksimum güç durumundaki ısıl verimi ise % 9,35'dir. Sonuç olarak; orta sıcaklık uygulamaları düşük sıcaklık uygulamalarına göre açıkça avantajlı olduğu, aynı zamanda yüksek sıcaklık uygulamalarına göre daha basit, masrafının az ve performans yaklaşık olarak aynı olduğunu ifade etmişlerdir [32].

Literatürde spektral ayrıştırma ile ilgili sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Sark ve ark. (2005) fotovoltaik hücrelerde, hücrelerin üzerlerine gelen ışınların bir kısmının elektriğe dönüştüğü, elektriğe dönüşemeyen kısımların ısı yükü olarak fotovoltaik hücrelerde biriktiği, bu biriken ısınında hücrelerin verimini düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Güneş enerjisi spektrumunun tamamından yararlanılması gerektiğini savunmuştur [33].

Kandilli (2013) çalışmasında, güneş enerjisinin tüm spektrumlarını etkin şekilde kullanma amacı ile güneş enerjisinin spektral olarak ayrıştırma yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımla yoğunlaştırılmış güneş enerjisini sıcak ayna adı verilen optik bir eleman ile güneş ışınlarının görünür bölgesi ile UV-IR bölgesini ayırtmıştır. Çalışmada güneş enerjisinin görünür bölge kısmını güneş pili üzerine yansıtarak elektrik üretmiş, UV-IR bölümünü ise sıcak su üretimi için vakum tüpüne aktarmıştır. Sonuç olarak sisteminin enerji verimini % 7,3, ekserji verimini %1,16 ve enerji üretim maliyetini ise 6,37 \$/W olarak belirtmiştir [34].

5. TEZİN AMACI, ÖNEMİ ve KAPSAMI

Enerji gereksiniminin git gide artması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek ve gelişmekte olan ülkemizde, önümüzdeki yıllarda önemli bir sorun haline gelmesi kaçınılmaz olan enerji talebi, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı ile karşılanabilir. Birim alandaki yoğunluğu düşük olan ve yüksek akıya gereksinim duyulan durumlarda, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin birçok uygulama alanı vardır. Yoğunlaştırılmış güneş ışınımı şimdiye kadar birçok uygulama alanında test edilmiş ve kullanılagelmiştir. Noktasal odaklayıcı paraboloidal toplayıcılarla çok yüksek yoğunlaştırma oranlarına ulaşmak ve güç elde etmek mümkündür. Bu sistemlerin güç üretim sistemlerinde, endüstriye yönelik buhar ve elektrik üretimi ve aydınlatma amaçlı kullanımı ülkemizde yeni tanınmakla birlikte, dünyada birçok uygulaması mevcuttur.

Değişen yaşam tarzı, insanları yeterince aydınlanamayan mekânlarda (büyük ticari binalar, ofisler, yeraltı istasyonları, çok katlı otoparklar vb.) yaşamaya zorlamaktadır. Günışığının yeterli olmaması, insanlarda fizyolojik ve psikolojik sorunlara neden olmakta, aydınlatmada konfor koşullarının sağlanmaması, çalışma verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, binalar, uzun dönem enerji tüketiminde önemli bir etkiye sahiptirler. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlikteki son gelişmeler, binalarda aydınlatma, ısıtma ve soğutma için minimum enerji tüketimi ile optimum günışığı kullanımını amaçlayan tasarım stratejilerine yol açmıştır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin fiber optiklerle taşınması ilkesine dayalı aydınlatma sistemleri son yıllarda birçok araştırmacı tarafından test edilen sistemlerdir. Ancak, bu sistemlerde kullanılan fiber optik kablo demetlerinin geçirdiği güneş ışınımı spektrumu görünür bölge aralığında olduğundan, yoğunlaştırılmış güneş ışınımı spektrumunun IR ve UV bölgelerinde gücü kayıp edilmektedir. Bu güneş enerjisi sistemleri için önemli bir güç kaybı anlamına gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, güneşi çift ekseninde izleyen noktasal odaklayıcı paraboloidal çanak ile spektral olarak ayrıştırılmış yoğunlaştırılmış güneş ışınımından Stirling ısı motoru kullanılarak mekanik güç edilmiştir. Çalışmada temel amaçlar, “spektral

ayırıştırma yaklaşımı” ile güneş ışınının ısı formunu ayrı, ışık formunu ayrı şekilde değerlendirip, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin tüm spektrumundan etkin bir şekilde yararlanılmasını sağlamasını amaçlayan sistemi tanıtmak, termodinamik modellemesini kurmak, Stirling motor ile ilgili performans analizini gerçekleştirmek, performansa etki eden parametreleri değerlendirmektir. Bu yaklaşım ile soğuk ayna kullanılarak güneş ışınımı görünür bölge ile IR-UV olarak yoğunlaştırma düzeyinde birbirinden ayrılmış, istenilen noktaya aktarılmış ve hem aydınlatma hem de güç üretimi için kullanılabilir. Bu yaklaşımın birçok yeni alana temel oluşturabileceği ve birçok sisteme uygulanabileceği ümit edilmektedir.

Tezin kapsamı ise spektral ayırıştırma yaklaşımı ile ısı ve ışık formlarını ayıran ve ışık formunu aydınlatmada, ısı formunu ise Stirling motor aracılığı ile mekanik güç üretiminde kullanan, 110M039 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanmış ve kurulmuş olan sistemin, yalnızca Stirling motor bölümü, ilgili parametreleri ve performans parametrelerinin incelenmesini içermektedir. Sistemin aydınlatma ile analizleri bu tezin kapsamı dışında tutulmuştur.

Bu çalışmada, spektral ayırıştırma yaklaşımı kullanılarak, odakta toplanan yoğunlaştırılmış güneş ışınının görünür bölge kısmı, optik elemanlar ile paraboloidal çanağın kör noktasında bulunan fiber optik kablo demetine aydınlatma amaçlı olarak yansıtan, geriye kalan ve ısıl özellik taşıyan yoğunlaştırılmış güneş ışınımı ise odaktaki bir Stirling motora doğrudan aktarılarak mekanik güce çevirebilen yeni bir sistem tanıtılmış, termodinamiğin 1. ve 2. yasası ışığında enerji ve ekserji modeli ortaya konmuştur. Bu çalışma, açık literatürde görüldüğü kadarı ile, spektral ayırıştırma yaklaşımını kullanan yoğunlaştırılmış güneş enerjili aydınlatma-ısı güç üretimi sisteminin tasarımı, kurulumu ve performanslarının test edilmesine yönelik, yoğunlaştırılmış güneş ışınının ısı ve ışık formlarının ayrı ayrı ve etkin olarak değerlendirilmesi fikrini ilk defa hayata geçiren ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.

Sistemden elde edilecek güç, basit ve konvansiyonel biçimde elektrik enerjisine dönüştürülebilecektir. Bu elektrik enerjisinden şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı olarak yararlanılabilecektir. Yoğunlaştırılmış aydınlatma-güç üretimi sistemi

fotovoltaik panellerle bütünleştirilerek aydınlatma ve enerji gereksinimi bu yolla desteklemek de mümkün olacaktır.

Bununla birlikte, yoğunlaştırılmış güneş ışınımı spektrumunun ısı ve ışık formlarına ayrılması düşüncesinin, Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Sistemler (CPV) ve Isıl Fotovoltaik Sistemler (PVT) gibi alanlarda da uygulama alanı bulabileceği, yoğunlaştırılmış güneş ışınımının ısı ve ışık formlarının spektral olarak ayrıştırılması yaklaşımının gelecekte farklı birçok alanda kullanılabileceği öngörülmektedir.

Dünya genelinde, güneş enerjisi spektrumunun tamamından yararlanmaya çalışan sistemler önerilmiş olmakla birlikte, yoğunlaştırılmış güneş ışınımını ısı ve ışık formlarına ayıran bu şekilde bir spektral ayrıştırma ile güç üretimi-aydınlatma amaçlayan bir sistem bulunmamaktadır. Açık literatürde yoğunlaştırılmış güneş ışınımının ısı ve ışık formlarına ayrılıp Stirling ısı motoru ile güç üretimi ve fiber optik aydınlatma sistemini bir araya getirebilen bir sisteme rastlanmamıştır.

Çalışmada yer alan sistemin bir diğer özgün özelliği, yoğunlaştırılmış güneş ışınımının ışık formunun paraboloidal çanağın kör noktasına gönderilecek ve buradan aydınlatma amaçlı fiber optik kablo demetine aktarılacak olmasıdır. Paraboloidal çanağın kör noktası, üzerine gelen ışınları odağa göndermeyen orta noktasıdır. Odakta ışık formuna ayrılan güneş ışınımı optik elemanlarla bu noktaya gönderilmekte, bu bölgeden fiber optik kablo demetine, kablo demeti aracılığı ile de aydınlatılacak mekâna taşınmaktadır. Böylelikle bileşik güç sistemi için kompakt bir yapı elde edilmiş olacak, aynı zamanda fiber optik kablo demetinin paraboloidal çanak üzerinde oluşturabileceği gölgeleme etkisi de ortadan kaldırılmış olmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş ışınımını çanağın kör noktasına yansıtan bir optik sistem, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile ilgili tüm teknolojilerde kullanılabilecek özgün bir tasarım özelliği taşımaktadır.

6. KURAMSAL ANALİZ

Bir güneş enerjisi sisteminin performansının ortaya konulmasında enerji ve ekserji analizinin gerçekleştirilmesi ve veriminin ortaya konması büyük önem taşımaktadır. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumunu temel almakta ve enerjinin niceliği ile ilgilenmektedir. Enerjinin kullanılabilirliği, sistemdeki tersinmezlikleri ve enerjinin niteliği ise ikinci yasa analizi (ekserji analizi) ile gözler önüne serilmektedir [15].

6.1 Termodinamik Analiz

Bu bölümde, 110M039 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanan ve üretilen Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Aydınlatma ve Güç Üretimi Birleşik Sisteminin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilerek performansının belirlenmesine yönelik modellemenin ortaya konması amaçlanmaktadır.

Paraboloidal çanağın tasarım parametrelerinin odakta elde edilecek enerji miktarına etkisinin belirlenmesi sistem veriminin analiz edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Açıklık çapı, odak uzaklığı ve kenar açısı, paraboloidal çanağın en önemli tasarım parametreleridir. Odakta elde edilecek görüntünün şekli, diğer bir deyişle elde edilecek enerji yoğunluğu, tasarım parametrelerine bağlıdır. Enerji ve ekonomik açıdan odaktaki alıcının en uygun boyutta yerleştirilmesi alıcı ve tasarım parametrelerinin optimizasyonu ile mümkündür. Bu bakımdan öncelikle tasarım parametreleri ile odakta elde edilecek enerji yoğunluğu arasındaki ilişkinin ortaya konması gerekmektedir.

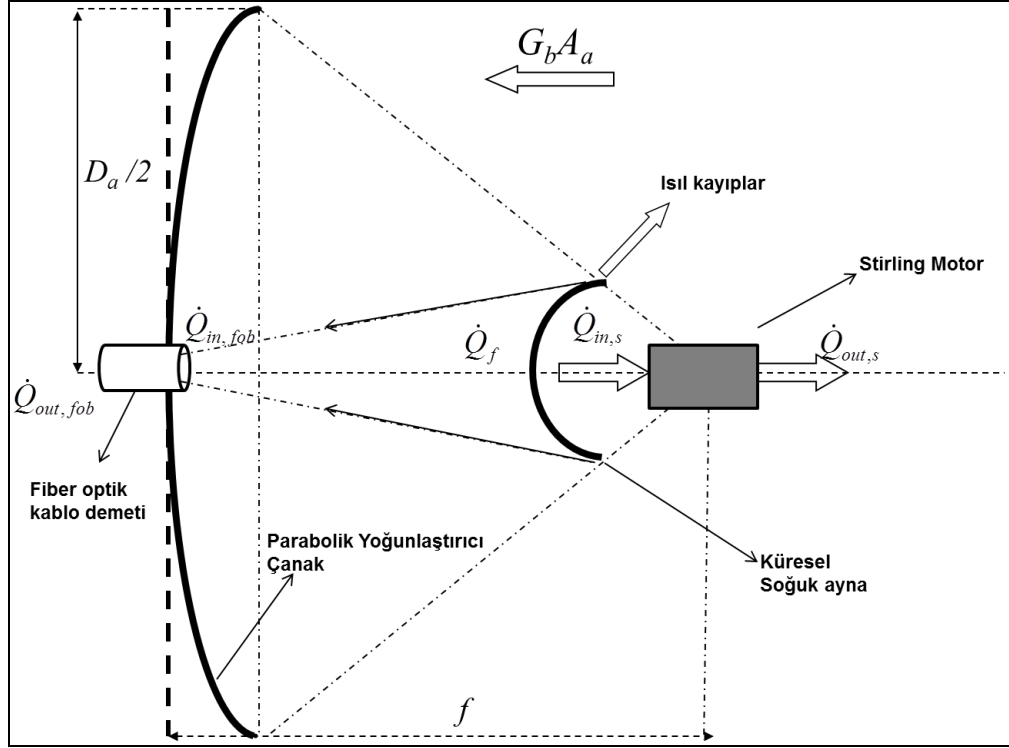
Paraboloidal çanağın açıklık çapı D_a olmak üzere;

$$\frac{f}{D_{ap}} = \frac{1}{4 \tan^2(\theta_{rim} / 2)} \quad (6.1.1)$$

bağıntısı ile ilişkilendirilebilir.

