

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

**STİRLİNG MOTORLU GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI  
VE FOTOVOLTAİK PANEL SİSTEMİYLE VERİM YÖNÜNDEN  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**Mehmet Sait CENGİZ**

**DOKTORA TEZİ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALATYA**

**Mayıs – 2016**

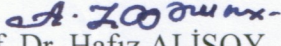
**Tez Başlığı : “Stirling Motorlu Güneş Takip Sisteminin  
Tasarımı ve Fotovoltaik Panel Sistemiyle Verim Yönünden  
Karşılaştırılması”**

**Tezi Hazırlayan : Mehmet Sait Cengiz**

**Sınav Tarihi : 05.05.2016**

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi Üyeleri**

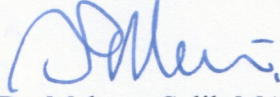
  
Prof. Dr. Hafız ALİSOY  
(Üye)

Namık Kemal Üniversitesi



Prof. Dr. Arif MEMEDOV  
(Üye)

İnönü Üniversitesi



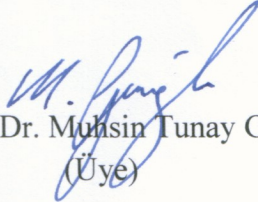
Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ  
(Üye)

İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Müslüm ARKAN  
(Üye)

İnönü Üniversitesi



Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU  
(Üye)

Fırat Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Alaattin ESEN  
Enstitü Müdürü

## ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Stirling Motorlu Güneş Takip Sisteminin Tasarımı ve Fotovoltaik Panel Sistemiyle Verim Yönünden Karşılaştırılması**” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakça da yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtirek, bunu onurumla doğrularım.

**Mehmet Sait Cengiz**

## ÖZET

Doktora Tezi

### STİRLİNG MOTORLU GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN TASARIMI VE FOTOVOLTAİK PANEL SİSTEMİYLE VERİM YÖNÜNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet Sait CENGİZ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

112+XIII Sayfa

2016

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

Günümüzde fosil bazlı kaynakların hızla tükenmesi ve fosil yakıtların çevreye vermiş olduğu zararlar, insanoğlunun alternatif enerji kaynaklarına yönelmesine sebep olmuştur. Enerji ihtiyacının devamlı artması nedeniyle gelecekte enerji darboğazlarının yaşanmaması için yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en bol olanı ve en kolay bulunanı güneş enerjisi olup, ülkemiz güneş enerjisi açısından yüksek bir potansiyele sahiptir.

Bu çalışmada Dünya'da ve Türkiye'de güneş enerji potansiyeli, güneşten elektrik üretme yöntemleri araştırılarak, geçmişten günümüze güneşten elektrik üretiminin gerek maliyet gerekse verimlilik-performans ilişkisi analiz edilmiş, çeşitli sabit fotovoltaik (FV) panel sistemleri, güneş takip sistemleri ve Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemleri (SMGTS) örnek tasarımları incelenmiştir. Öncelikle ANSYS Product 13.5 ve Ideal Adiabatic v.1.x Stirling Engine simülasyon programlarında çalışmalar yapılmış olup

displacer uçları arası sıcaklık farkının artırılması yöntemiyle yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmadan elektriksel verimin artırılacağı görülmüştür. Beta tipi bir Stirling motorun tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiş ve güneş takip sistemine montajlı Stirling motorun güneş enerjisiyle çalışması incelenmiştir. SMGTS, sabit FV panel sistemi ve Güneş takip sistemli FV panel sisteminin elektriksel üretim ve verimlilik açısından karşılaştırılması sonucunda sabit FV panel sistemine göre güneş takip sistemli FV panel sisteminin ortalama %25.7 ve SMGTS'nin ise %32 daha verimli olduğu görülmüştür. Sabit ve hareketli FV sistemler ile SMGTS'ler için maliyet analizi yapılarak elektriksel bazda verimi arttıracak önerilerde bulunulmuştur.

Sonuç olarak uygulaması gerçekleştirilen Stirling motorlu sistem gibi yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri kullanılarak sıcaklık ortalaması yüksek olan bölgelerde güneşten elektrik üretim kapasitesinin daha fazla artırılacağı belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Stirling Motor, Isı Pompası, Güneş Takip Sistemi, Fotovoltaik Panel Sistemi, Enerji Verimliliği, Yenilenebilir Enerji.

# ABSTRACT

PhD. Thesis

## DESIGN OF SOLAR STIRLING ENGINE AND COMPARISON WITH PHOTOVOLTAIC SOLAR PANEL SYSTEM IN EFFICIENCY

MEHMET SAİT CENGİZ

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

112+XIII Pages

2016

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

Nowadays, the quick consumption of fossil resources and damages on environment have caused people to tend towards alternative energy resources. As requirement of energy has been increasing continuously, renewable energy resources are needed in order not to face energy bottlenecks in the future. Solar energy is the most existing one and can be easily found among other renewable energy resources, and our country has a high potential in terms of solar energy.

In this study, the potential of solar energy in the world and Turkey are investigated and the methods to produce electricity from sun are given. Also, the relation of cost and efficiency-performance of solar electric production from past to our days has been analyzed, and various type of stable PV panel systems, sun tracker systems and Solar Stirling Engine with Tracker (SSET)

sample designs have been examined. Especially the studies the simulation of Stirling engine have been carried out on ANSYS Product 13.5 and Ideal Adiabatic v.1.x Stirling Engine simulation programs, and it has been shown that the electrical efficiency can be increased without requiring high temperatures with the method of increasing temperature difference among displacer edges. A beta-type Stirling engine has been designed and manufactured. The SSET, stable PV panel system and sun-tracker based PV panel system have been compared in terms of electrical efficiency. The obtained results have shown that the sun-tracker based PV panel system and SSET are more efficient than the stable PV panel system with an average of 25.7% and 32%, respectively. Based on cost analysis of SSET stable and moving PV panel systems suggestions to increase electrical efficiency are presented.

Consequently, it has been determined that using intensive solar energy systems such as Stirling the electric production capacity from sun could be further increased in regions with high temperature averages.

**KEYWORDS:** Stirling Engines, Heat Pumps, Solar Tracking System, Photovoltaic Panel System, Energy Efficiency, Renewable Energy.

## TEŞEKKÜR

Yardımlını bilgi ve desteklerini esirgemeyen, sorularımı daima cevaplayan, önerileriyle beni yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ hocama;

Destek ve katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü tüm öğretim üyelerine, ayrıca fikirlerine başvurduğum Doç. Dr. Mehmet Emin TAĞLUK hocam ile Prof. Dr. Müslüm ARKAN hocama ve Sayın Cemal KELEŐ'e;

Bu uygulama çalışmasının gerçekleşmesi için gereken finansmanın sağlanmasında, EEEAG-115E680 nolu proje kapsamında desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK);

Teze katkılarından dolayı değerli dostum Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL'a;

Ayrıca, bu çalışma süresince bana destek olan ve çalışmalarımın ötürü ihmal ettiğim fedakâr eşime şükranlarımı sunarım.

Mehmet Sait CENGİZ

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	4
2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ TEKNOLOJİLERİ.....	5
2.1. Fotovoltaik Hücreler.....	5
2.1.1. Fotovoltaik Hücre Üretim Hammaddeleri.....	6
2.2. Fotovoltaik Sistemler.....	7
2.2.1. FV Panellerde Verimlilik-Maliyet Analizi.....	8
2.2.1.1. Fotovoltaik Panel Teknolojisi.....	8
2.2.1.2. FV Paneller Açısından Sistem Dengesi.....	15
2.3. Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Sistemler.....	18
2.4. Isıl Güneş Teknolojileri.....	19
2.4.1. Düşük Sıcaklık Sistemleri.....	19
2.4.2. Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri.....	20
2.4.2.1. Parabolik Oluk Kollektörler.....	21
2.4.2.2. Parabolik Çanak Kollektörler.....	21
2.4.2.3. Merkezi Alıcı Güç Santralleri.....	22
2.5. Güneş Enerjisinde Verim Arttırıcı Geleneksel Yöntemler.....	23
2.5.1. FV Panel Soğutma Sistemleri.....	24
2.5.2. Güneş Takip Sistemleri.....	25
3. STİRLİNG MOTORLAR.....	30
3.1. Stirling Motorların Tarihsel Gelişimi.....	31
3.2. Stirling Motorlarda Termodinamik Mekanik Prensipler.....	32
3.2.1. Termodinamik Çevrimler.....	32
3.2.1.1. Carnot Çevrimi.....	32
3.2.1.2. Ericsson Çevrimi.....	34
3.2.1.3. Stirling Çevrimi.....	35
3.2.2. Stirling Motorlarda Mekanik Prensipler.....	38
3.2.2.1. Tek Etkili Stirling Motorlar.....	38
3.2.2.2. Çift Etkili Stirling Motorlar.....	42
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
4.1. Beta Tipi Stirling Motorun Matematiksel Modeli.....	45
4.2. Stirling Motor Simülasyon Çalışmaları.....	48
4.2.1. Stirling Motor Karakteristik Simülasyonu.....	48
4.2.2. Isı Farkıyla Verim Artışının Sağlanması.....	52
4.3. Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemi Uygulaması.....	64

4.3.1.	Stirling Motor Kullanım Gerekliği.....	67
4.3.2.	Stirling Motorlu Güneş Kaynaklı Üretim Sistemi Tasarımı.....	68
4.4.	Uygulama Devresi Materyalleri.....	70
4.4.1.	Çalışma Akışkanının Seçimi.....	70
4.4.2.	Pyranometre Seçimi.....	72
4.5.	Güneş Enerji Sistemlerinin İmalat ve Kurulum Aşaması.....	76
4.5.1.	FV Panel Sistemleri.....	76
4.5.2.	Stirling Motor ve Çanak Sistemi.....	77
4.5.3.	Meteorolojik ölçüm istasyonu.....	78
4.5.4.	Kumanda Panosu.....	80
4.5.5.	Scada Panosu.....	82
4.5.6.	Çift Eksen Hareket Aktüatörleri.....	87
5.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	89
5.1.	FV Panellerde Üretimi Etkileyen Çevresel Koşullar.....	92
5.2.	Maliyet Analizi.....	96
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	99
6.1.	Sonuçlar.....	99
6.2.	Öneriler.....	101
	KAYNAKLAR.....	103
	EKLER.....	107
	ÖZGEÇMİŞ.....	111

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Güneş pili ve FV modül	6
Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız bir ev için FV sistem	7
Şekil 2.3. Sabit FV panel uygulamaları	8
Şekil 2.4.FV modülün üretim evreleri	10
Şekil 2.5. FV teknolojisinin yıllara göre değişim öngörüsü	11
Şekil 2.6. Farklı PV modül teknolojileri için fiyat-verimlilik ilişkisi	11
Şekil 2.7. Farklı FV teknolojileri için ortalama fiyat değişimi	12
Şekil 2.8. FV panel fiyatlarının yıllık üretim kapasitelerine göre değişimi	12
Şekil 2.9. FV endüstrisinde yıllara göre watt başına maliyet değişimi	13
Şekil 2.10. 2004-2014 yıllarında Dünya güneş enerjisi üretimi	13
Şekil 2.11. İF ve c-Si FV modül için maliyet paylarının oransal dağılımı	14
Şekil 2.12. İF ve silikon tabanlı FV modül yıllara göre üretim kapasitesi	14
Şekil 2.13. FV sistemler için oransal maliyet değişimi	16
Şekil 2.14. c-Si ve İF için Sistem Dengesinin maliyet açısından tasarruf potansiyeli	17
Şekil 2.15. Yoğunlaştırıcı FV sistemler	19
Şekil 2.16. Güneş bacası ve güneş mimarisi uygulamaları	20
Şekil 2.17. Parabolik oluk sistemi uygulamaları	21
Şekil 2.18. Stirling motorlu parabolik çanak sistemi uygulamaları	22
Şekil 2.19. Merkezi alıcılı güç sistemi uygulamaları	23
Şekil 2.20. Sabit FV panel ile güneşten elektrik üretimi	24
Şekil 2.21. Farklı sıcaklık değerleri için FV panelin güç–gerilim değişimi	25
Şekil 2.22. Güneş takip sistemi uygulaması	26
Şekil 2.23. Tek eksen için güneş takip sistemi	27
Şekil 2.24. Çift eksen güneş takip sistemi	27
Şekil 2.25. Pasif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları	28
Şekil 2.26. Aktif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları	29
Şekil 3.1. Carnot çevrimi P-V ve T-S diyagramları	33

Şekil 3.2. Ericsson çevrimi P-V ve T-S diyagramları	35
Şekil 3.3. Stirling çevrimi P-V ve T-S diyagramı	36
Şekil 3.4. Stirling çevrimi çalışması	37
Şekil 3.5. Alfa tipi Stirling motor	39
Şekil 3.6. Beta tipi Stirling motor prototipi ve displaser bloğu	40
Şekil 3.7. Beta tipi Stirling motor hareket aşamaları	41
Şekil 3.9. Gama tipi Stirling motor	42
Şekil 4.1. Stirling motorlarda genişleme sıkıştırma işlemi	46
Şekil 4.2. Rejenaratörde sıcaklık dağılımı	47
Şekil 4.3. Stirling motorlarda güç basınç ilişkisi	49
Şekil 4.4. Stirling motorlarda elektriksel gücün sıcaklık ve basınç ilişkisi	50
Şekil 4.5. Stirling motorlarda elektriksel güç ve frekans ilişkisi	51
Şekil 4.6. Stirling motorlarda elektriksel güç ile uçlar arası sıcaklık farkı ilişkisi	52
Şekil 4.7. Zirkonyum madeni görünümü	53
Şekil 4.8. Beta tipi stirling motor hareket aşamaları	54
Şekil 4.9. Displacer blok şeması	56
Şekil 4.10. Displacer borusu 50 cm uzunluğunda Demir'den imal edilmiş Beta tipi Stirling motor	56
Şekil 4.11. Sıcak ucu 25 cm Demir ve cooler tarafı 25 cm Zirkonyum'dan imal Beta tipi Stirling motor	57
Şekil 4.10. Displacer için mesh ve ısıtılma işlemi	58
Şekil 4.11. 673 K Demir'den imal displacer borusunun sıcak uç giriş ve cooler sıcaklıkları	58
Şekil 4.14. 50 cm uzunluğundaki Demir displacer borusunun sıcaklık değişimi	59
Şekil 4.15. 673 K'de 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyumdan imal displacer sıcak uç giriş ve cooler sıcaklıkları	59
Şekil 4.16. 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyum'dan imal displacerda sıcaklık değişimi	60
Şekil 4.17. Displacer borusu için ısı değişimleri	61
Şekil 4.18. Demir ve Zirkonyum için cooler yandan kesit görünümü	62

Şekil 4.19. Türkiye ve Avrupa güneş enerji potansiyeli haritası	66
Şekil 4.20. Pyranometre görünümü	73
Şekil 4.21. Dalga boyuna göre güneş radyasyonu	75
Şekil 4.22. Radyasyon çeşitleri ve ilgili ölçüm cihazları	76
Şekil 4.23. FV güneş panelleri	77
Şekil 4.24. Çanak yansıtıcının folyo ile kaplanması	77
Şekil 4.25. Stirling motorun içyapısının görünümü	78
Şekil 4.26. Stirling motorun dıştan görünümü	78
Şekil 4.27. Ölçüm istasyonu görünümü	79
Şekil 4.28. Ölçüm istasyonu ve dokunmatik kontrol paneli	80
Şekil 4.29. SMGTS kumanda panosu	80
Şekil 4.30. Alıcı mini FV paneller	81
Şekil 4.31. Röle kartı görünümü	82
Şekil 4.32. MP200 PLC kontrol cihazı görünümü	82
Şekil 4.33. MP200 ile SMS ile uzaktan kontrol uygulaması	85
Şekil 4.34. MP200 ile SMS gönderme işlemi	85
Şekil 4.35. SMGTS scada panosu	87
Şekil 4.36. Çift eksen 24 V <sub>DC</sub> hareket aktüatörleri	88
Şekil 5.1. FV panelde tozlanma ve üretilen gücün oransal değişimi	94
Şekil 5.2. Simulinkte oluşturulan FV panel modeli	94
Şekil 5.3. Simulasyona göre farklı açılar için çıkış güçleri	95
Şekil 5.4. Simulasyon ve gerçek panelin farklı açılarda çıkış güçleri	95

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. FV sistemler için maliyet düşürme potansiyeli	18
Tablo 4.1. Simülasyon programında kullanılan giriş verileri	49
Tablo 4.2. Demir ve Zirkonyumun karşılaştırmalı özellikleri	55
Tablo 4.3. Farklı madenlerden imal displacer için çeşitli sıcaklıktaki güçler	62
Tablo 4.4. Hesaplanan hacimsel parametreler ve motor ölçüleri	69
Tablo 4.5. MP200 teknik özellikleri ve entegre giriş-çıkış birimleri	83
Tablo 5.1. Güneş enerji sisteminin günlük toplam güç üretimi	89
Tablo 5.2. Güneş enerji sisteminin günlük %verimi	90
Tablo 5.3. Güneş kaynaklı üretim sistemlerin kurulum maliyetleri	97



## SİMGELER VE KISALTMALAR

ANSYS	Simulation Driven Product Development 13.5
$A_c$	Soğutucu iş gazı tarafı yüzey alanı ( $m^2$ )
BOS	Güneş sistem dengesi
$C$	Ölü hacim oranı
$c_p$	Özgül ısı ( $J/kgK$ )
$D$	Motor çapı (m)
DC	Doğru akım
$D_h$	Hidrolik çap (m)
FV	Fotovoltaik
$f_r$	Motor çalışma frekansı ( $1/s$ )
$h$	Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )
$H_0$	Atmosfer dışına düşen günlük güneş ışınımı ( $W/m^2$ )
$I_0$	Atmosfer dışına düşen anlık güneş ışınımı ( $W/m^2$ )
$I_b$	Direkt güneş ışınımı ( $W/m^2$ )
$I_d$	Yayıllı güneş ışınımı ( $W/m^2$ )
İF	İnce film
$k$	İş gazı ısı iletim katsayısı ( $W/mK$ )
kpa	Ortama basınç yüzey
$K_r$	Rejeneratör kompaktlığı ( $m^3/m^2$ )
$K_t$	Isıtıcı tel kompaktlığı ( $m^3/m^2$ )
$m$	Akışkanın kütleli debisi ( $kg/s$ )
$M$	Motor içindeki soğutucu akışkan kütlesi (kg)
$N$	Soğutucu kanal sayısı
NTU	Isı transferi birim sayısı
SMGTS	Stirling motorlu güneş takip sistemi
$P$	Basınç (Pa)
$Q$	Isı transferi gücü (W)
$r$	Rejeneratör boyu (m)
$R$	İdeal gaz sabiti ( $2080 J/kgK$ )
$s$	Sıkıştırma boşluğu boyu (m)
$t$	Isıtıcı tel boyu (m)
$T$	Sıcaklık (K)

$T_H$	Çevrimiçi ısı geçişi
$T_h$	Isıtıcı sıcaklığı
$T_k$	Kooler sıcaklığı
$T_L$	Çevrimdışı ısı geçişi
$U$	Toplam ısı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ )
$V$	Hacim ( $m^3$ )
$V_{clc}$	Sıkıştırma hacmi
$V_{cle}$	Isıtıcı sıkıştırma hacmi
$V_h$	Sıkıştırma hacmi
$V_k$	Isıtıcı sıcaklığı
$V_r$	Kooler sıcaklığı
$V_{swc}$	Genişleme hacmi
$V_{swe}$	Isıtıcı genişleme hacmi
YEK	Yenilenebilir enerji kaynakları
YFV	Yoğunlaştırılmış fotovoltaiik
$\eta_t$	Termik verim
$\tau_c$	Camın ışınım geçirme katsayısı

## 1. GİRİŞ

Günümüzde fosil bazlı enerji kaynakları hızla tükenerek, küresel bazda sık sık enerji krizlerine yol açmaktadır. Dünya da enerji ihtiyacının katlanarak artması, bilim insanlarını yenilenebilir enerji kaynaklarına ve bu kaynakları enerjiye dönüştürecek daha verimli makinalar üzerinde araştırmalar yapmaya yöneltmiştir.