Düşük yoğunlaştırma oranına sahip yoğunlaştırıcılar dışında, açıklık alanına gelen etkin ışınım direkt güneş ışınımıdır. Koni biçiminde gelen güneş ışınımının açısal genişliği $0,53^\circ$ 'dir [7]. Yoğunlaştırılmış enerjinin analiz edilebilmesi için odakta oluşan görüntü karakteristiklerinin ortaya konması gereklidir. Odak düzlemindeki

güneş görüntüsünün genişliği, çanak kenar açısı arttıkça artmaktadır. Bir çanağa ait odak uzaklığı oluşan görüntünün boyutu için; açıklık çapı ise elde edilebilecek toplam enerji miktarı için belirleyici unsurdur. Yapılan hesaplamalarda direkt güneş ışınımının açıklık düzlemine normal doğrultuda geldiği ve yansımanın düzgün olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 6.1.1 Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi aydınlatma ve güç üretimi birleşik sistemi enerji dönüşüm şeması

Şekil 6.1.1 de 110M039 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanan ve üretilen “Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Aydınlatma ve Güç Üretimi Birleşik Sistemi” nde enerji dönüşümünü ifade eden bir şema görülmektedir. Sistemde yoğunlaştırıcı çanağın açıklık alanına gelen güneş ışınımı çanak tarafından toplanarak odakta yoğunlaştırılır. Yoğunlaştırılmış bu güneş ışınımı küresel soğuk aynaya düşürülür. Yoğunlaştırılmış güneş ışınımının “görünür bölge” bölümü soğuk ayna tarafından yoğunlaştırıcı parabolik çanağın orta noktasına yerleştirilen fiber optik kablo demetine gönderilir. Fiber optik kablo demetine giren görünür bölge ışınım aydınlatma test laboratuvarına aktarılır. Diğer taraftan soğuk ayna tarafından diğer

tarafa geçirilen infrared (IR) ve ultraviyole (UV) ışınımın ise Stirling motora gönderilir. Burada yoğunlaştırılmış güneş ışınımının IR ve UV bölümleri açığa çıkardıkları ısı etkisiyle motor çalıştırılır ve mekanik güç elde edilir. Böylece yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden spektral olarak en etkin bir biçimde yararlanılması ve geniş bir dalga boyu aralığındaki güneş enerjisinin kullanılabilmesi sağlanabilmektedir. Burada tanımlanan enerji akılarının ortaya konması sistemin modelinin oluşturulması, termodinamik analizinin gerçekleştirilmesi ve sistemin iyileştirilebilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır.

\dot{Q}_f paraboloidal yoğunlaştırıcı çanağın odak düzlemine gelen enerji akımı, f odak uzaklığı, ρ_{dish} çanak yüzeyinin yansıtıcılığı, ϕ_{rim} paraboloidal çanağın kenar açısı, ϕ_s alıcı boyutu nedeniyle oluşan gölgeleme açısı ve G_b çanak açıklık düzlemine dik gelen direkt güneş ışınımı olmak üzere aşağıdaki bağıntı verilir [35]:

$$\dot{Q}_f = \pi f^2 [\sin^2(\phi_{rim}) - \sin^2(\phi_s)] \rho_{dish} G_b \quad (6.1.2)$$

Odakta toplanan enerji akısı aşağıdaki eşitlik ile de verilebilir:

$$\dot{Q}_f = A_f \rho_{dish} G_b F C_{max} \quad (6.1.3)$$

Geometrik yoğunlaştırma oranı ise;

$$C_{max} = \frac{A_{ap}}{A_f} = \frac{\sin^2(\phi_{rim}) \cos^2(\phi_{rim} + 0,267^\circ + \delta/2)}{\sin^2(0,267^\circ + \delta/2)} \quad (6.1.4)$$

Odakta oluşan görüntünün çapı;

$$D_f = \frac{D_{ap} \sin(0,267^\circ + \delta/2)}{\sin(\phi_{rim}) \cos(\phi_{rim} + 0,267^\circ + \delta/2)} \quad (6.1.5)$$

Optimum odak uzaklığı;

$$f_o = \left[\frac{D_f}{4 \tan(\phi_{rim}/2)} \right] \left[\frac{\sin(\phi_{rim}) \cos(\phi_{rim} + 0,267^\circ + \delta/2)}{\sin(0,267^\circ + \delta/2)} \right] \quad (6.1.6)$$

Yoğunlaştırıcı çanak görüş faktörü için;

$$F = \frac{\sin^2(\phi_{rim}) - \sin^2(\phi_s)}{4 \tan^2(\phi_{rim}/2)} \quad (6.1.7)$$

Odakta oluşan görüntünün minimum çapı;

$$d_{min} = 2D_{ap} [1/4 \tan(\phi_{rim}/2)] \sin(0,267^\circ + \delta/2) \quad (6.1.8)$$

Odakta oluşan görüntünün maksimum çapı;

$$d_{max} = \frac{D_{ap} [1 + (1/\tan^2(\phi_{rim}/2))]^2 \sin(0.267^\circ + \delta/2)}{2[(1/\tan^2(\phi_{rim}/2)) - 1](1/\tan(\phi_{rim}/2))} \quad (6.1.9)$$

Odak bölgesine \dot{Q}_f ışınımı gelir. Soğuk aynaya gelen yoğunlaştırılmış enerji ısı kaybı maruz kalır. Aynanın geçirgenliği “ τ ” ve yansıtıcılığı “ ρ_m ” olmak üzere, soğuk aynaya gelen enerji akısı \dot{Q}_m ise;

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_f - U_m (T_m - T_a) \quad (6.1.10)$$

$$U_m = U_{con} + U_{rad} \quad (6.1.11)$$

Soğuk aynanın kalınlığı küçük olduğu için iletimle olan ısı kaybı ve “ α ” yutuculuğu ihmal edilmiştir.

Stirling motora gelen enerji akısı $\dot{Q}_{in,s}$;

$$\dot{Q}_{in,s} = \dot{Q}_m \tau \quad (6.1.12)$$

Bununla birlikte, Stirling motordan alınan güç $\dot{Q}_{out,s}$, ϑ motorun devir sayısı, T torku olmak üzere;

$$\dot{Q}_{out,s} = 2\pi\vartheta T \quad (6.1.13)$$

bağıntısı ile ifade edilir [26].

Güneş ışınımından gelen ekserji için maksimum verim oranı Ψ , T 6000K olarak kabul edilen güneş sıcaklığı, T_a dış ortam sıcaklığı olmak üzere tarafından aşağıdaki gibi verilmektedir [36]:

$$\Psi = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T} \quad (6.1.14)$$

Paraboloidal çanağa gelen güneş ışınımının ekserjisi;

$$E\dot{x}_{in} = \dot{G}_b A_a \Psi \quad (6.1.15)$$

Soğuk aynanın giriş ekserjisi;

$$E\dot{x}_{in,m} = \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right) \quad (6.1.16)$$

$$E\dot{x}_{out,m} = \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right) \quad (6.1.17)$$

Stirling motorun giriş ekserjisi T_h Stirling motorun alıcısının sıcaklığı olmak üzere;

$$E\dot{x}_{in,s} = \dot{Q}_{in,s} \left(1 - \frac{T_a}{T_h}\right) \quad (6.1.18)$$

Stirling motorun çıkış ekserjisi ise, motorda oluşan mekanik enerji, kinetik enerji ve bu kinetik enerjinin tamamı kullanılabilir enerji olduğundan çıkış ekserjisi, motordan alınan güce eşittir:

$$E\dot{x}_{out,s} = \dot{Q}_{out,s}$$

Sistem bileşenlerinin ekserji verimi aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir:

Çanağın ekserji verimi;

$$\varepsilon_{dish} = \frac{E\dot{x}_{in,m}}{E\dot{x}_{in}} \quad (6.1.19)$$

Soğuk aynanın ekserji verimi;

$$\varepsilon_m = \frac{E\dot{x}_{out,m}}{E\dot{x}_{in,m}} \quad (6.1.20)$$

Stirling motorun ekserji verimi;

$$\varepsilon_s = \frac{E\dot{x}_{out,s}}{E\dot{x}_{in,s}} \quad (6.1.21)$$

Sistemin tamamı için genel ekserji verimi

$$\varepsilon = \frac{E\dot{x}_{out,s}}{E\dot{x}_{in}} \quad (6.1.22)$$

Sistem bileşenlerinin enerji verimi aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir:

Çanağın enerji verimi;

$$\eta_{dish} = \frac{Q_f}{A_a G_b} \quad (6.1.23)$$

Soğuk aynanın enerji verimi;

$$\eta_m = \frac{Q_m}{Q_f} \quad (6.1.24)$$

Stirling motor için enerji verimi;

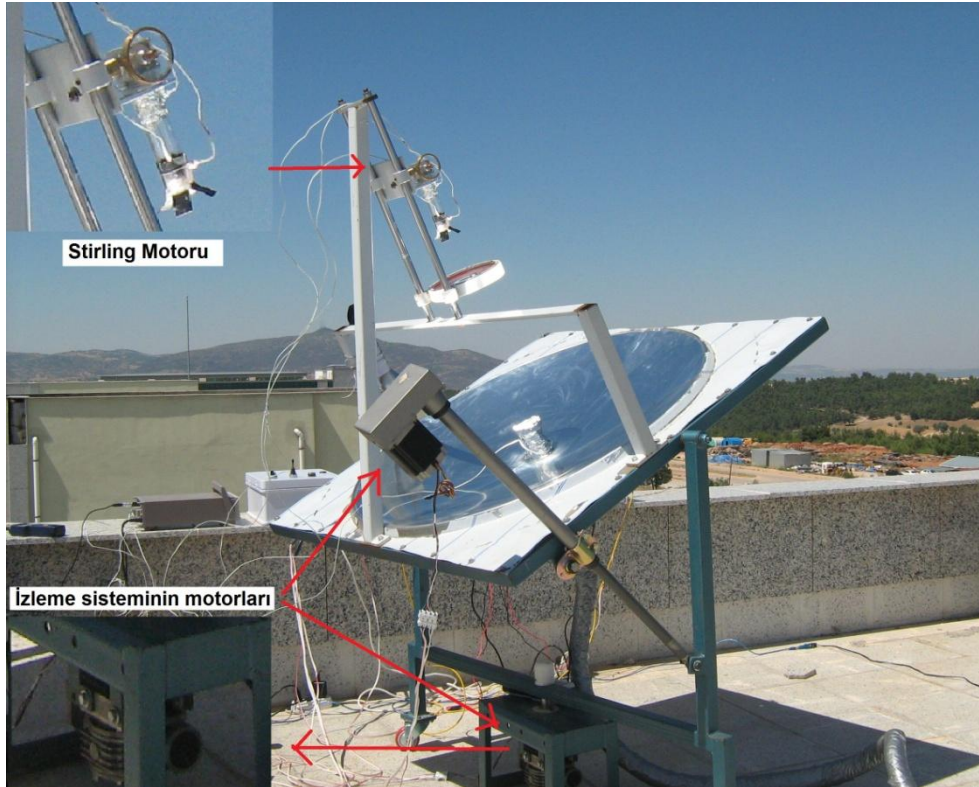
$$\eta_s = \frac{Q_{in,s}}{Q_{out,s}} \quad (6.1.25)$$

Sistemin tamamı için genel enerji verimi

$$\eta = \frac{Q_{out,s}}{A_a G_b} \quad (6.1.26)$$

7. SİSTEM TANITIMI ve DENEY TASARIMI

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 de deney sisteme ait fotoğraflar verilmektedir. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Aydınlatma ve Güç Üretimi Birleşik Sistemi'nin odak bölgesine yerleştirilecek soğuk ayna ile güneş enerjisi spektrumunun görünür bölgesini yansıtırken, infrared (IR) ve ultraviyole (UV) kısmını arkasına geçirmektedir. Resimde çalışma sistemi ile birlikte sıcaklık, ışınım problemleri ile veri kaydedici cihazlar görülmektedir. Stirling motorunun önünde yer alan soğuk ayna bu çalışmanın en önemli unsurudur. Uygun optik tasarım ile yansıtılarak çanağın orta noktasındaki fiber optik kablo soğuk ayna tarafından geçirilen IR ve UV ışınım ile de Stirling motor aracılığı ile mekanik enerji eldesi gerçekleştirilir. İstenen enerji miktarı göz önüne alınarak modül sayısı artırımı yolu ile alınan güç yükseltilebilir.



Şekil 7.1 Deney sisteminin genel görünüşü

Şekil 7.1 de çalışma sistemi ile birlikte sıcaklık, ışınım problemleri ile veri kayıt cihazları görülmektedir. Stirling motor özel tasarım bir konstrüksiyon ile çanakla

bütünleştirilmiştir. Tasarım ölçüm cihazlarının yerleştirilebilmesine de olanak tanımıştır.



Şekil 7.2 Deneysel sistemin arkadan görünüşü

Sistemde ölçülen parametreler: Güneş ışınımı ölçümü, rüzgar hızı ölçümü, direkt güneş ışınımı ölçümü, ısıl kamera ile sıcaklık ölçümü, ısıl çift ile sıcaklık ölçümü ve devir sayısı ölçümüdür.

Deneysel çalışmalarda toplanan veriler şu cihazlar kullanılarak ölçümlenmiştir: Meteoroloji istasyonu (Davis Vantage Pro 2), Pirheliyometre (Kipp&Zonen-CHP1), Işınımölçer (Delta Ohm Lp471), Isıl kamera (Fluke Ti27), Spektrofotometre (Spectralight ILT950), Isıl çift (Ordell KR6R6 K Tipi), Takometre (Lutron DT 2268).