Günümüzde sürekli artan insan nüfusu, sanayileşme etkileri ve küresel çapta ısınma dolayısıyla iklimde değişimlere sebep olmaktadır. Sanayi devriminin etkisiyle 1850 yılları sonrası üretim artmış, teknoloji gelişmeye başlamış olup, tüketici ihtiyaçlarına yönelik büyük sanayi kuruluşları inşa edilmiştir. 1900'lü yılların başında Dünya nüfusu 1 milyar iken günümüzde 7 milyara yaklaşmıştır. Dolayısıyla daha çok enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde enerji geleneksel kaynaklarla (kömür, petrol vb.), doğalgaz ve fueloil gibi hammaddeler kullanılarak üretilmektedir. Geleneksel kaynakların kullanımı küresel ısınmaya yol açan sera gazlarını atmosfere salarak iklimsel değişimlere sebep olmaktadır. 2015 yılı itibariyle Dünyada küresel ısınmaya bağlı olarak 2°C sıcaklık artışı olmuştur. Dünyanın sıcaklık ortalaması 15°C'den 17°C'ye yükselmiştir. Küresel bazdaki sıcaklık artışının 2040-2050 yılları arasında gerçekleşmesi beklenirken, nüfus artışı ve sera gazlarının hızlı salınımı küresel ısınmayı 2015 yılına kadar geri çekmiştir. Bazı ülke veya yörelerde canlılar bu değişimden olumlu etkilenmişken, bazı yörelerde ise sıcaklık artışı olumsuzluklara sebep olmuştur. Kuzey Avrupa ülkelerinde aşırı kar yağışı varken Dünya ortalama sıcaklık artışıyla kar yağışı yağmura dönüşerek tarımda verimlilik artmıştır. Ancak ülkemizin de bulunduğu bölgede kuraklığın şiddeti artarak çölleşme ve sıcak iklimin daha yoğun yaşanması gibi iklim etkileri ortaya çıkmıştır. Son yıllarda sonbaharın ve ilkbaharın yarısı kış mevsimine diğer yarısı da yaz mevsimine benzer hale gelmiştir. Örneğin ülkemizin iç bölgelerinde Nisan ayında kar yağışı görülmekte ve son birkaç yıldaki kış mevsimlerinde de kısmen daha sıcak iklim özelliklerine rastlanmaktadır. Buradan hareketle gelecekte kullanılacak enerji kaynağının öncelikle fosil bazlı olmaması önemlidir. Çünkü daha çok

fosil kaynaklı enerji üretimi Dünya'nın daha çok ısınması anlamına gelmektedir. Dünya zaten insanoğlunun yaşamsal faaliyetleriyle her geçen gün ısınmaktadır. Dolayısıyla öncelikle enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımına yönelme sağlanmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından ise Akdeniz çukurunda bulunan ve her geçen gün ortalama sıcaklığı artan ülkemiz için güneşin sıcaklık özelliğinin kullanabileceği yöntemlerle enerji üretilmeye çalışılmalıdır. Bu çalışmada güneşin termal sıcaklık özelliğinin kullanılabilceği Stirling motorlu güneşten elektrik üretim modeli benimsenmiştir.

Türkiye güneşten faydalanma açısından Avrupa ülkeleri içinde en çok güneş potansiyeline sahip olmasına rağmen, gerek üretim kapasitesi açısından gerekse üretim yöntemi bakımından verimi yüksek olmayan hatta elektriksel verimi azaltıcı metotlarla güneşten faydalanmaya çalışmaktadır. Örneğin Almanya fotovoltaik (FV) panelli güneş enerjisi üretimini benimsemişken, Türkiye ile benzer sıcaklık ve iklim koşullarına sahip İspanya ise FV panel sistemine ihtiyaç duyulmayan ısı kaynaklı yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemlerini tercih etmektedir. Türkiye'nin iklim özelliklerini taşıyan İspanya'nın elektrik üretim yöntemi olan güneşten ısı kaynaklı enerji üretim metodu, Türkiye için daha verimli bir üretim yöntemidir. Ancak Türkiye'de hem kültürel hem de ekonomik ilişkiler nedeniyle Almanya'da üretilip yoğun olarak kullanılan, güneşin ışınımından faydalanarak FV paneller aracılığıyla elektrik üretme yöntemini tercih etmektedir. Aksine ülkemizde Almanya'nın sıcaklık ve rakım değerlerine uygun olan yerler Doğu Anadolu Bölgesi'nin bir bölümü ve yüksek yerleşim yerleri olup, söz konusu bu yerler tüm güneş potansiyelimizin %20'sine karşılık gelmektedir. Türkiye için güneş enerjisinden elektrik üretimindeki en önemli enerji deposu güneşin ısı kaynaklı kullanımınıdır. Türkiye ile benzer iklim özelliklerine, coğrafik yapıya ve yükselti değerlerine sahip olan ülkelerin güneşten elektrik üretim yöntemlerine bakılarak ülkemiz enerji ihtiyacına çözüm üretilebilir. İspanya 2000 yılı başlangıcında güneşten elektrik üretiminde Dünya'da sıralamada dahi değilken, günümüzde 2015 yılı itibariyle yaklaşık son 10 yılda güneşin sıcaklık etkisiyle güneşten elektrik üretiminde Dünya dördüncüsü

konumuna gelmiştir. Bu düşünceye göre hareket edildiği takdirde ülkemizde de güneşten elektrik üretiminde Stirling motorlu güneş takip sistemleri (SMGTS) gibi bazı yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri kullanılabilir. Çünkü sabit FV panelli sistemlerde sıcaklık dezavantaj olup verimi azaltırken, SMGTS gibi ısı kaynaklı yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinde ise sıcaklık verimi yükselten en önemli parametredir.

Geleneksel yakıt türlerinin enerji elde etme işlemleri esnasında oluşan atıklar (katı veya gaz halinde) ekolojik denge için olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Atmosferdeki CO<sub>2</sub>'nin artması sera gazı etkisine sebep olmakta, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC ve partiküller de çevreyi kirletmektedir. Çevre ve insan sağlığı açısından en zararsız metotlardan olan güneşten elektrik üretimi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok kullanılan metottur.

1973 yılındaki Dünya petrol krizinde, petrol rezervlerine sahip ülkelerin diğer ülkelere ambargo uygulaması nedeniyle, güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimi hızlanmıştır. Dünya petrol rezervinin sınırlı oluşu ve var olan kaynakların verimsiz kullanımı, YEK kullanımının arttırılmaması durumunda enerji problemlerinin artışa geçeceğini göstermektedir. Günümüzde güneş enerjisinden doğrudan veya dolaylı olarak ısıtma, soğutma ve özellikle enerji üretiminde yoğun bir şekilde faydalanılmaktadır.

Fotovoltaik panel sistemleri, doğrudan elektrik üretimi kategorisindeyken, güneşten yararlanılarak üretilen buhar sistemleri ya da güneş enerjili sıcak hava motoru olarak tanımlanan Stirling motorlar dolaylı elektrik üretimi kategorisine girmektedir. En yaygın kullanılan yöntem ise FV panelli üretim sistemleridir. Güneş ışınımını direk olarak elektriğe çeviren bu tür sistemlerin verimi düşük olup, çevresel faktörler özellikle sıcaklık parametresi performansı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle günümüzde güneşin ısı özelliğini kullanarak enerji üretimini benimseyen yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinden, verimi yüksek olan, Stirling motorlu enerji üretim metotları tercih edilmektedir. Herhangi bir yerleşim bölgesinde direk güneş ışınımı yoğun ve uzun süreliyse bir başka deyişle bulutlu-sisli gün sayısı az ve iklim sıcak seyrediyorsa veya rüzgâr hızı

şiddetli değilse, güneş ışınımının ayna veya merceklerle dar bir alanda yoğunlaştırılması sonucu güneşin ısı özelliğiyle elektrik enerjisi üretmek avantajlıdır ve ekonomik açıdan karlıdır. Bu nedenle Stirling motorların kullanımı FV panellere göre yaklaşık %30 civarında daha fazla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca Stirling motorlu sistemlerin sessiz çalışması, çevre dostu olması ve düşük sıcaklık farklarında da verimli sonuçlar ortaya koyabilmeleri diğer tercih edilme nedenleridir.

Bu çalışma EEEAG-115E680 nolu proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

### **1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı**

Bu çalışmada, yoğunlaştırılmış güneş teknolojilerinden olan SMGTS'nin yüksek yerli katma değer ile imalattan üretim aşamasına kadar tüm aşamalarının uygulamasının mümkün olacağı gösterilmiştir. Bu kapsamda düşük sıcaklıklarda çalışabilen bir Stirling motor geliştirilmiştir. Üretilen Stirling motor çanak yansıtmalı odaklayıcı bir düzenek ile güneş takip sistemine monte edilerek, Stirling motorun başarı oranı ve güneş takip sistemine uyumu ölçülmüştür. Ayrıca Sabit FV panel sistemi ve güneş takip mekanizmasına sahip FV panel sistemlerinin imalatı yapılarak elektriksel verim açısından bu sistemler karşılaştırılmıştır.

Ölçümler sonucunda toplanan veriler ışığında SMGTS'lerin güneşten elektrik üretimi açısından daha verimli olduğu ve gerek sanayici gerekse bilimsel çalışmalarda yerli kaynaklarla daha verimli elektrik üretimi yapılabileceği görülmüştür.

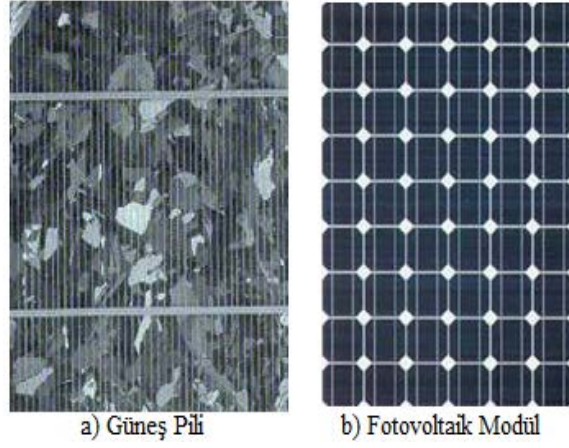
## 2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ TEKNOLOJİLERİ

Güneşten elektrik üretim teknolojileri yöntemi, malzeme türleri ve teknolojik gelişmişlik açısından farklılıklar göstermektedir. Literatür de ise güneşten elektrik üretimi iki ana grupta incelenmektedir. Bunlardan ilki güneşten gelen ışığı doğrudan elektriğe çeviren FV modüllü güneş teknolojisidir. İkinci yöntem ise ısı güneş teknolojileri olarak bilinen güneşten ısı elde etme ve ısının doğrudan elektrik üretiminde kullanılmasıdır.

### 2.1. Fotovoltaik Hücreler

FV hücrelerin çalışması yarı iletken hücrenin eklem bölgesi üst yüzeye yakın olan geniş alanlı bir P-N diyotundan başlar. Bu alana güneş ışığı etkiyince hücre üzerinde doğrudan elektrik akımı oluşur. Birçok yarı iletken hücre birleşerek gerekli gücü üretecek panelleri oluşturur. Tüm FV yapılar bu mantıkla çalışır. N-tipi silikonla P-tipi silikon etkileştirildiğinde, eklem bölgesinde elektriksel bir etki meydana gelir. Elektriksel etki, diyot gibi davranarak elektronun p-tipi silikondan n-tipi silikona geçişini engeller, ters yöndeki yani n-tipi silikon üzerinde p-tipi silikona geçişi ise engellemez. Bu esnada ortaya çıkan ışık eklem tarafından emilir, emilimi gerçekleştiren fotonların enerjisi, yarı iletken üzerindeki elektron sistemine aktarılır. Dolayısıyla eklemde hareketli elektronlar ve holler meydana gelir. Hareketli elektronlar ve holler eklem bölgesinde potansiyel fark oluşturarak elektriksel etkiyle hızlanıp devre boyunca DC akım oluştururlar.

FV hücrelerin fiziksel şekilleri farklı olup, kalınlıkları 0.1-0.45 mm civarındadır. Güneş hücreleri özelliklerine göre %5 ile %20 civarında bir verimlilikle enerji üretilebilirler. Çıkış gücünü yükseltmek için çok sayıda güneş hücresi birbirine seri ve paralel bağlanarak güneş hücresi modülü oluşturulur. Güç ihtiyacına göre modül seti seri veya paralel bağlantı yapılmak suretiyle Watt düzeyinden Megawatt seviyelerine kadar enerji üretim sistemleri yapılabilir [1]. Güneş pili ve fotovoltaik modülü Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Güneş pili ve FV modül

### 2.1.1. Fotovoltaik Hücre Üretim Hammaddeleri

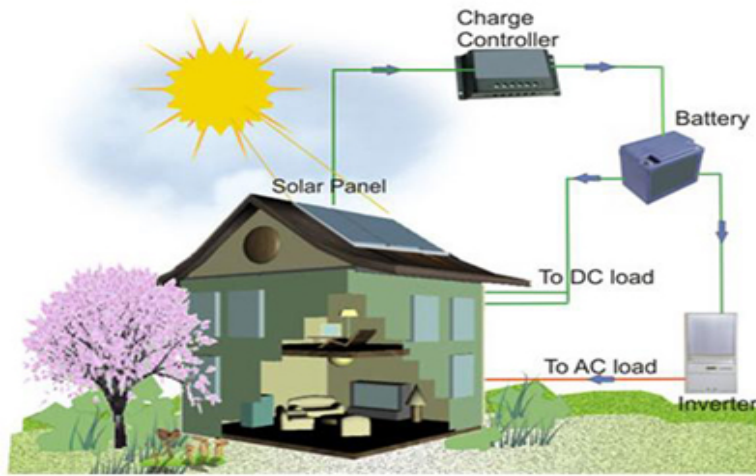
FV modüller birçok çeşitte malzemenen faydalanılarak üretilmektedirler. En fazla bilinen tipleri;

- Kristal Silisyum: Deneysel ortamda %18'e kadar, ticari modüllerde de %14'e kadar verimlilik sağlanmıştır.
- Galyum Arsenit (GaAs): Deneysel ortamda %25'e kadar ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde ise %28'e kadar verimlilik sağlanmıştır.
- Amorf Silisyum: Kristal olmayan Si pilden üretilen verimi deneysel ortamda %10 civarında olan, ticari modülde ise %5-7 arasında olan bir maddedir.
- Kadmiyum Tellürid (CdTe): Deneysel ortamda %16'ya kadar ticari modülde ise %7'ye kadar verimlilik sağlamaktadır.
- Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>): Deneysel ortamda %17,7'ye kadar verimlilik sağlamıştır. Üretim amaçlı prototipte ise %10,2 kadar verimlilik sağlar.
- Optik Yoğunlaştırıcı Hücreler: Gelen ışığı 10-500 kata kadar yoğunlaştırabilen mercek veya yansıtıcı özellikli teçhizatla modül verimliliği %20, hücre verimliliği ise %30 civarındadır.

Deneysel ortamda ulaşılabilen en yüksek hücre verimliliği 1 cm<sup>2</sup> hücresel alan için, kristal güneş hücrelerinde %24.5, polikristal madde için %19.8, amorf maddesi için %12.7, çok katlı güneş hücreleri için %40 düzeylerinde olmuştur [1,2].

## 2.2. Fotovoltaik Sistemler

Güneş hücreleri, elektrik ihtiyacının olduğu her yerde kullanıma uygundur. FV modüller ihtiyaca göre akü, inverter, şarj denetim aygıtı ve elektronik destek devreleriyle birlikte kullanılarak FV sistemi meydana getirirler. Bu sistem, geçmişte yerleşim alanlarından uzak, dağıtım şebekesi bulunmayan, elektriksel alt yapıdan mahrum uca noktalarda veya jeneratör ile beslemenin yapıldığı, ancak yakıt ikmalinin zor ve maliyetli olduğu durumlarda zorunluluktan dolayı kullanılmaktaydı. Ancak günümüzde dağıtım şebekesinin bulunduğu yerleşimin yaygın olduğu konut ve binaların çatılarında, çeşitli santral uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca FV sistemler çeşitli jeneratör sistemleri veya farklı güç sistemleriyle de karma şekilde kullanılabilirler. FV sistemler bulutlu havalarda veya gece boyunca ihtiyaca cevap verecek şekilde akü bulundurabilirler. FV modüller gün süresince enerji üreterek, üretilen enerjiyi aküde depolar. Akü ihtiyaca göre, FV modülden gelen akımı veya yükten çekilen akımı akü denetim birimiyle keser. Şebekeye bağlı sistemlerde AC akıma ihtiyaç duyulduğu durumlarda sisteme inverter ilavesiyle aküdeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz sinüs dalga formuna dönüştürülür. Ayrıca bazı sistemlerde de FV modüllerin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayacak maksimum güç noktası izleyici cihazlar kullanılır [1,3]. Şekil 2.2'de şebekeden bağımsız bir ev için fotovoltaik sistem görülmektedir.



Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız bir ev için FV sistem

Şebekeye bağlı FV enerji sistemleri büyük güç rezervlerini barındıran santraller olabildiği gibi konut veya bina uygulamalarında düşük güçte de kullanılmaktadırlar.

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler haberleşmede, uzak alan radyo istasyonlarında, telsiz-telefon sistemlerinde, boru hatları için katodik korumada, hava gözlem istasyonlarında, aydınlatma sistemlerinde, yerleşim yerlerinden uzak yaşam alanlarında, tarımsal sulamada, ormancılık faaliyetlerinde kullanılan kulelerde, deniz fenerlerinde, ilk yardım, alarm ve güvenlik sistemlerinde, deprem ölçüm, hava gözlem istasyonlarında ve ilaç-aşu soğutma cihazları vb. sistemlerde kullanılmaktadırlar [1,3,4]. Sabit FV panel sistemlerine ait örnek uygulamalar Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sabit FV panel uygulamaları

## 2.2.1. FV Panellerde Verimlilik-Maliyet Analizi

### 2.2.1.1. Fotovoltaik Panel Teknolojisi

Son yıllarda, FV panel sistemleri Ar-Ge çalışmalarıyla hızla gelişmektedir. Her geçen gün yeni buluşlar ile watt başına düşen üretim maliyetleri minimum düzeye çekilmektedir. Panel üretim ham maddesi olarak genellikle silikon ve ince film kullanılmaktadır. Silikon panellerin yüksek verimli olmasına karşılık, üretim maliyetlerinin daha yüksek olması fiyat-verim ilişkisini olumsuz etkilemektedir [5].