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Aydınlatma ve Güç Üretimi Birleşik Sistemi'nin temel bileşenleri yoğunlaştırıcı paraboloidal çanak, soğuk ayna, güneşi çift eksenle izleme sistemi, fiber optik kablo demeti ve Stirling motor olup, sistemden hem

aydınlatma amaçlı hem de güç üretimi amacı ile yararlanmak mümkün olacaktır. Sistem bileşenleri ve özelliklerine aşağıda yer verilmiştir:

7.1 Yoğunlaştırıcı Çanak

Yoğunlaştırıcı çanak, noktasal odaklama yapabilen, yüzey hataları minimum olacak şekilde hazırlanmış sistem bileşenidir. Yoğunlaştırıcı çanağın yapımında yansıtıcılığı yüksek levhalardan yararlanılmıştır. Yoğunlaştırıcı çanak simetrik tip paraboloidal çanak olarak imal edilmiştir. Açıklık çapı 107 cm olan çanağın odak uzaklığı 58,7 cm, derinliği 12 cm, yarı kenar açısı $50,25^\circ$ dir. “Odak/çap” oranı bir çanaktan elde edilebilecek ışınım miktarında önem taşımaktadır. En etkin odaklama için bu değer 0,4’ten büyük olması istenir. Çalışmada imal edilen çanak için bu değer 0,53 tür. Kuramsal hesaplamalara göre, odakta oluşan görüntünün ideal olarak minimum ve maksimum çapları sırasıyla 1,3 ve 2,5 cm olarak ortaya konulmuştur. Ancak, çanaktaki yüzey hataları ve izleme sisteminin hata payı nedeniyle bu çaplardan daha büyük değerlerin elde edilmesi kaçınılmazdır.

7.2 İzleme Sistemi

Diğer önemli bileşen ise güneş ışınımının yoğunlaştırıcı çanağın açıklık alanına her an dik gelmesini sağlayan güneşi çift eksenli izleme sistemidir. Güneşi çift eksenli izleme sistemi, foto dirençle izleme sağlayan LDR sistemleri ile olmayıp, PC tabanlı kontrol ünitesi olan PLC otomasyon cihazıyla sağlanmıştır. PLC üniteleri içerisindeki güneşi çift eksenli izleme yazılım sayesinde, programına yüklenen algoritmaları hesaplayarak güneşin belirli bir zamanda nerede olacağını hesaplayıp çanak düzlemini ona göre yönlendirebilmektedir. İzleme sisteminde, 2 adet redüktör entegreli step motor, 1 adet pc tabanlı kontrol ünitesi, 2 adet step motor sürücüsü, 1 adet elle kullanım sürücüsü bulunmaktadır. PC tabanlı kontrol ünitesi yaptığı hesaplamaları sinyallerle motor sürücüsüne aktarmaktadır. Motor sürücüsü ise gelen sinyallere göre step motora güç vererek sistemi istenilen konuma getirmektedir. Sistem hem otomatik hem de elle kontrole müsaade etmektedir. Elle kullanım sürücüsü sayesinde, kontrol sistemine bütünleştirilmiş kumanda kolu ile sistem istenilen konuma getirilebilmektedir. İzleme sisteminin kullandığı enerji güç kaynağından sağlanmakta olup, kontrol ünitesi 12V ve 3A ile motorlar 24V ve 3A

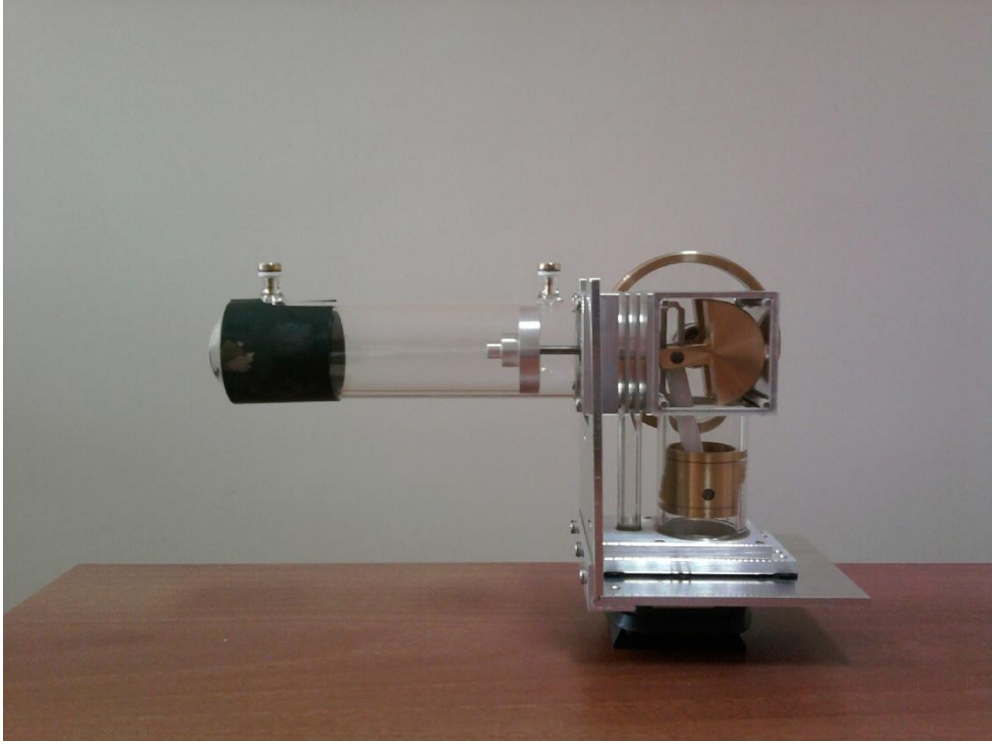
güce ihtiyaç duymaktadır. Ancak bu gücü her zaman kullanmamakta, yaklaşık 3 dakikada bir güneşi izleyecek şekilde konumunu değiştirmektedir.

7.3 Soğuk Ayna

Soğuk ayna özellikle teleskop yapımında kullanılan optik bir eleman olup, yansıtıcı yüzeyi IR ve UV bölgedeki ışınımı geçirmekte, görünür ışınımı yansıtılmaktadır. Diğer bir deyişle görünür bölge ışınımı yansıtılmakta, sıcaklık taşıyan ışınımı spektral olarak filtre ederek ayırmaktadır. Çalışmada, görünür bölge ışınımın fiber optik kablo demetine gönderilmesi amacına uygun olarak, küresel soğuk ayna kullanılmıştır. Böylece aynanın yansıtacağı görünür bölge ışınım fiber optik kablo demetine gönderilirken, aynanın arkasına geçen diğer ışınım ise Stirling motorun alıcısına odaklanabilmektedir. Soğuk aynanın tasarımı, yoğunlaştırıcı çanağın yüzey denkleminde yararlanarak ilgili firmanın kullandığı Zemax optik programında tasarlanmıştır.

7.4 Stirling Motor

Çalışmada kullanılan Stirling motor küçük ölçülerde bir motordur. Şekil 7.4.1 de görüldüğü gibi Stirling motorunun silindirleri dayanıklı camdan imal edilmiştir. Pistonları çelikten piston kolları sert plastikten (plaxiglass) üretilmiştir. Motorun alıcı kısmına ısıyı daha iyi alabilmesi için bakırdan yapılmış siyah renkte yutucu plaka konulmuştur. Deneysel sırasında, yoğunlaştırılmış güneş ışınımını daha iyi alabilmesi için, bu plaka geliştirilerek daha geniş ve kanatçıklı bir plaka ile değiştirilmiştir.



Şekil 7.4.1 Çalışmada kullanılan Stirling motor

Stirling motorunun çalışma akışkanı havadır ve çalışma basıncı 2500 Pa'dır. Yer değiştirme pistonunun ve güç pistonunun çapı sırasıyla 30 mm ve 24 mm'dir. Süpürme hacimleri ise sırasıyla 44 ve 32 cm³'tür. Stirling motorunun mekanik olarak gücü ise 1,5 W'dır.

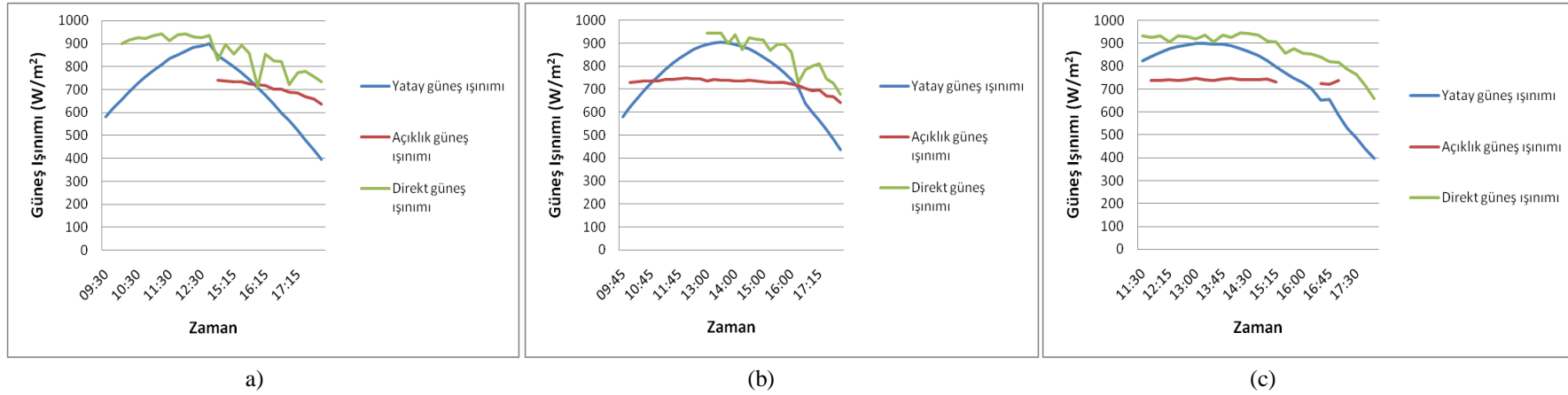
8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonucu spektral olarak ayrıştırılan güneş enerjisi sistemiyle bütünleştirilmiş stirling motorundan elde edilen veriler ile gerçekleştirilen analizler bu bölümde yer almıştır. Termodinamik modellemeler doğrultusunda sistemlerin enerji ve ekserji verimleri belirlenmiş ve grafikleri sunulmuştur. Son olarak deney düzeneğindeki ölçüm aletlerinden kaynaklanan hata oranlarının, sistemin enerji ve ekserji verimlerine olan etkisini içeren belirsizlik analizi sunulmuştur.

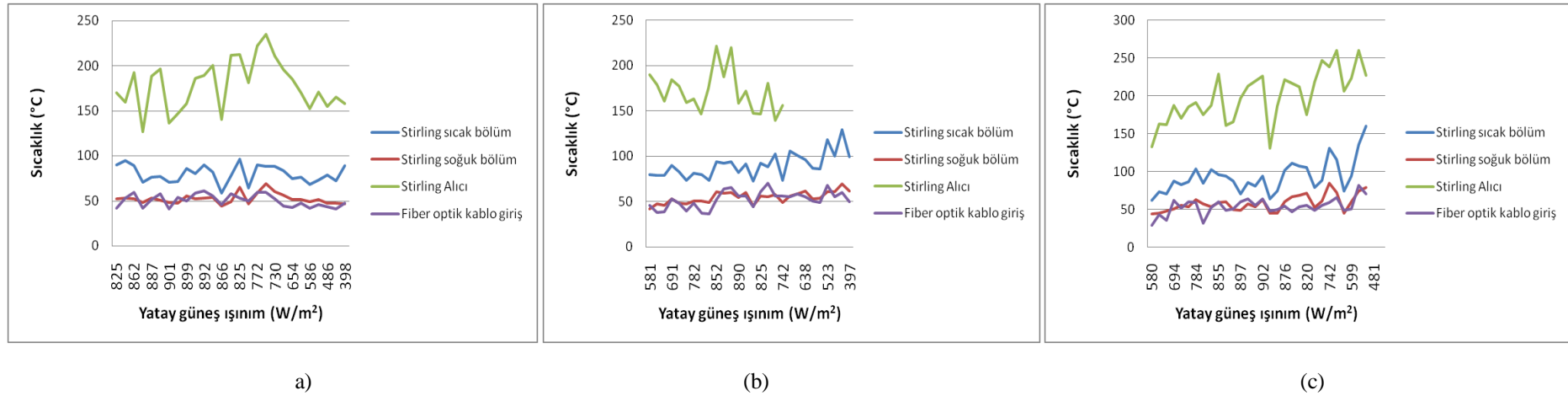
8.1 Termodinamik analiz

Spektral olarak ayrıştırılan yoğunlaştırılmış güneş ışımının Stirling motor ile bütünleştirilmesi temeline dayanan sistemde performans parametrelerinin belirlenmesi ve değişimlerinin değerlendirilmesi amacı ile Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası terasında kurulu olan deney sisteminde bir dizi ölçümler gerçekleştirilmiştir. 110M039 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında, Mart 2011 tarihinden itibaren Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi terasında bulunan meteoroloji istasyonu ile dış ortam sıcaklığı, rüzgar yönü ve şiddeti, yatay yüzey toplam (global) ışınım gibi çalışmada doğrudan gerekli ve kullanılan veriler kayıt altına alınmaktadır. Tez çalışması için deneyler gerçekleştirilirken, veri kayıt periyodu saatlik olan meteoroloji istasyonunun ayarları 15 dakika aralıklarla veri kaydedecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece proje sisteminin test edilebilmesi için gerekli, ancak sınırlı olarak yakalanabilen açık gök koşullarında daha fazla veri edinebilme olanağı geliştirilmiştir. Bu meteorolojik verilerin yanı sıra, ölçümlenecek parametreler; açıklık alanına gelen direkt normal güneş ışınımı (W/m^2), açıklık alanına gelen toplam güneş ışınımı (W/m^2) fiber optik kablo demeti giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$), Stirling motor alıcı sıcaklığı ($^{\circ}C$), Stirling motorun sıcak ve soğuk bölümlerinin sıcaklıkları ($^{\circ}C$), Stirling motorun devir sayısı (rpm) olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra yoğunlaştırıcı sistemde odakta elde edilen görüntünün dağılımının belirlenmesi ve sıcaklık kontrolü amacı ile termal kamera görüntülerinden yararlanılmıştır.

Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi terasına kurulan sistemle, 20, 21 ve 22 Haziran 2013 tarihlerinde 92 veri alınmıştır. Bu bölümde deneylerden elde edilen bulgular ortaya konarak tartışılmış, sistem parametreleri değerlendirilmiştir.



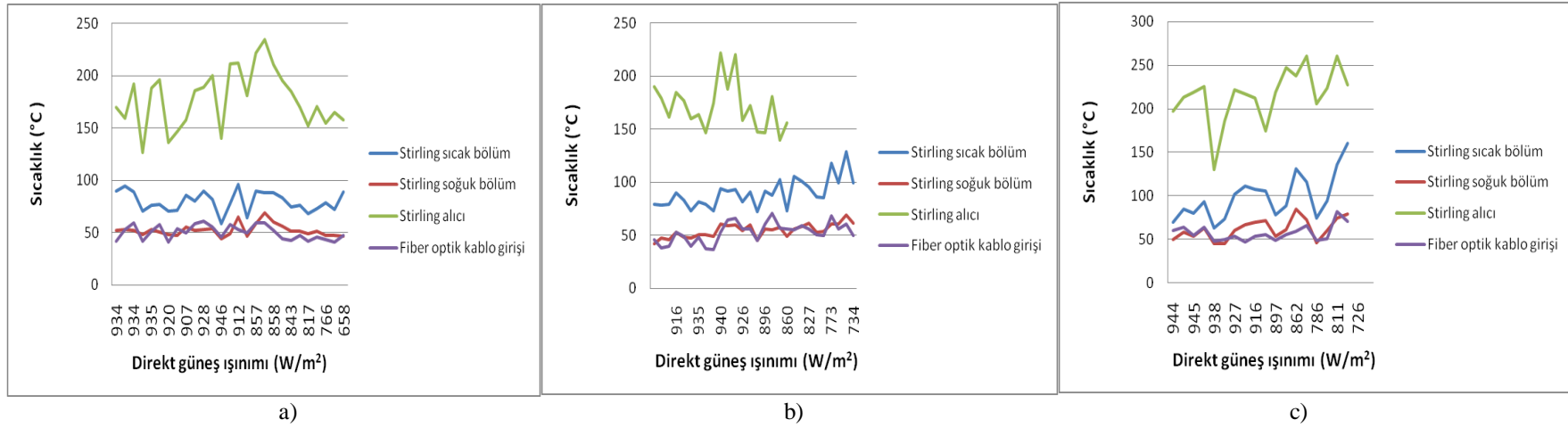
Şekil 8.1 Zamana bağlı olarak yatay toplam, açıklık alanı toplam ve direkt normal güneş ışınımı verileri (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran



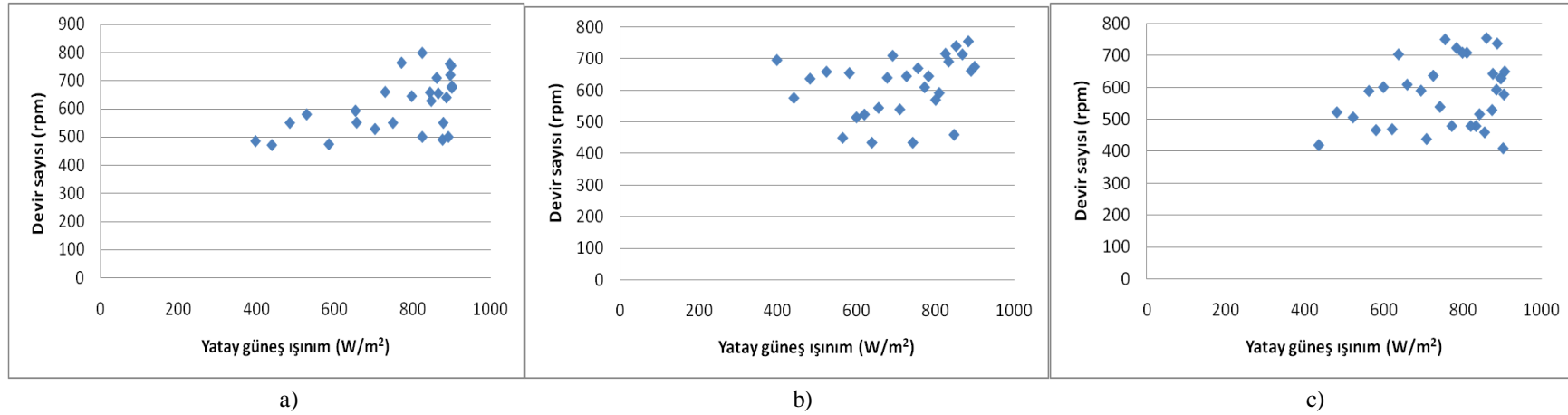
Şekil 8.2 Yatay güneş ışınımına bağlı olarak Stirling sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklığının değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran

Şekil 8.1’de zamana bağlı olarak yatay toplam, açıklık alanı toplam ve direkt normal güneş ışınımı verileri yer almaktadır. 20 Haziran günü için, 11:30-18:00 saatleri arasında, yatay toplam güneş ışınımı, açıklık alanına gelen toplam güneş ışınımı ve direkt normal güneş ışınımı, sırası ile, 398-901 W/m²; 722-748 W/m²; 658-948 W/m² değerleri arasında değişmektedir. 21 Haziran günü için, 09:30-18:00 saatleri arasında, yatay toplam güneş ışınımı, açıklık alanına gelen toplam güneş ışınımı ve direkt normal güneş ışınımı, sırası ile, 397-906 W/m²; 637-746 W/m²; 712-943 W/m² değerleri arasında değişmektedir. 22 Haziran günü için, 09:45-18:00 saatleri arasında, yatay toplam güneş ışınımı, açıklık alanına gelen toplam güneş ışınımı ve direkt normal güneş ışınımı, sırası ile 435-906 W/m²; 643-750 W/m²; 677-945 W/m² değerleri arasında değişmektedir.

Şekil 8,2’de Stirling motor sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklıklarının yatay güneş ışınımına bağlı olarak değişimi ifade edilmektedir. 20 Haziran günü için, yatay toplam güneş ışınımı 398-901 W/m² değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile 126,6-235°C; 58,3-95,9°C; 44,4-64,7°C; 42,1-61,2 °C aralığında değerler almaktadır. 21 Haziran günü için, yatay toplam güneş ışınımı 397-906 W/m² değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile 139,9-221,5°C; 72,3-128,9°C; 42,0-61,4°C; 36,3-67,8°C aralığında değişmektedir. Benzer şekilde 22 Haziran günü için ise, yatay toplam güneş ışınımı 435-906 W/m² değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile 130,5-260°C; 61,8-160,3°C; 44,4-81,8°C; 29,2-70,2°C aralığında ölçümlenmiştir.



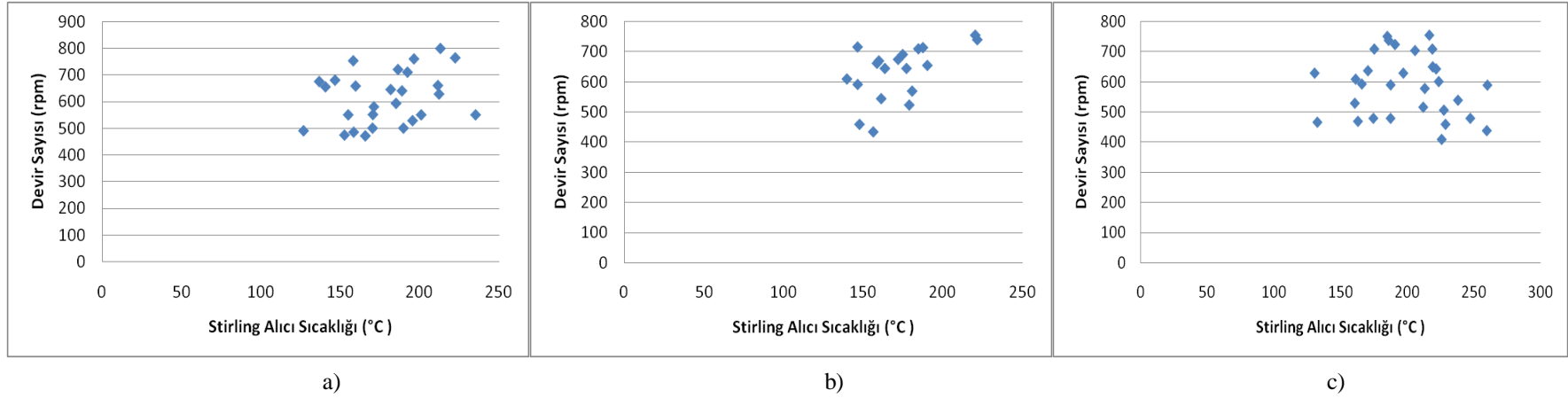
Şekil 8.3 Direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak Stirling sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklığının değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran



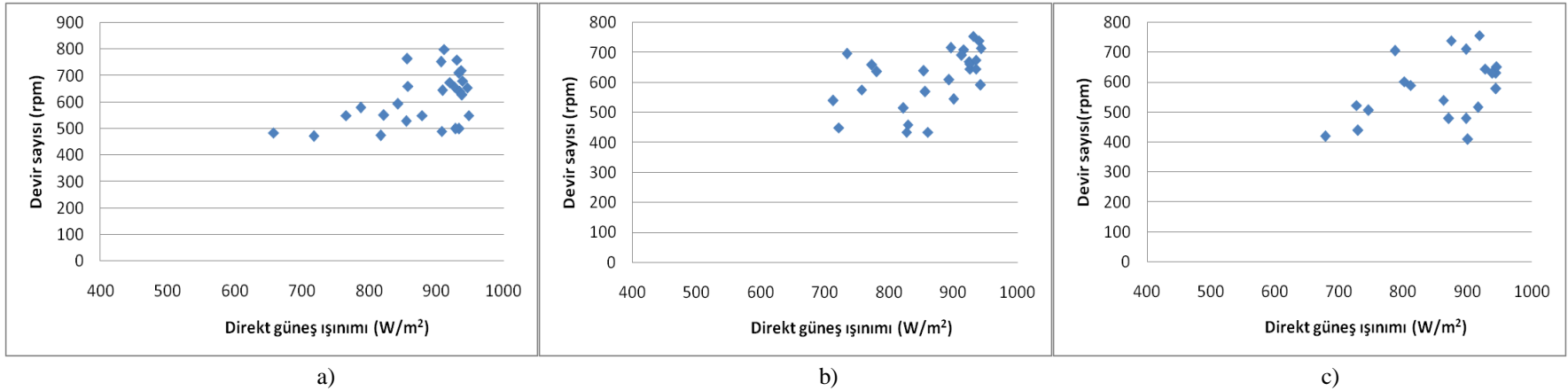
Şekil 8.4 Yatay toplam güneş ışınımına bağlı olarak motor devir sayısının değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran

Şekil 8.3’de Stirling motor sıcak bölüm, soğuk bölüm, alıcı ve fiber optik kablo demeti giriş sıcaklıklarının direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi ifade edilmektedir.

Şekil8.4’te motor devir sayısının yatay toplam güneş ışınımına bağlı değişimi görülmektedir. Buna göre, yatay toplam güneş ışınımı, 20-21-22 Haziran günlerinde 398-901;397-906;435-906 W/m² değerleri arasında değişirken, Stirling motor devir sayısı, sırası ile 471-799; 435-755; 410-756 rpm değerleri arasında değişmektedir. Grafikler incelenecek olursa, yatay toplam güneş ışınımı arttıkça, motor devir sayısının artma eğilimi içerisinde olduğu söylenebilir.



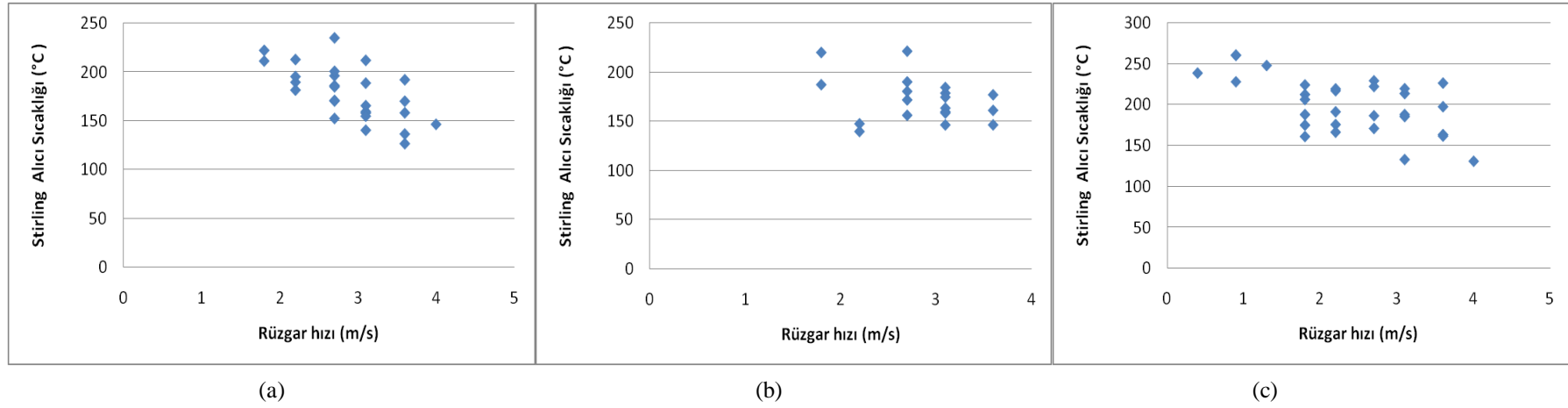
Şekil 8.5 Stirling motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran



Şekil 8.6 Stirling motor devir sayısının direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran

Şekil 8.5'te motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına bağlı değişimi gösterilmektedir. Deney verilerinin alındığı günler için devir sayısı ve Stirling motor alıcı sıcaklığının aldığı değerler yukarı ifade edilmektedir. Buna göre, motor devir sayısının, alıcı sıcaklığı arttıkça artma eğiliminde olduğu görülmekle birlikte, motor devir sayısının rüzgâr hızı gibi başka parametrelere de bağlı olmasından dolayı, anlamlı bir ilişki görülememektedir.