FV panellerin imalatı birçok aşamadan geçen çeşitli elementlerin FV modül haline getirilmesiyle mümkün olmaktadır. Doğada bulunan kristal silisyum elementi işlenir. Tek kristalli silisyum malzeme yüksek verimli olmasına karşın, üretim maliyetinin yüksek olması nedeniyle çok kristalli

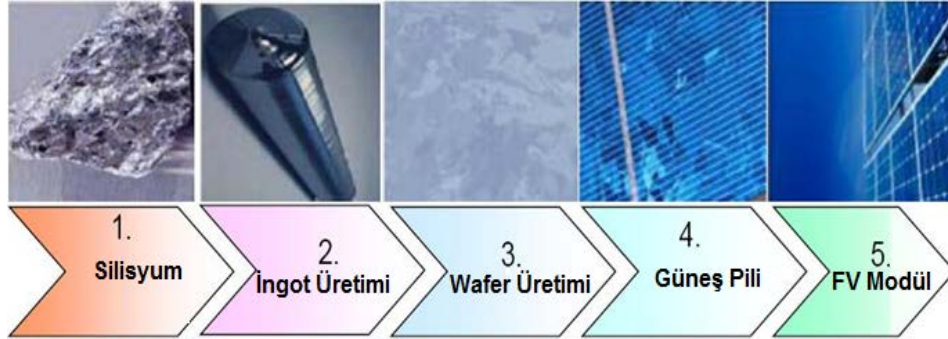
silisyum daha çok kullanılır. Kararlı yapısı nedeniyle elektrik malzemelerinde, optik teknolojisinde ve yapısal özellikleri nedeniyle, silisyum üretim teknolojisinde yüksek teknolojiye ulaşılması bu maddeyi öne çıkarmıştır. Saf tek kristalli silisyumun üretimi teknolojik açıdan zor ve ekonomik anlamda yüksek maliyetlidir. Oksijenden sonra en çok bulunan element olan silisyum doğada kum ve kuartz şeklindedir. Kum saf bir malzeme olmadığından, kullanılmaz. Kuartz ise %90 düzeyinde silisyumdan oluşur. Kuartz işlendiğinde %99'a kadar silikaya dönüşür. Silikadan da silisyum üretilir. Silisyum da saflaştırılarak yarı iletken formunda çok kristalli silisyuma dönüştürülür.

Sonraki aşama olan ingot üretimi ise kristal büyütme işlemlerinde kullanılan Czochralski yöntemi ile üretilir. Bu yöntemde çok kristalli silikon, kuvarz ocağında argon ile 1200°C'ye kadar ısıtılır. Radyo frekanslı veya rezistanslı ısıtma yapılır. Bir tane temel katı silikon kristal eriyik formdaki kristal havuzuna konarak kristal boyutlarının hacim kazanması sağlanır.

Daha sonraki aşama ise wafer üretimidir. Güneş hücrelerin veriminin yanında FV modülün kalınlık düzeyi de önemlidir. Güneş hücreleri wafer denilen kristal silikon dilimlerden oluşur ve daha az maliyet için mümkün olan en ince şekilde üretilmeye çalışılır. Yarıçapı yaklaşık 10 cm olarak büyütülmüş ingot, daha sonra elmas testere ile 0.5 mm kalınlığında dilimlere ayrılır. Wafer üretimi esnasında, kesme çamuru içerisinde önemli miktarda silikon kaybı olmaktadır. Bu kesme işlemi sırasında oldukça pahalı tek-kristal silisyum malzemenin yaklaşık %20 ile %40 kadarı atık haline gelir. Dilimleme işlemindeki kayıpları önlemek amacıyla (Ribbon sheet technology) Şekillendirilmiş Şerit yöntemi geliştirilmiştir. Dendritik ağ yöntemi olarak da anılan bu yöntemde, dendritik çekirdekler çok düşük hızla ergimiş silisyum banyosundan çekilerek, ince tek-kristalli tabakaların büyümesi sağlanır. Bu şekilde, dilimleme işlemi gerekmemektedir. Bu teknoloji ile ergitilmiş silikondan ince bir tabaka çekilir veya ergimiş silikon uygun bir altlık üzerine dökülür. Böylece kesme esnasında oluşan kayıplar önlenmiş olur. Wafer dilim kalınlığı 2003 yılında 0.32 mm iken bu değer

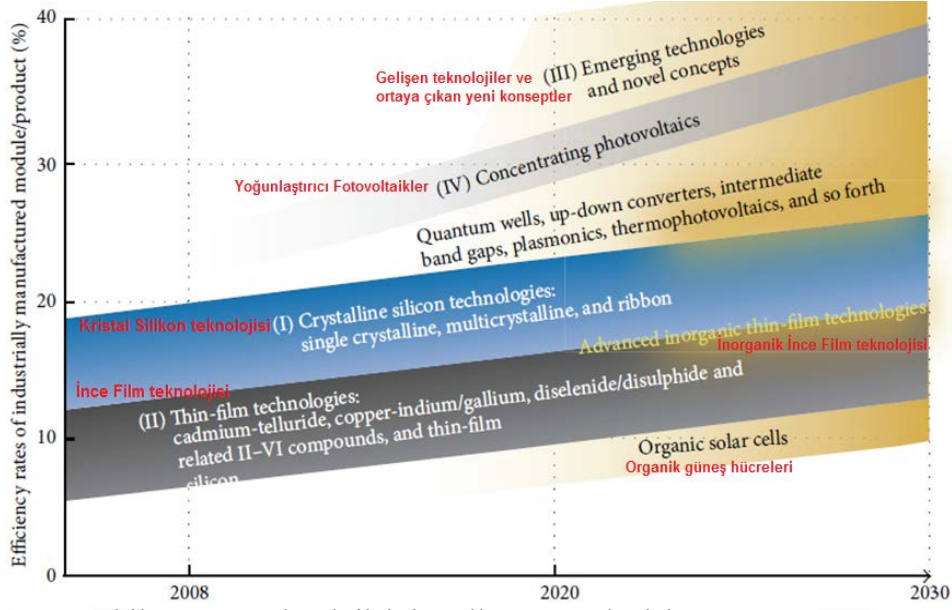
2010 yılında wafer kalınlığı 0.15 mm'ye kadar düşürülmüş ve verimi de %14'ten %16.5'e çıkarılmıştır [1,2,6].

FV modül üretim teknolojisinde bir sonraki aşama ise İF modüllerdir. İF modüller; cam, paslanmaz çelik veya plastik bir altlık gibi bir taban malzemesi üzerine ışığa duyarlı bir malzemenin ince bir film tabakası halinde biriktirilmesinden meydana gelir. İF fotovoltaik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir [6]. İF yarı-iletken malzeme, büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden milyonda birine kadar değişen damarlardan meydana gelmektedir. İF güneş pilleri arasında en önemli yarı iletken karışımlar amorf-silisyum İF, kadmiyum-tellür İF, bakır iridyum-diselenid İF'dir. Bu teknolojiyle oluşturulan İF'ler birkaç mikrondan daha az kalınlıkta aktif tabakalardan oluşurlar [1,5]. Son aşama ise solar panel üretiminin fiziksel olarak birleştirilmesi olup, güneş piline ait solar modül katmanları sırasıyla en üstte olacak şekilde cam, eva, göze dizisi, fiber glas (eva), arka örtü (tedlar) şeklindedir. Şekil 2.4'te FV modülün üretim evreleri gösterilmiştir [7].



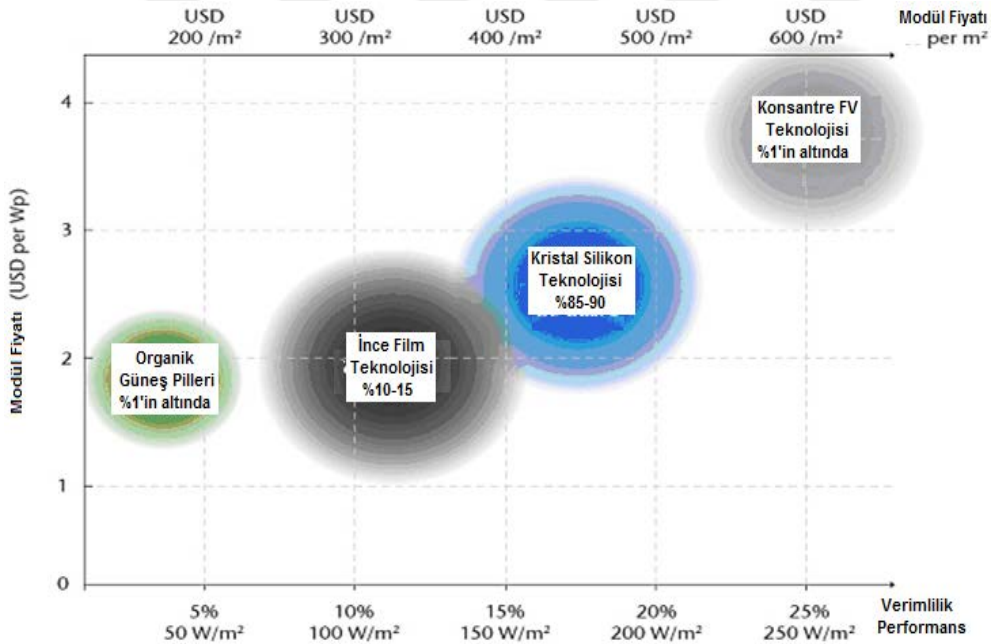
Şekil 2.4. FV modülün üretim evreleri [7].