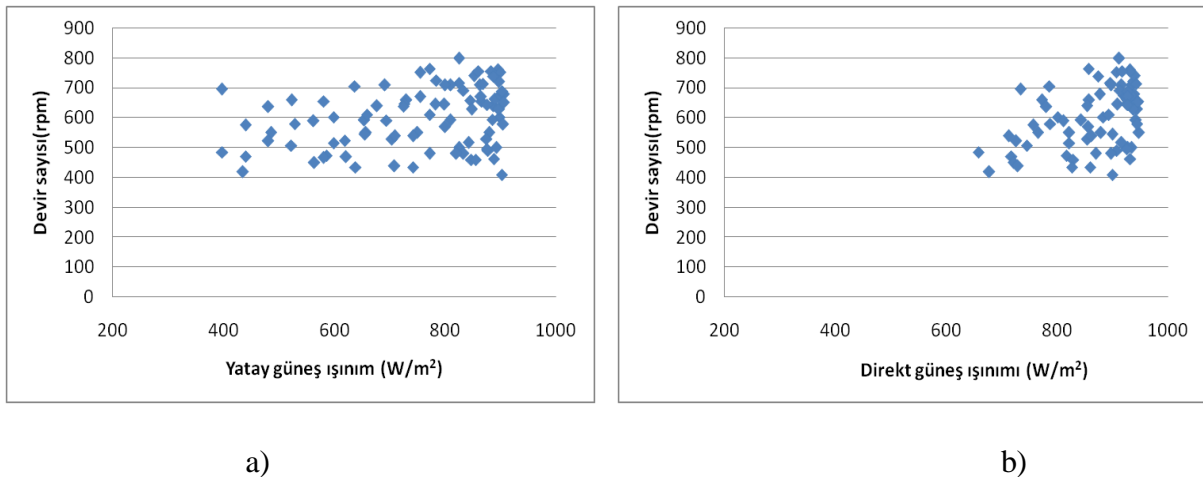
Şekil 8.6'da motor devir sayısının direkt normal güneş ışınımına bağlı değişimi yer almaktadır. Direkt normal güneş ışınımı arttıkça motor devir sayısı belirgin bir şekilde artmaktadır.



Şekil 8.7 Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi (a) 20 Haziran, b) 21 Haziran, c) 22 Haziran

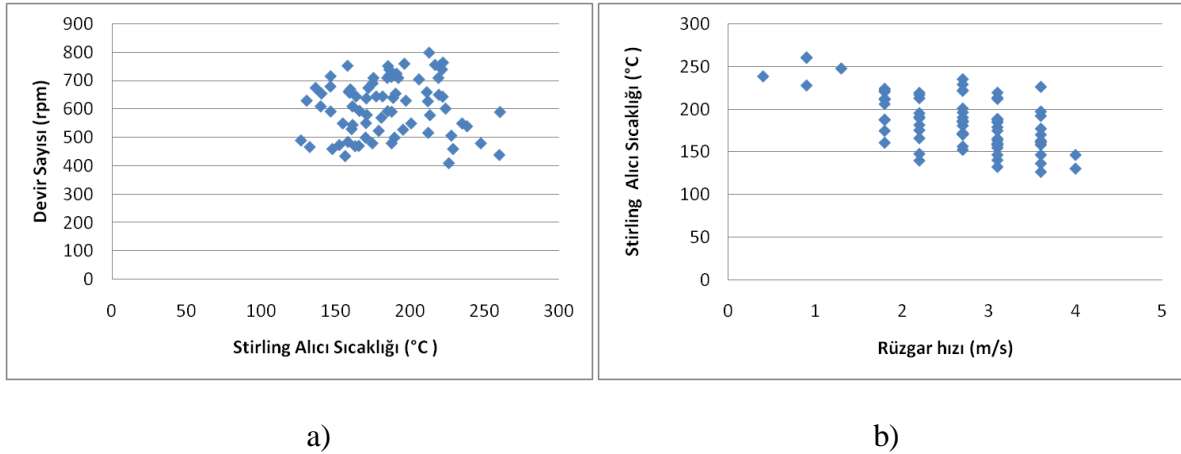
Şekil 8.7’de Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı değişimi ifade edilmektedir. 20-21-22 Haziran deney günlerinde rüzgâr hızı sırası ile 1,8-4; 1,8-3,6; 0,4-4 m/s değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığının aynı günler için yine sırası ile 126,6-235°C; 139,9-221,5°C; 130,5-260°C aralığında değer aldığı görülmektedir. Grafiklerden açıkça görüldüğü üzere, rüzgâr hızı arttıkça Stirling motor alıcı sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Rüzgâr hızı arttıkça, taşınım ile ısı kayıplarının anlamlı bir şekilde arttığı bilinmektedir. Rüzgâr hızı, bu sistemde Stirling motordan alınacak gücü etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu etkinin, motor verimini düşürmemesi için farklı tasarımlar değerlendirilebilir. Burada vurgulanması gereken bir diğer husus da şudur: Mevcut deney sisteminde, odakta yer alan Stirling motorun yoğunlaştırılarak odakta toplanan ışınımı daha iyi alabilmesi için motorun ucuna kanatçık tasarlanmış ve yerleştirilmiştir. Bu kanatçık yapısı, odakta dağılan ışınımı toplayacak özelliğe sahip olmakla birlikte, kanatçıklı yapı, artan yüzey alanı ile birlikte rüzgârla zorlanmış taşınım ısı kayıplarının artmasına, dolayısı ile motor performansının düşmesine neden olmaktadır. Performansın artması için, özellikle yansıtıcı çanak yüzey kalitesinin artırılması, güneşi çift eksenle izleme sisteminin duyarlılığının artırılması önem taşımaktadır. Böylece odakta, daha yoğun, küçük alana sahip bir görüntü elde edilebilir, yüzeyin küçülmesi ile kayıplar azaltılabilir.

Şekil 8.8’de devir sayısının yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişiminin tüm deney verileri üzerinden değerlendirilmesi yer almaktadır. Buna göre, motor devir sayısının yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımı arttıkça arttığı anlaşılmaktadır. Burada devir sayısının direkt normal güneş ışınımına yatay toplam güneş ışınımına oranla daha kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 8.8 Stirling motor devir sayısının (a) yatay toplam güneş ışınımına, (b) direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi

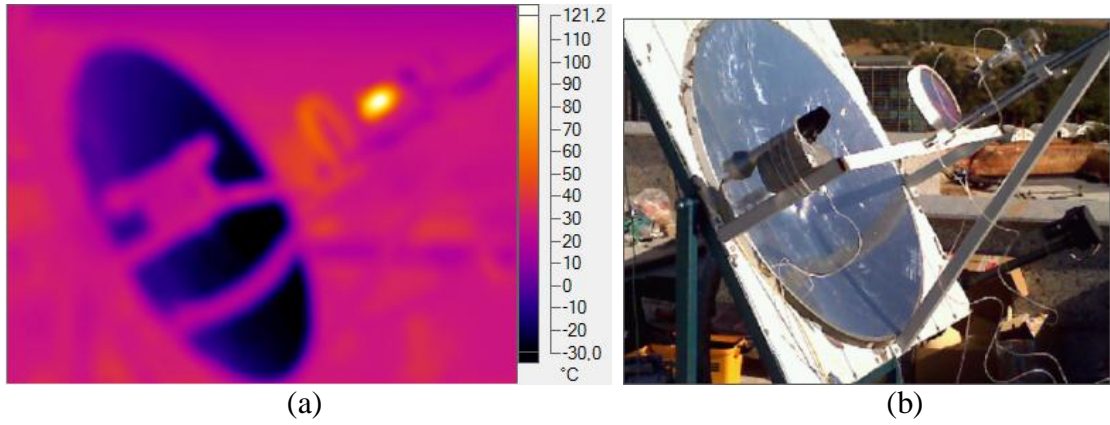
Şekil 8.9a'da Stirling motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına, Şekil 8.9b'de Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi tüm veriler üzerinden değerlendirilmektedir. Buna göre, Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızının artması ile azaldığı sonucuna ulaşılabilmek mümkündür. Şekil 8.9a'ya göre, motor alıcı sıcaklığı-rüzgâr arasındaki ilişki kadar kuvvetli olmasa da, motor alıcı sıcaklığı arttıkça, devir sayısının arttığı söylenebilir. Deneylerde edinilen gözlemlere göre, devir sayısının motor alıcı sıcaklığına beklenildiği kadar bağlı çıkmamasının nedenini şu şekilde açıklamak mümkündür: Stirling motorun alıcısında ortada cam kısım, bu cam kısmın etrafına sarılmış metal, kanatçıklı, siyah boyalı bir aparat bulunmaktadır. Odaklanan ve soğuk aynada spektral olarak ayrıştırılarak Stirling motorun alıcısına gelen yoğunlaştırılmış ışınım daha çok ortadaki cam bölüme gelmektedir. Bu cam bölmede geçirilerek Stirling motorun pistonuna ulaşmaktadır. Odağa gelen bu ışınımın, ciddi anlamda motorun pistonunun sıcaklığını arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 8.9(a) Stirling motor devir sayısının motor alıcı sıcaklığına, (b) Stirling motor alıcı sıcaklığının rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi

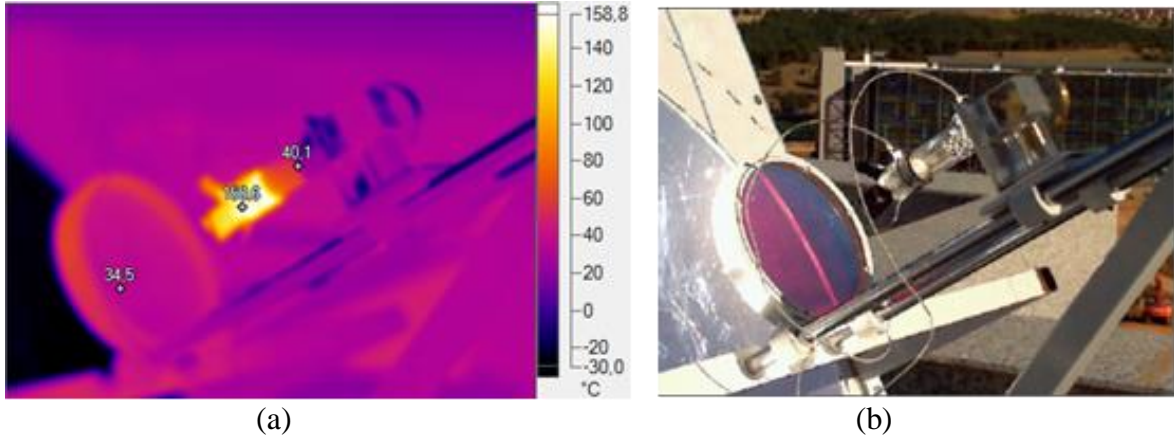
Bilindiği gibi, Stirling motorda, sıcak ve soğuk bölümlerin sıcaklık farkı ne kadar fazla olursa, motor o kadar verimli çalışmakta ve devir sayısı artmaktadır. Odağa gelen ışınımın camdan geçerek pistonu ulaşması ve pistonu ısıtması gerekli olan bu sıcaklık farkını düşürmektedir. Öyle ki, izleme sistemi çok iyi işlediği, odaklama sıkıntısı olmadığı ve rüzgâr hızının çok düşük olduğu deney anlarının bazılarında Stirling motorun durduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemin nedeninin, camdan geçen yoğunlaştırılmış ışınımın motorun pistonunu ısıtması, motor sıcak ve soğuk bölümlerinin sıcaklık farkının azalmasıdır.

Bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sisteminde odakta elde edilen görüntünün dağılımının belirlenmesi, sıcaklık tespiti ve sıcaklık kontrolünün gerçekleştirilmesi aşamalarında çok önemli bir role sahiptir. Bu kapsamda, deneyler sırasında termal kameradan yararlanılmıştır. Aşağıda deney sisteminin hem tamamına hem de bileşenlerine ait termal kamera görüntüleri ve değerlendirmelerine yer verilmiştir:



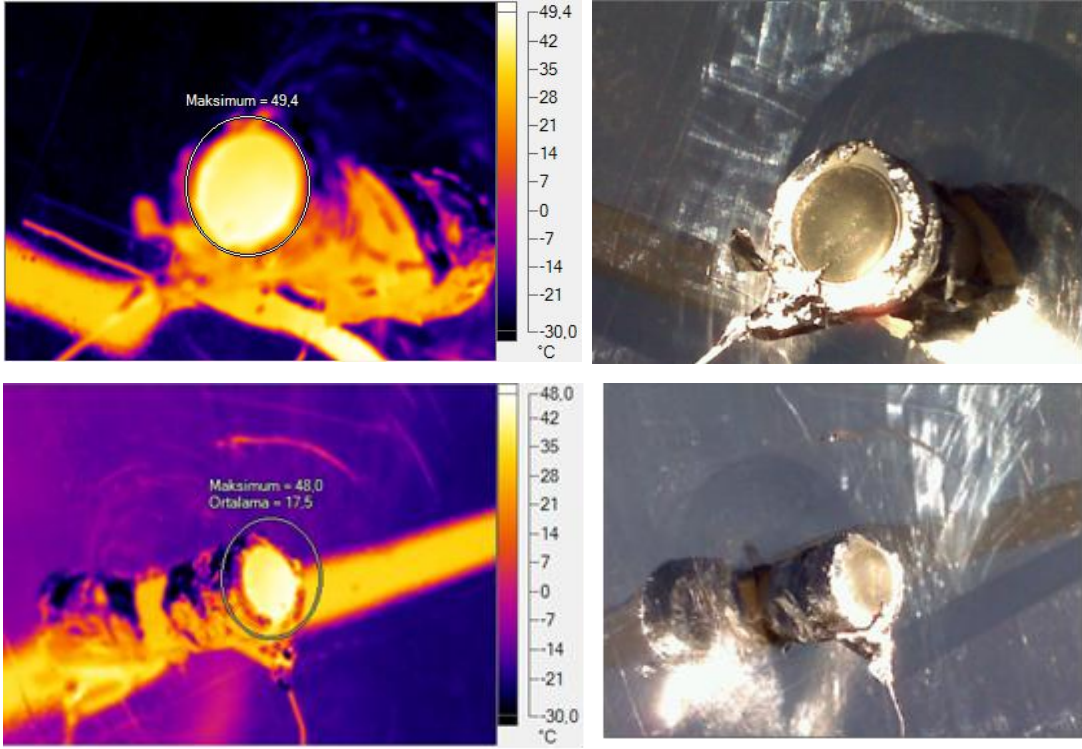
Şekil 8.10 (a) Sistemin bütününe ait ısı kamera görüntüsü(b)Isıl görüntü alındığı anda deney sistemi görüntüsü

Şekil 8.10'da sistemin bütünü termal kamera görüntüsü ile gerçek görüntüsü yan yana verilmiştir. Burada yansıtıcılık özelliği yüksek yoğunlaştırıcı çanağın sıcaklığının sıfırın altında görünmesinin nedeni, ısı kameranın emissivite (yayıcılık) ayarının Stirling motora göre yapılmasıdır. Yoğunlaştırıcı çanak ışınların çoğunu çevresindeki cisimlere göre yansıttığı için bu şekilde bir renk vermektedir.



Şekil 8.11 Soğuk ayna ve Stirling motora ait termal kamera görüntüleri

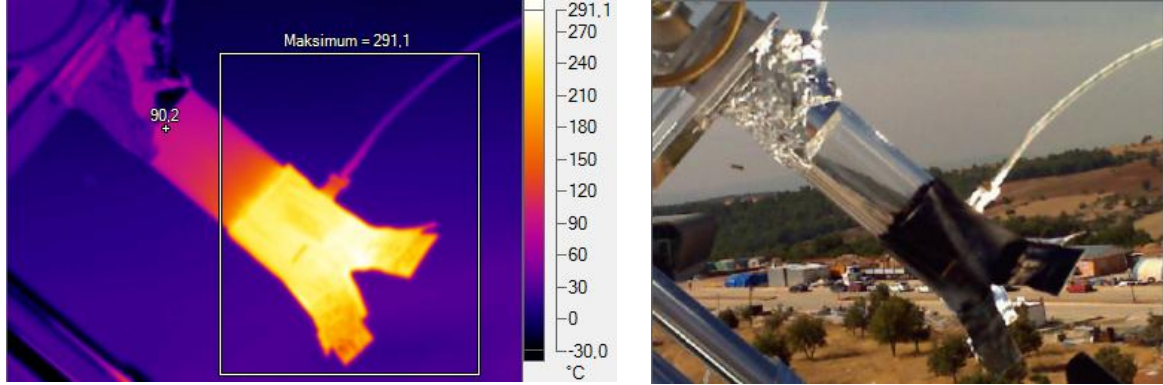
Şekil 8.11’de soğuk ayna ve Stirling motor bir arada görülmektedir. Soğuk ayna üzerinde belirtilen sıcaklık 34,5 °C, motor sıcak ve soğuk bölümleri için sırasıyla 159,6 ve 40,1 °C olarak belirlenmiştir. Şekil 11.b’de yer alan soğuk aynanın pembe-mor gibi bir renk sergilemesinin nedeni soğuk aynanın bu yüzünün IR ve UV ışınlarını geçiren yüzey özelliklerine sahip olmasıdır. Şekil 8.11’de dikkat edilecek olursa, soğuk ayna ve Stirling motor için özel tasarım bir konstrüksiyon gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda soğuk ayna ve motor bileşenleri çanağın asal ekseninde ileri-geri hareket edebilecek ve gerektiğinde odak ayarlamaları yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Burada vurgulanmalıdır ki, spektral ayrıştırma temeline dayalı yoğunlaştırıcı uygulamasında, sistemin başarıya ulaşması ve deneysel verilerin alınabilmesi için optimum boyutlandırma ve tasarımı, aynı zamanda güneşi izleme sisteminin hassasiyetini artırma üzerinde çalışılması gerekmektedir.



Şekil 8.12 Fiber optik kablo girişine ait termal kamera görüntüleri

Şekil 8.12’de fiber optik kablo demeti girişine ait termal kamera görüntüsü bulunmaktadır. Resimlerinin sol tarafında ısıl, sağ tarafında ise gerçek görüntüsü yer almaktadır. Fotoğraftan da anlaşılacağı gibi maksimum fiber optik kablo demeti sıcaklığı bu anlık görüntüler için 49,4°C ve 48°C olarak gösterilmektedir. Deneilerin başlangıcında, soğuk aynadan fiber optik kablo demetine odaklanarak yansıtılan görünür bölge ışımının, yüksek sıcaklıklara neden olup fiber optik kabloları zarara verebilme ihtimaline karşı fiber optik kablo demeti girişine fiber optik bir filtre yerleştirilmiştir. Bu filtre ile fiber optik kablo demetinin sıcaklık etkisiyle yanma, erime ve bozulma gibi etkilere maruz kalmasının engellenmesi amaçlanmıştır. PMMA maddesinden yapılan fiber optik kabloların özellikleri 70°C üzerinde bozulmaya başlamaktadır. Deneiler ilerledikçe, ısıl kamera görüntüleri ve fiber optik kablo demeti girişine yerleştirilen sıcaklık probundan elde edilen veriler ışığında kablo demeti önünden optik filtre kaldırılmış, doğrudan soğuk ayna tarafından yansıtılan görünür bölge ışınları fiber optik kablo demetine gönderilmiştir. Bununla birlikte, fiber optik kablo demeti girişi,

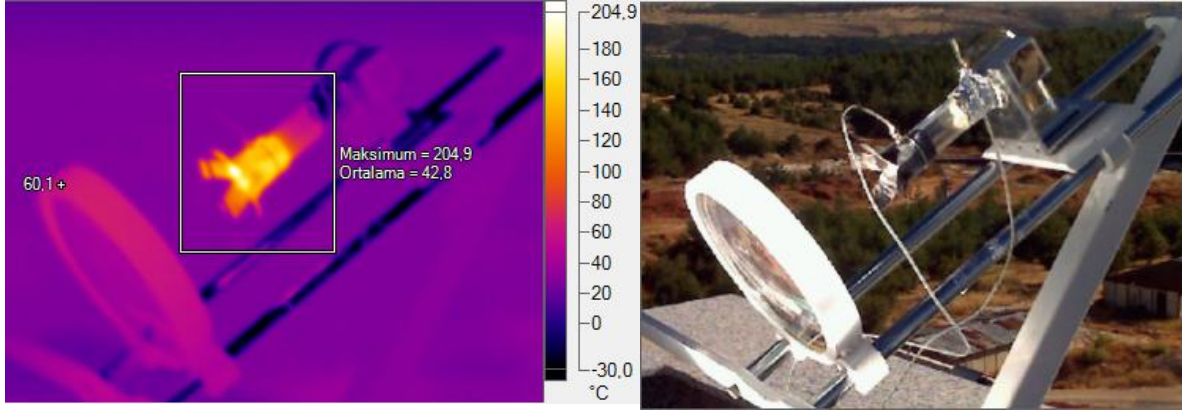
soğuk aynanın çanağa bakan yüzeyi, Stirling motor sıcak ve soğuk bölümlerinin sıcaklık ölçümleri için yüksek sıcaklıklara dayanıklı sıcaklık problemleri yaptırılmıştır. Bu sıcaklık problemleri K tipi termoçift olup, etrafları cam fiber ile kaplıdır. Böylece yoğunlaştırıcı uygulamaları için yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda zarar görmemeleri sağlanmaktadır.



Şekil 8.13 Stirling motora ait termal kamera görüntüleri

Şekil 8.13'te Stirling motora ait termal kamera görüntüsü bulunmaktadır. Fotoğraftan da anlaşılacağı gibi motorun alıcısına yerleştirilen siyah boyanmış ve kanatçıklı yapıya sahip aparat daha fazla ışınımın tutulmasını sağlamıştır. Motorun sıcak kısmında maksimum 291,1 °C'lik bir sıcaklığa ulaşılmıştır.

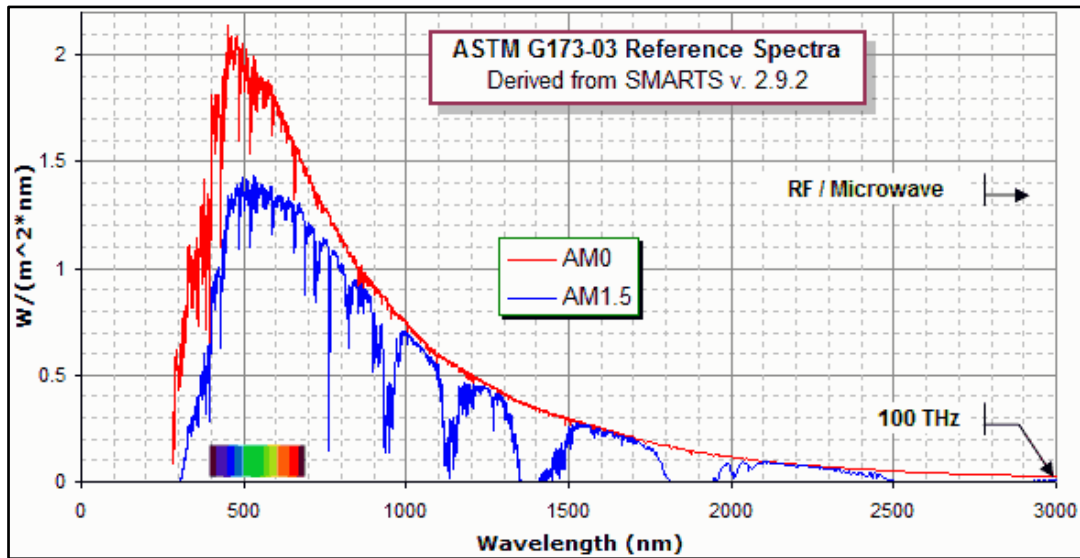
Yoğunlaştırılmış güneş ışınımının spektral ayrıştırmasının gerçekleştirilmesi başarılmıştır. Ayrıştırma ile görünür bölge ile IR-UV ışınım yoğunlaştırma düzeyinde birbirinden ayrılmış, istenilen noktaya aktarılmış ve hem aydınlatma hem de güç üretimi için kullanılmıştır. Bu yaklaşımın birçok yeni konuya ve çalışma alanına uygulanabileceği ümit edilmektedir.



Şekil 8.14 Stirling motora ait termal kamera görüntüleri

Şekil 8.14'te ayna ve Stirling motora ait termal kamera görüntüleri verilmektedir. Termal fotoğrafın çekildiği anda, Stirling motorun sıcak bölümünün maksimum sıcaklığının $204,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu belirlenmiştir. Fotoğraftan anlaşılacağı üzere soğuk aynanın içine yerleştirildiği metal bileziğin sıcaklığı ise $60,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak işaretlenmiştir. Tezin amacı, önemi ve kapsamı ile ilgili bölümde de ifade edildiği gibi, ortaya konulan spektral ayrıştırma temeline dayalı olan bu çalışmanın en önemli ayırt edici özelliği yoğunlaştırılmış güneş ışınımının spektral olarak ayrıştırılmasıdır. Bu nedenle spektral ayrıştırma için kullanılan soğuk aynanın bu özelliğinin ortaya konması önem taşımaktadır.