FV panel sistemlerinde seri üretim yöntemlerinin benimsenmesi sayesinde, maliyetleri önemli ölçüde düşürülmüş ve düşük maliyetli işgücüyle birlikte FV panel sistem maliyetleri ekonomik düzeylere indirgenmiştir. Şekil 2.5'te FV teknolojisinin yıllara göre değişim öngörüsü gösterilmektedir.



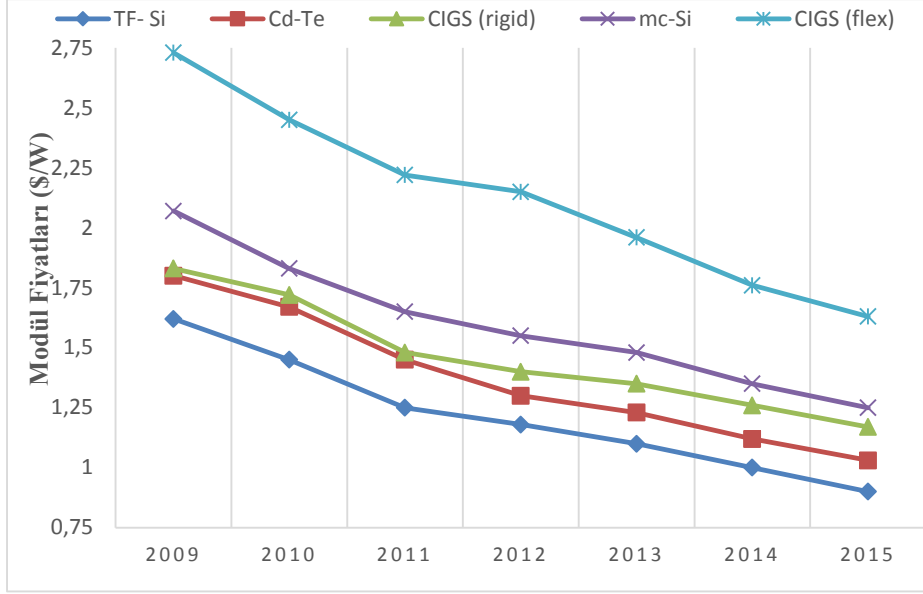
Şekil 2.5. FV teknolojisinin yıllara göre değişim öngörüsü [5].

Yaklaşık olarak, FV pazarının %85-90'ı tek kristalli ve çok kristalli silikon hücreli FV panellerden oluşmaktadır. Geri kalan yaklaşık %10-15'lik kapasite İF teknolojisine sahip panellerden oluşmaktadır. Şekil 2.6'da farklı FV modül teknolojileri için verimlilik-fiyat ilişkisi görülmektedir.



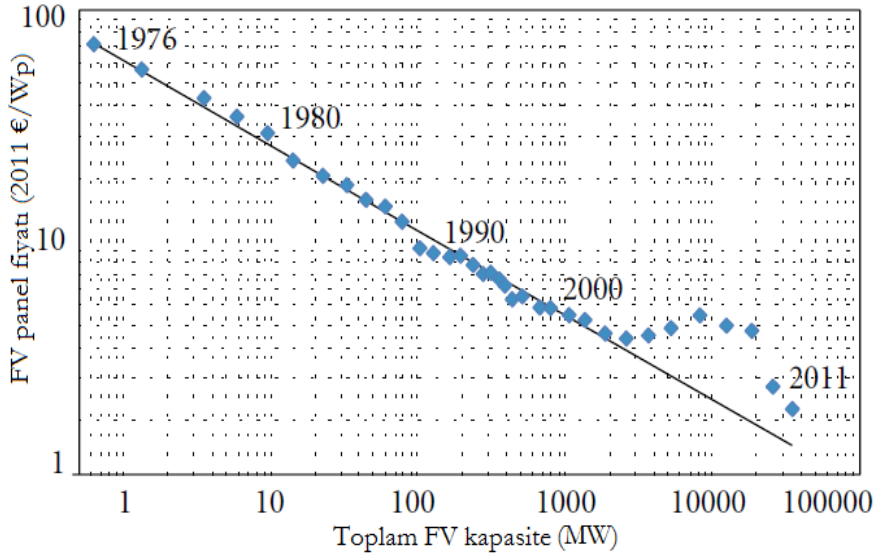
Şekil 2.6. Farklı PV modül teknolojileri için fiyat-verimlilik ilişkisi [5]

FV modül verimliliği ince film hücreleri için %10 civarında, tek kristalli silikon panellerde ise %20 civarındadır. Gelişen teknolojiyle birlikte toplam maliyetlerin azaldığı ve bu doğrultuda FV modül fiyatlarının düşüş trendine girdiği Şekil 2.7'de görülmektedir.



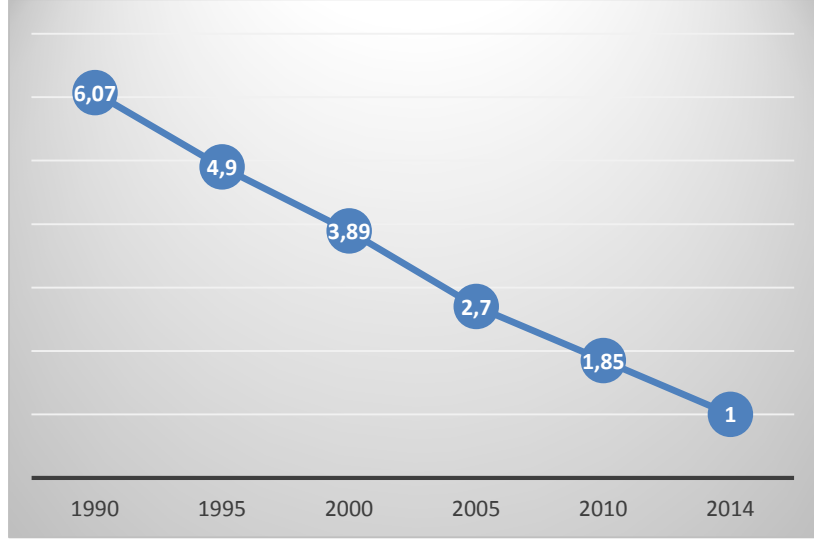
Şekil 2.7. Farklı FV teknolojileri için ortalama fiyat değişimi [5]

FV endüstrisinin hammadde maliyetlerindeki değişim, verimlilik düzeyinin artması, ekipman maliyetleri, teknolojik gelişim, sevkiyat vb. maliyet girdilerinin son 22 yıl boyunca azalan yönde eğilim göstermesi, güneşten elektrik üretim kapasitesini arttırmıştır. 1976-2011 yılları arasında, FV panel maliyetleri %15-%22 oranlarında azalmışken, günümüzde bu maliyetler verimlilik artışlarının sağlanmasıyla minimum düzeylere çekilmiştir. Şekil 2.8’de FV panel fiyatlarının yıllık üretim kapasitelerine göre değişimi görülmektedir.



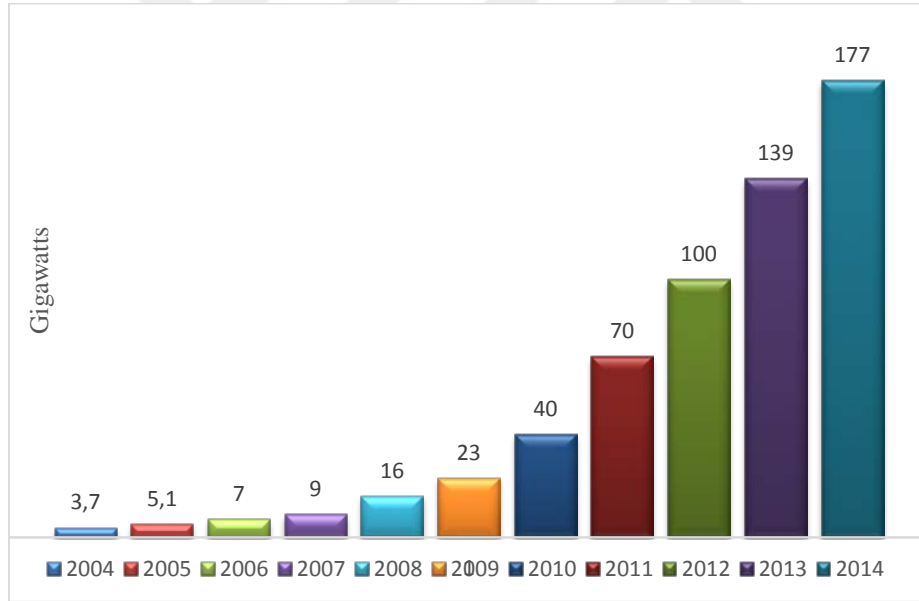
Şekil 2.8. FV panel fiyatlarının yıllık üretim kapasitelerine göre değişimi

Şekil 2.9’da 1990 dan 2014 yılına kadar geçen süre boyunca FV endüstrisinde watt başına maliyet değişim eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.9. FV endüstrisinde yıllara göre watt başına maliyet değişimi [8]