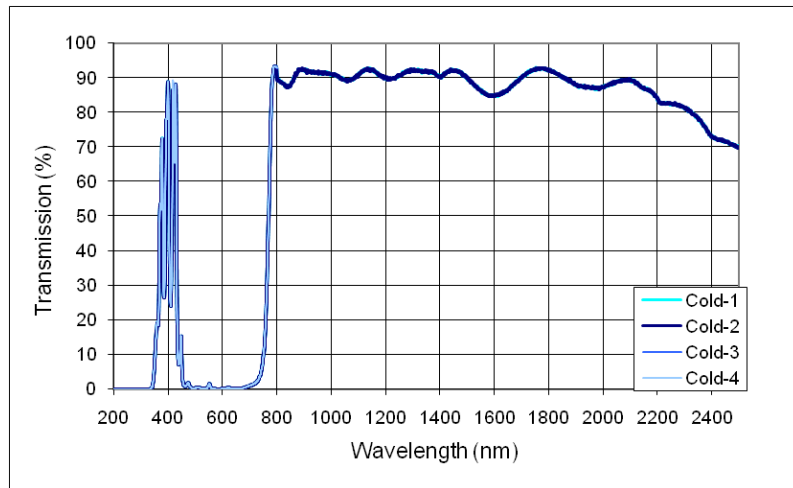
Güneş ışınımının spektrumu Şekil 8.15 de görüldüğü gibi içerisinde ultraviyole (UV) görünür bölge ve infrared (IR) ışınlarını kapsamaktadır.



Şekil 8. 15 Standart güneş enerjisi spektrumu [37]

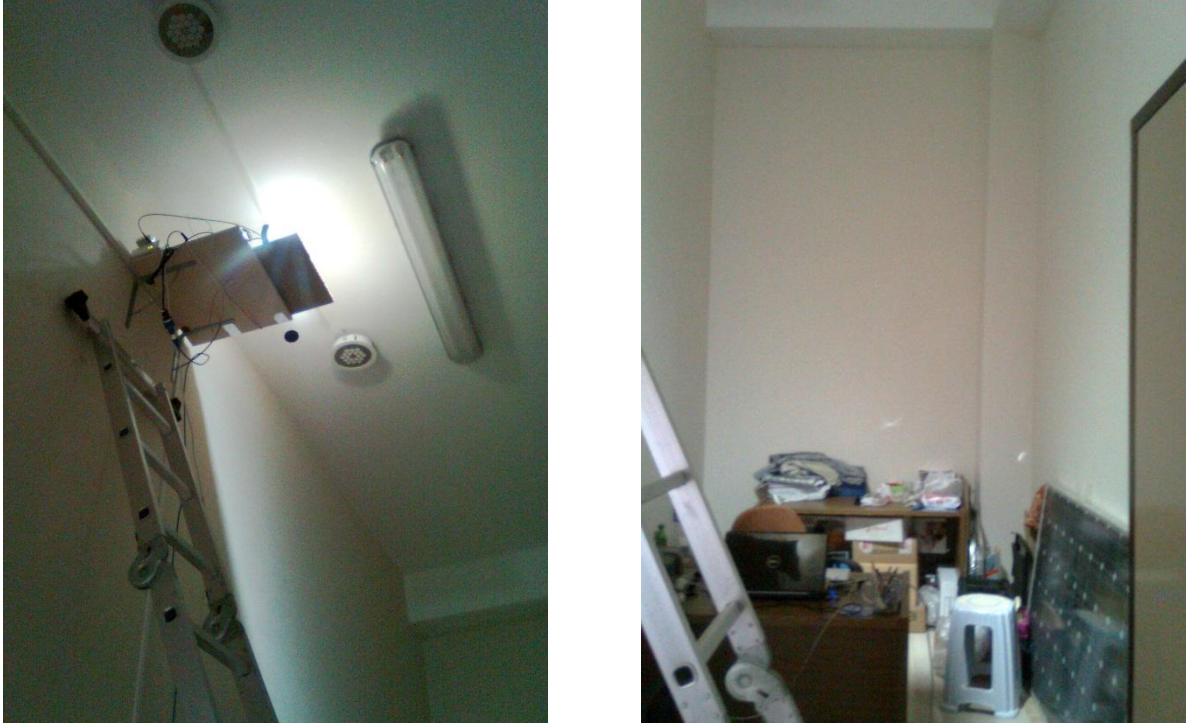
Güneş enerjisi çok geniş bir spektral aralığa sahiptir. Güneş enerjisi spektrumundan tümüyle yararlanabilmek için kullanılan güneş enerjisi sistemlerinin cevap aralıklarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin cevap aralıklarını belirledikten sonra spektral filtreleme özelliği bulunan sıcak ve soğuk aynalardan yararlanılarak güneş enerjisinin istenilen dalga boyu aralığında gelen ışınlarından yararlanmak mümkündür [4].

Şekil 8.16'te Ulusal Meteoroloji Enstitüsünde analiz edilen soğuk aynanın spektral geçirgenlik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 8.16 Soğuk aynaların spektral ayrıştırma özeliğini [4,34]

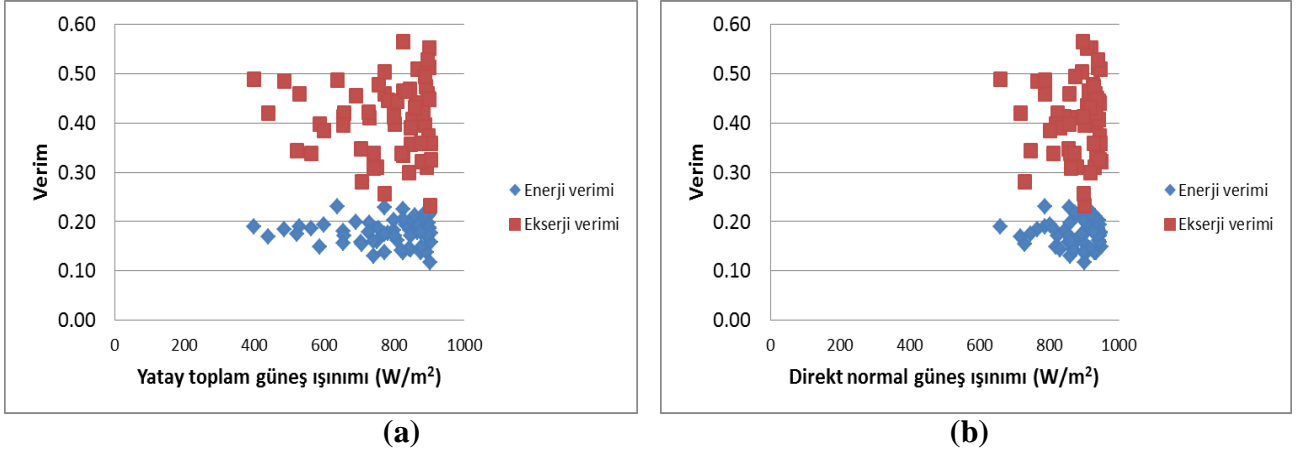
Şekilde görüldüğü gibi soğuk ayna, yansıtıcı yüzeyi IR ve UV bölgedeki ışınımı geçirmekte, görünür ışınımı yansıtılmaktadır. Diğer bir deyişle de görünür bölge ışınımı yansıtılmakta, sıcaklık taşıyan ışınımı spektral olarak filtre ederek ayırmaktadır. Bu sayede sadece görünür bölge ışınımını aktarabilen fiber optik kabloya, görünür bölge ışınımı yansıtılarak deney odasının aydınlatılması sağlanmıştır.



Şekil 8.17 Test odasında fiber optik kablo demeti çıkışındaki ışınım ve odada sağlanan aydınlık düzeyi

Şekil 8.17’de test odasında fiber optik kablo demeti çıkışındaki ışınım ve odada sağlanan aydınlık düzeyine ait fotoğraflar yer almaktadır. Fiber optik kablo demeti çıkışında verilerin alınması için kurulan düzenek ve çıkış ışınımı ile bu ışınımın test odasında oluşturduğu aydınlık düzeyi görülmektedir.

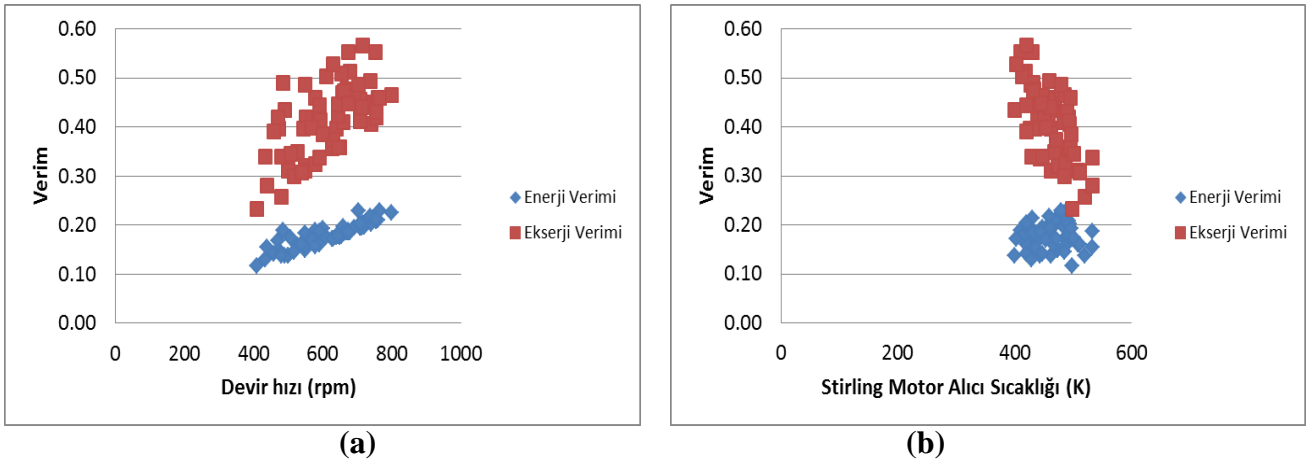
Bu değerlendirmelerin yanı sıra, sistemin Stirling motorla ilgili olan bölümünün enerji ve ekserji analizi, kurumsal modelleme bölümünde sunulan yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre ulaşılan sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:



Şekil 8.18 Stirling motor enerji ve ekserji veriminin (a) yatay toplam güneş ışınımı, (b) direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi

Şekil 8.18’de Stirling motor enerji ve ekserji veriminin yatay toplam güneş ışınımı ve direkt normal güneş ışınımına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Buna göre; yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımı sırası ile $397-906 \text{ W/m}^2$ ve $658-948 \text{ W/m}^2$ aralıklarında değerler alırken, Stirling motorun enerji ve ekserji verimleri sırası ile $0,12-0,23$; $0,23-0,55$ değerleri arasında değişmektedir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi uygulamasında Stirling motor için ekserji veriminin enerji veriminden yüksek olması dikkat çekicidir.

Şekil 8.19'da Stirling motor enerji ve ekserji veriminin devir sayısı ve motor alıcı sıcaklığına bağlı olarak değişimi sunulmaktadır. Şekil 8.20a'da devir sayısı arttıkça enerji ve ekserji verimlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 8.20b'de ise ekserji veriminin Stirling motor alıcı sıcaklığı arttıkça azaldığı anlaşılmaktadır. Buradan şöyle bir sonuç çıkarmak mümkündür; odakta alıcı sıcaklığını artırdıkça daha fazla devir sayısı elde etmekle birlikte, yararlı işe dönüştürebilme performansı sıcaklık arttıkça azalmaktadır.



Şekil 8.19 Stirling motor enerji ve ekserji veriminin (a) devir sayısı, (b) motor alıcı sıcaklığına bağlı olarak değişimi

8.2 Belirsizlik analizi

Deneyel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hata tiplerinin üç ana grupta toplamak mümkündür [38]. Birinci olarak; deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sebebi genellikle kesin olarak bilinmeyen, aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar, üçüncü olarak; deney ve gereçlerinde rastgele elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden vs. kaynaklanan rastgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rastgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur [38] Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır ve uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabilir. Ölçü aletinin imalatının da doğru yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rastgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır [39]. Bu bölümde, deneysel ölçümlerde kullanılan cihazlar ve özellikleri, hata miktarları ve ölçümler sonucu elde edilen parametrelerin oluşturduğu belirsizlikler incelenmiştir.

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Aydınlatma ve Güç Üretimi Birleşik Sistemi'ne ilişkin gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda toplanan veriler, aşağıda belirtilen cihazlar kullanılarak elde edilmiştir:

- a. Soğuk aynanın spektral geçirgenliği (nm), spektrofotometre
- b. Dış ortam yatay güneş ısınımı (W/m^2); meteoroloji istasyonu
- c. Rüzgar hızı (m/s); meteoroloji istasyonu
- d. Direkt güneş ısınımı (W/m^2); pirheliyometre
- e. Açıklık ısınımı (W/m^2); Işınımölçer
- f. Termal görüntü ($^{\circ}C$); termal kamera
- g. Sıcaklık ölçümü ($^{\circ}C$); ısı çifti
- h. Motor devri ölçümü (dev/dk); takometre

Cihazların hata oranları dikkate alınarak gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonucu, ölçümlenen değerlerle elde edilen enerji verimi ve ekserji verimine ilişkin ortalama değerler ile hata değerleri sırasıyla $0.18 \pm 5\%$, $0.41 \pm 8.7\%$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.1 Deneyleerde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri

Cihaz Adı	Özellikleri
Meteoroloji istasyonu (Davis Vantage Pro 2)	1-67 m/s hızları arasında rüzgar ölçümü yapabilmektedir. ± 5 (%) 0-1800 W/m ² aralığında ışıınım ölçümü yapabilmektedir. ± 5 (%)
Pirheliyometre (Kipp&Zonen-CHP1)	200 ile 4000 nm spektral aralığında direkt güneş ışıınıını ölçebilmektedir. 7 - 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, ± 0.5 (%)
İşınıımölçer (Delta Ohm Lp471)	400 ile 1050nm spektral cevap aralığında çalışmaktadır. ± 5 (%)
Termal kamera (Fluke Ti27)	Termal görüntü alabilmektedir. -20°C ile +600°C arasında ölçüm yapabilmektedir. ± 3 (%)
Spektrofotometre (Spectralight ILT950)	350-1050 nm aralığında ölçüm yapabilmektedir. ± 5 (%)
Isıl çift (Ordell KR6R6 K Tipi)	-200 ile 750 C arasında ölçüm yapabilmektedir. ± 0.2 (%) $\pm 0,5$ °C
Takometre (Lutron DT 2268)	0.5 ile 100,000 devir/dk aralığında ölçüm yapabilmektedir. ± 0.05 (%)

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde spektral olarak ayrıştırılan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile bütünleştirilmiş Stirling motorunun performansına etki eden parametreler ve deneysel verileri ışığında gerçekleştirilen termodinamik analizlerinden ulaşılan sonuçlar listelenmiş, ardından sistemin daha verimli çalıştırılabilmesi ve geliştirilebilmesi için öneriler sunulmuştur.

9.1 Sonuç

- a. Yatay toplam güneş ışınımı $398-901 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile $126,6-235^\circ\text{C}$; $58,3-95,9^\circ\text{C}$; $44,4-64,7^\circ\text{C}$; $42,1-61,2 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında değerler almaktadır.
- b. Yatay toplam güneş ışınımı $397-906 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile $139,9-221,5^\circ\text{C}$; $72,3-128,9^\circ\text{C}$; $42,0-61,4^\circ\text{C}$; $36,3-67,8^\circ\text{C}$ aralığında değişmektedir.
- c. Yatay toplam güneş ışınımı $435-906 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığı, sıcak bölüm ve soğuk bölümleri ile fiber optik kablo demeti girişi sıcaklıkları sırası ile $130,5-260^\circ\text{C}$; $61,8-160,3^\circ\text{C}$; $44,4-81,8^\circ\text{C}$; $29,2-70,2^\circ\text{C}$ aralığında ölçümlenmiştir.
- d. Yatay toplam güneş ışınımı, $398-901; 397-906; 435-906 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişirken, Stirling motor devir sayısı, sırası ile $471-799$; $435-755$; $410-756 \text{ rpm}$ değerleri arasında değişmektedir. Yatay toplam güneş ışınımı arttıkça, motor devir sayısının artma eğilimi içerisindedir.
- e. Stirling motor devir sayısı yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımını arttıkça artmaktadır. Yatay toplam güneş ışınımına oranla, devir sayısının, direkt normal güneş ışınımına daha kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu söylenebilir.
- f. Rüzgar hızı sırası ile $1,8-4$; $1,8-3,6$; $0,4-4 \text{ m/s}$ değerleri arasında değişirken, Stirling motor alıcı sıcaklığının, sırası ile $126,6-235^\circ\text{C}$; $139,9-221,5^\circ\text{C}$; $130,5-260^\circ\text{C}$ aralığında değer aldığı görülmektedir. Rüzgar hızı arttıkça Stirling motor alıcı sıcaklığı düşmektedir.
- g. Yatay toplam ve direkt normal güneş ışınımı sırası ile $397-906 \text{ W/m}^2$ ve $658-948 \text{ W/m}^2$ aralıklarında değerler alırken, Stirling motorun enerji ve ekserji verimleri sırası ile $0,12-0,23$; $0,23-0,55$ değerleri arasında değişmektedir.

- h.** Devir sayısı arttıkça enerji ve ekserji verimleri artmaktadır.
- i.** Stirling motor alıcı sıcaklığı arttıkça ekserji verimi düşmektedir.
- j.** Sistemde bulunun soğuk ayna, üzerinde yoğunlaştırılmış güneş ışınımı geçmesine rağmen, ışınımı geçirmekte ve yansıtmakta olup ısınmamaktadır. Isıl kamera görüntülerinden anlaşıldığı üzere, soğuk ayna yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 30-40° C sıcaklık aralığında kalmaktadır. Bu durum, soğuk aynanın spektral ayrıştırma görevini yerine getirdiğini ifade eden göstergelerden biri olarak değerlendirilebilir.
- k.** Deneyler sırasında, fiber optik kablunun giriş kısmının sıcaklığı fiber optik kablolarına zarar verecek düzeye erişmemiştir. Böylece sistemde optik bir filtre kullanmak gerekmemektedir.

9.2 Öneriler

- a)** Yoğunlaştırıcı çanağın yapımında yansıtıcılığı yüksek levhalardan yararlanılmıştır. Yansıtıcı yüzeyin kalitesi daha da artırılarak yansıtma oranı artırılabilir.
- b)** Çalışmalarda ölçüm alınırken Stirling motorunun çalışabilecek en yüksek devirde çalıştığı gözlemlenmiştir. Sisteme adapte edilen Stirling motorunun daha büyüğü seçilebilir.
- c)** Deneyler sırasında, yoğunlaştırılmış güneş ışınımının Stirling motorun cam kısmından geçip pistonu ulaştığı ve pistonu ısıttığı görülmüştür. Stirling motorda sıcaklık farkını artırabilmek için Stirling alıcısı cam yerine ısıyı daha çok soğuracak ve geçirmeyecek başka bir malzeme ile kaplanabilir, böyle piston kısmının ısınması engellenebilir.
- d)** Stirling motorun alıcı kısmına daha geniş bir alanına düşen ışınimleri alabilmesi amacı ile kanatçıklı bir aparat hazırlanmıştır. Stirling motorun alıcı kısmına ışığı daha iyi soğurabilen kanatçıklı bir aparat hazırlanabilir. Ancak bu aparat hazırlanırken, yüzey alanını gerektiğinden fazla artırmayacak şekilde optimize edilmelidir. Gerektiğinden fazla yüzey alanı, taşınımıyla ısı kayıplarını artırmaktadır.
- e)** Çalışma sırasında sistemin rüzgar yükünden etkilendiği tespit edilmiştir. Sistemin mekanik gücünün artırılması rüzgarda sallanmasının engellenmesi gerekmektedir.
- f)** Sistemin termo-ekonomik analizi gerçekleştirilmelidir.
- g)** Sonraki çalışmalarda farklı tür Stirling motorlar denenebilir. Spektral ayrıştırma yaklaşımı farklı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerine uygulanabilir.

Küresel ısınmanın etkilerinin sürekli olarak hissettiğimiz şu günlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve bu kaynakların verimlerinin artırılması gittikçe önem

kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarımızın en önemlisi olan güneşin verimli şekilde kullanılması için birçok çalışma yapılmaktadır. Çalışmamızda konu edilen spektral ayrıştırma yaklaşımı ile Stirling motoru ve aydınlatma sistemi kullanılarak güneş enerjisinden en etkin şekilde yararlanma amaçlanmıştır. Bu çalışmanın, benzer birçok yeni konulara ve çalışma alanlarına uygulanabileceği ümit edilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Uyar, T. S. “Nükleer Enerji, Yenilenebilir Enerji Kaynakları. Enerji Politikaları”,Bursa, (sf 24-33, 51-57, 71-83), (2007).
2. İnternet : <http://www.nrel.gov> (2013).
3. İnternet : <http://www.eie.gov.tr> (2013).
4. C Kandilli, G Külahlı, “Investigation of Spectrally Decomposed Concentrated Solar Energy Systems”,**Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**, (2012).
5. Soteris Kalogirou, “Solar Energy Engineering: Processes and Systems”, **Elsevier Inc.**, ABD, (2009).
6. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi, **EİE**, Ankara,1-6, (2000).
7. John A. Duffie, William A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”,**John Wiley & Sons Inc**, (1991).
8. Çengel, Y.A., Michael, A. Boles,“Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik”, **Literatür Yayınları**, (2006).
9. Tekin Y, 'Stirling çevrimi ile çalışan V- tipi soğutucunun termodinamik analizi', **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**,(2006).
10. Walker, G., “Stirling Engines”, **Oxford University Press**, United States,126-129, (1980).
11. Martini, W.R., “Stirling Engine Design Manual”, **University Press of the Pacific**, USA, 78-235 (2004).
12. Urelli, I., Rallis, C.J., “Stirling Cycle Engine Development- A Review”, **University of Witwatersrand, Department of Mechanical Engineering**, 67: 27-35 (1975).
13. Karabulut, H., Yüsesu, H.S., Koca, A., “Manufacturing and Testing of a V-Type Stirling Engine”, **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, 24: 71-80 (2000).
14. Walker, G., “Stirling Engines”, **Clarendon Pres**, Oxford;34 (1980).
15. Reader, G.T., “Stirling Engine Work Royal Navy”, **SAE Paper**, 95 : 394 -405 (1986).
16. Çınar, C., “Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarımı İmali ve Performans Analizi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, Ankara,;4-65 (2003).
17. Walker, G., “Stirling Engines”, **Clarendon Pres**, Oxford;34 (1980).

18. İnternet : <http://www.sbp.de/en/sun> (2013).
19. Kongtragool, B., Wongwises, S., “A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 7:131–154, (2003).
20. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Investigation on power output of the gamma-configuration low temperature differential Stirling engines” **Renewable Energy**;30: 465–476,(2005).
21. Kongtragool, B., Wongwises, S., Performance of a twin power piston low temperature differential Stirling engine powered by a solar Simulator, **Solar Energy**, 81:884–895, (2007).
22. Akhan H, “Güneş enerjili bir sıcak hava motoru tasarımı” **Trakya Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne, (2007).
23. Tlili, I., Timoumi, Y., Nasrallah, S.B., “Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application”, **Renewable energy**, 1911-1921, (2008).
24. Tavakolpour, A.R, Zomorodiana, A., Golneshanb, A.A., “Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator”, **Renewable Energy**;33:77–87, (2008).
25. Kongtragool, B., Wongwises, S., “A four power-piston low-temperature differential Stirling engine using simulated solar energy as a heat source”, **Solar energy**,493-500, (2008).
26. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Testing of a low-temperature differential Stirling engine by using actual solar energy”, **International Journal of Green Energy**,82: 493–500, (2008).
27. Scollo L., Valdez, L., Baron. J., “Design and construction of a Stirling engine prototype”, **International Journal of Hydrogen Energy**,33: 3506 – 3510 (2008).
28. Zhang, Y., Hu, W., Ou, C., Chen, J., “A unified model of combined energy systems with different cycle modes and its optimum performance characteristics”, **Applied Thermal Engineering**, 29:1766–1772, (2009).
29. Erol D, “Düşük sıcaklık farkı ile çalışan bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı”, **Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, Ankara,(2009).
30. Chang, T.B., Ko, M.S., “Optimizing the power generation of a radiation driven

- Stirling engine used in the combustion chamber of an incinerator”, **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, (2009).
31. Petrescu, S., Petre, C., Costea, M., Malancioiu, O., Boriaru N., Dobrovicescu, A., Feidt, M., Harman, C., “A methodology of computation, design and optimization of solar Stirling power plant using hydrogen/oxygen fuel cells”, **Energy**,729-739, (2010).
 32. Sripakagorn, A., Srikam C., “Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine”, **Renewable energy**,1728-1733, (2011).
 33. Luquea, A., Martía, A., Bettb, A., Andreevc, V.M., et al “Fullspectrum: a new PV wave making more efficient use of the solar spectrum”,**Sol Energy Mater Sol C.**,;87:467–79, (2005).
 34. Kandilli, C., “Performance analysis of a novel concentrating photovoltaic combined system”,**Energy Conversion and Management**, 67: 186–19,(2013).
 35. Jaramillo OA, Huelsz G, del Rio JA. “A theoretical and experimental thermalstudy of SiO₂ optical fibres transmitting concentrated radiative energy”,**J Phys D Appl Phys**, 35:95–102,(2002).
 36. Petela R. “Exergy analysis of the solar cylindrical–parabolic cooker”,**Sol Energy**, 79:221–33, (2005).
 37. İnternet : <http://www.handmadeinpa.net/2012/02/the-color-of-the-sun/astm-g173-03-reference-spectra> (2013).
 38. Holman, J.P., “Experimental Methods For Engineers” **McGraw-Hill**-7th Edition, (2001).
 39. Akpınar, E.K., “Deneysel çalışmalaradaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi” **Mühendis ve Makine** 46;540, (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, Soyadı : Gürhan KÜLAHLI
 Doğum tarihi ve yeri : 28.01.1988 Bursa
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (258) 296 30 55
 e-mail : gkulahli@pau.edu.tr; gurhankulahli@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Ana Bilim Dalı	2013
Lisans	Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü	2011
Lise	Orhaneli TSY Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	Pamukkale Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yeterlilikler

Yabancı Dil: İngilizce

Bilgisayar: ANSYS, AutoCAD, COMSOL , SolidWorks , Matlab

Yayınlar

1. Kandilli C., Külahlı G., A comparative study on the energetic and exergetic performance of a photovoltaic thermal (PVT) system, **International Ege Energy Symposium and Exhibition**, 28 – 30 June 2012, Izmir, TURKEY
2. Kandilli C., Külahlı G., Investigation of Spectrally Decomposed Concentrated Solar Energy Systems, **International Conference on Renewable Energy Research and Applications**, 11 – 14 November 2012, Nagasaki, JAPAN
3. Aktas, M., Balcioglu, E., Külahlı, G., “Strain rate effects on tensile and compressive behavior of woven – knitting glass/epoxy composites”, **Advanced Composites Letters**, 22:1, (2013).
4. Kandilli, C., Külahlı, G., Savcı, G., “Fotovoltaik termal (pvt) sistem 2d termodinamik modellenmesi ve deneysel sonularla karşılaştırılması” **Teskon**, 17-20 Nisan 2013, İzmir, TÜRKİYE
5. Kandilli, C., Külahlı, G., “Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin spektral olarak ayrıştırılması ve birleşik güç sistemi” **Anadolu Enerji Sempozyumu**, 2-4 Mayıs 2013, Diyarbakır, TÜRKİYE