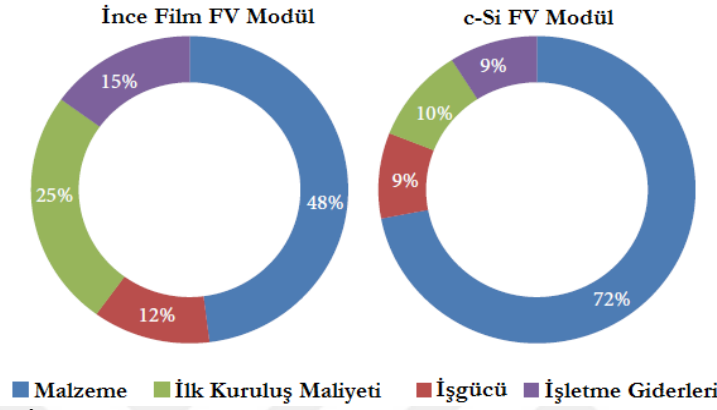
Kurulan FV sistemlerinin kapasitesi, son 10 yılda %40 artmıştır. Küresel bazda 2004-2014 arası güneşten elektrik üretim kapasitesi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. 2004-2014 yıllarında Dünya güneş enerjisi üretimi

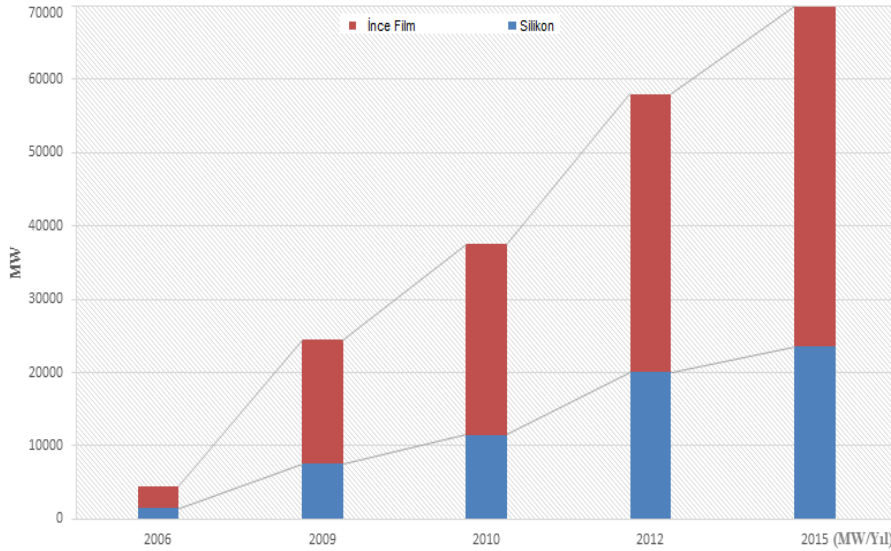
Günümüzde, FV teknolojisiyle birkaç wattan, MW seviyelerine kadar enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Yıllara göre FV üretim kapasitesi artmasına rağmen, FV panellerin maliyeti azalmıştır. FV modüllerin üretimi esnasında malzeme fiyatları tüm maliyetin İF modüller için %48'ine, c-Si modüller için ise %72'sine karşılık gelmektedir. Buna ek olarak, maliyeti düşürmek için FV modül imalatında hammadde tüketiminin azaltılması ve dönüşüm verimliliğinin artırılması watt başına FV modül fiyatlarını

düşürmüştür. Şekil 2.11’de İF ve c-Si FV modüller için maliyet paylarının oransal dağılımı gösterilmiştir. Buna göre İF hammaddeli FV modülün malzeme bedeli tüm maliyetin %48’i iken, c-Si hammaddeli FV modülün malzeme bedeli tüm maliyetin %72’sine karşılık gelmektedir. Malzeme bedelinde İF modülü daha ucuz iken işçilik ve işletme giderleri açısından ise c-Si modüller daha düşük maliyetlidir.



Şekil 2.11. İF ve c-Si FV modüller için maliyet paylarının oransal dağılımı

Şekil 2.12’de İF ve silikon tabanlı FV modüllerin yıllara göre enerji üretim kapasitesi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. İF ve silikon tabanlı FV modüllerin yıllara göre üretim kapasitesi [5]

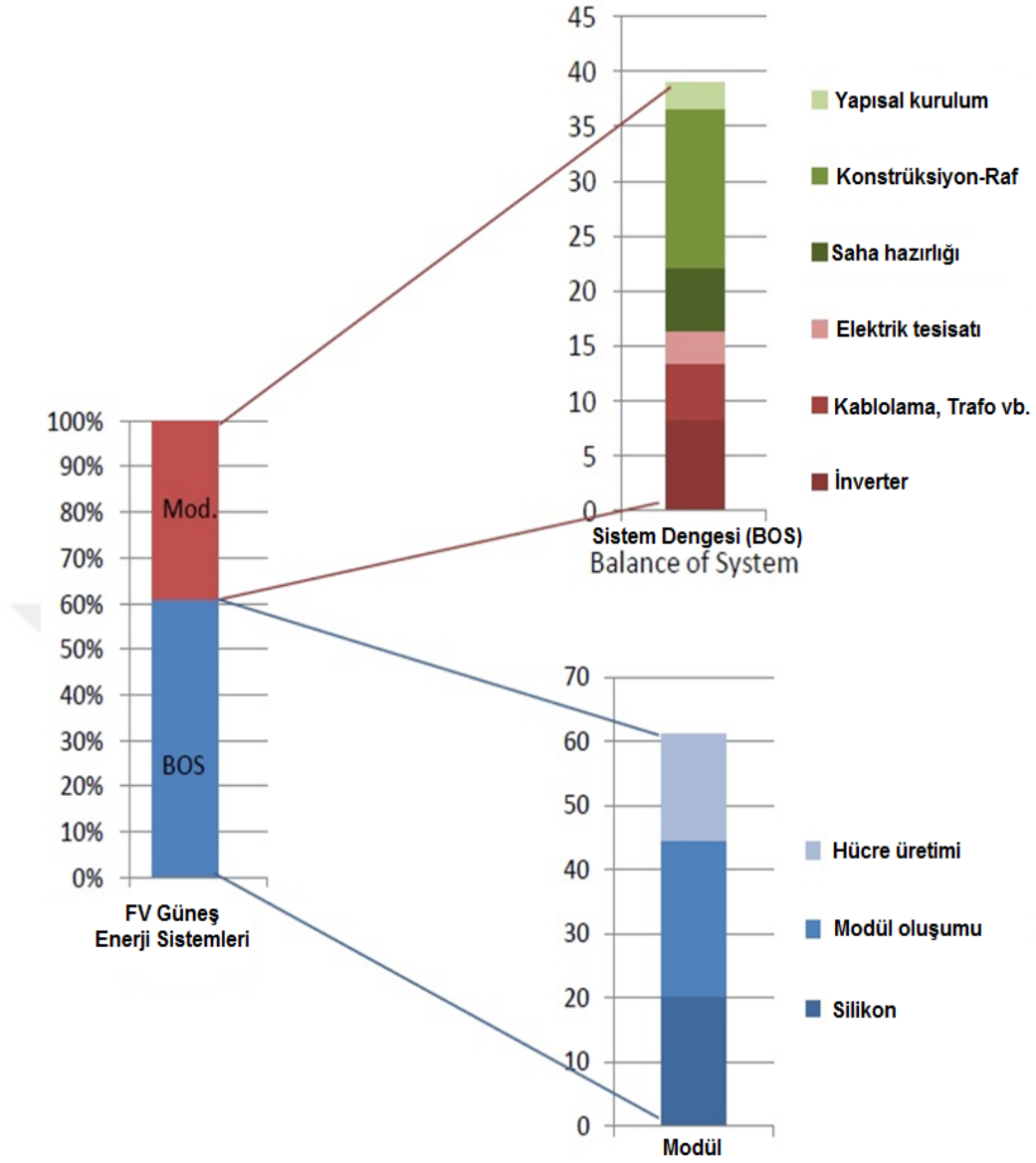
FV sistemlerin güncel maliyet analizinde FV panel fiyatlarının yaklaşık olarak \$1.41-\$1.75 arasında olduğu görülmektedir. Gelişen teknolojiyle ve verimlilik artışıyla watt başına modül fiyatlarının 2020 yıllarında \$0.73-\$0.85 değerlerine düşeceği öngörülmektedir [9].

Dolayısıyla FV modül maliyetinin düşmesi Dünya’da elektrik üretimi gibi çok önemli bir ihtiyacın giderilmesi ve düşük maliyetli FV modüllerinin daha yaygın olarak kullanılması anlamına gelmektedir [10-12].

### **2.2.1.2. FV Paneller Açısından Sistem Dengesi**

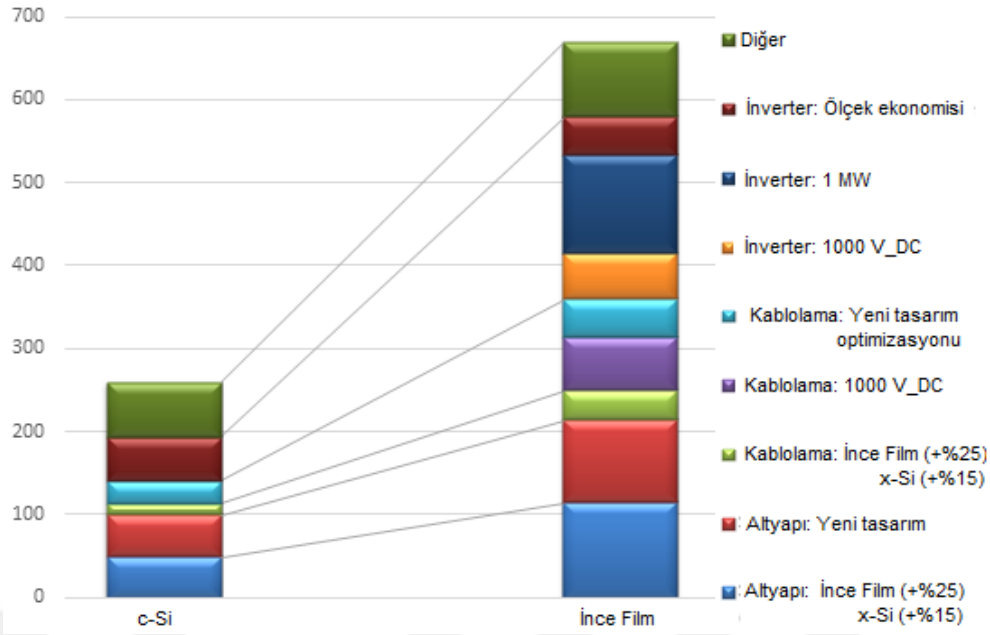
Literatürde güneş enerjisinden elektrik üretiminin optimum şartlarda sağlanması Güneş Sistem Dengesi (BOS) olarak ifade edilmektedir. FV panellerin ilk kurulum maliyeti, sistemin işletilmesi, teknolojik yenilikler, üretim optimizasyonu, FV panellerin verimlilik oranı ve FV sistemlerin ekonomik kullanım ömrü sistem dengesini etkilemektedir. İlk kuruluş maliyetleri ve devlet kaynaklı destek sübvansiyonları da sistem dengesini etkileyen parametrelerdendir. Buna ek olarak, güneş radyasyon kapasitesi ve güneşlenme süresi de Sistem Dengesi açısından önemlidir. Sistem Dengesi optimum ise sistemin geri ödeme süresi kısalmaktadır. Örneğin 7 yıl yerine 3 yıl gibi bir sürede amortisman bedeli karşılanabilmektedir.

Modül ve BOS ilk kuruluş maliyetleri iki kategoride yer almaktadır. Modül FV hücrelerden, silikon hammadde fiyatlarından ve modül montaj maliyetlerinden oluşurken, BOS ise yapısal ve elektrik sistemi giderlerinden oluşmaktadır [9]. Son yıllardaki teknolojik gelişim sayesinde genel sistem fiyatının FV panel maliyetine oranının %60-%75 aralığından %40-%60 düzeylerine indiği görülmektedir. Sistem elemanlarından inverter tüm sistem fiyatının yaklaşık %10’una tekabül etmekte iken, mühendislik hizmeti ve işgücü maliyeti ise yaklaşık %7 oranlarına karşılık gelmektedir. Kalan maliyetler ise diğer sistem bileşenleriyle ilgilidir. Şekil 2.13’de FV sistemler için oransal maliyet değişimi görülmektedir.



Şekil 2.13. FV sistemler için oransal maliyet dağılımı [5].

Fotovoltaik sistem maliyet dağılımlarına yönelik yapılan araştırmalarda mevcut piyasa koşulları, üretim yöntemleri ve FV modüllerin işçilik maliyetleri toplam maliyetin yaklaşık %66'sına karşılık geldiği görülmektedir. Ayrıca mühendislik proje tasarım aşamasındaki maliyetlerde gözardı edilmemelidir. c-Si ve İF için BOS maliyeti açısından tasarruf potansiyeli €/kWp Şekil 2.14'ten de görülmektedir.



Şekil 2.14. c-Si ve İF için Sistem Dengesinin maliyet açısından tasarruf potansiyeli (€/KWp) [5]

Maliyet azaltma çabası modül ve sistem verimliliğini iyileştirmeyi zorunlu kılmaktadır. BOS Sistem Dengesi amacıyla yürütülen verimlilik çalışmaları FV modüllerin sistem maliyetini azaltmıştır. Örneğin, modüllerin etkinliği 2 katına çıkarıldığı takdirde üretilen enerji miktarı artış göstermiş ve bu şekilde de BOS Sistem Dengesi tasarruf oranı artmıştır. FV sistemler için elektrik üretimi ile ilgili önemli maliyet azaltma noktaları şunlardır:

- Enerji dönüşümünün yüksek verimle sağlanması,
- Malzemelerin daha az kullanılması,
- Maliyet-etkin hammaddelerin kullanılması,
- Optimize edilmiş seri üretimin kullanılması,
- Optimize FV modül teknolojilerinin kullanılması,
- Optimize edilmiş şebeke entegrasyonunun (akıllı şebekelerin) kullanılması,

Tablo 2.1'de FV sistemler için maliyet düşürme potansiyeli gösterilmiştir.

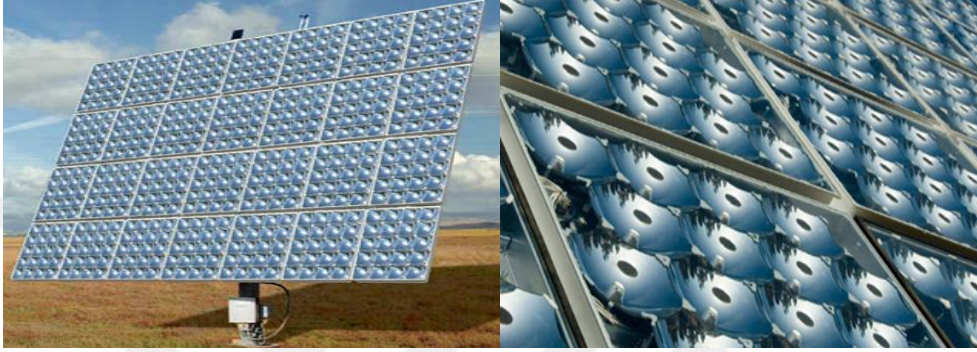
Tablo 2.1. FV sistemler için maliyet düşürme potansiyeli [5]

<b>Karakteristik</b>	<b>Açıklama</b>
<b>✓ Modül</b>	
Verim	> 25%
Yüzey	Camdan daha düşük maliyet ve ağırlık
Güvenirlilik	30 yıl kullanım ömrü
Malzeme	Dönüştürülebilir
<b>✓ BOS / Kurulum</b>	
İşgücü	Komplike olmayan kolay montaj-demontaj
Süreç	Kullanım kolaylığı
Kurulum	Kuruluşuyla birlikte elektriksel üretim
<b>✓ Güç Elektronikleri</b>	
Verim	> 95%, geliştirilmiş güç yönetimi
Güvenirlilik	30 yıl kullanım ömrü
Kurulum	Kablolama Entegrasyonu, (elektriksel bağlantıları en aza indirmek için)

### 2.3. Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Sistemler

Silisyum bazlı düzlemsel fotovoltaik malzemedan oluşan hücre yüzeyine çarpan güneş ışığı, elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu sistemlerde kullanılan malzeme ve hücre alanı büyük iken, verim düşüktür, bu da maliyeti artırmaktadır. Silisyum olmayan ince film veya yoğunlaştırıcı fotovoltaik (YFV) teknolojileri ile silisyum veya diğer yarıiletken malzemenin kullanımını azaltmak mümkündür. İF teknolojilerinin üretimi ucuz olmasına rağmen, daha nadir kullanılması ve imalat malzemesinin (Ga, In gibi) pahalı olması, verimli olmalarına rağmen, yaygın kullanımını sınırlamaktadır. YFV teknolojisi, daha az hammadde kullanılması daha düşük fiyat, yüksek verim ve daha etkin çözüm sunar. YFV teknolojisinde optik yoğunlaştırıcılar, güneş ışınlarını 1 cm<sup>2</sup>'lik alan üzerine odaklar ve güneşten elektrik üretimini sağlar. Kullanılan FV malzeme Si'den 10 kat daha pahalı olmasına rağmen yüksek verim ve daha az hammadde kullanımı ile toplam maliyet daha düşük olup, verim daha yüksektir [13].

YFV sisteminde kullanılan çok eklemli güneş hücreleri, dönüşüm veriminin artmasına yardımcı olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalara göre; çok eklemli güneş hücrelerinin kullanılmasıyla verimi %40'a ulaşmıştır. Bu çok eklemli FV sistemler, güneş spektrumunun önemli bir kısmını kullanarak, gelen güneş enerjisini daha verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürmektedirler [13-15]. Şekil 2.15'te yoğunlaştırıcı FV sistemler gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Yoğunlaştırıcı FV sistemler

## 2.4. Isıl Güneş Teknolojileri

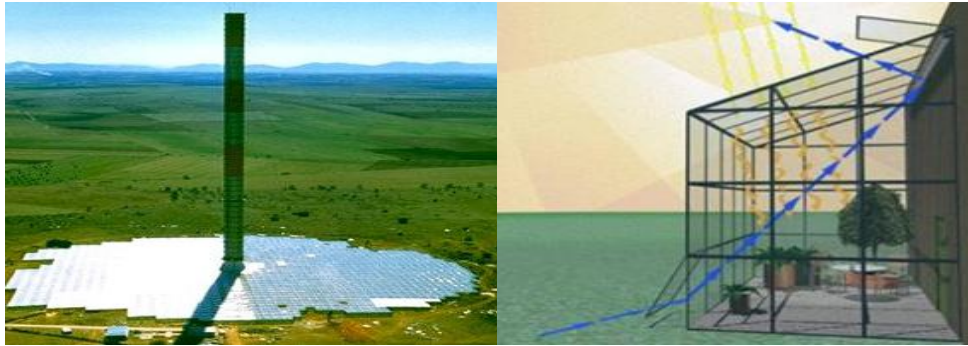
Isıl güneş teknolojileri başlıca üç ana grupta toplanmaktadır.

### 2.4.1. Düşük Sıcaklık Sistemleri

- i. Düzlemsel Güneş Kolektörleri: Güneşten gelen enerjiyi toplayarak akışkan bir sıvıya aktaran sistemlerdir. Genellikle konutlarda sıcak su temininde ve ortalama 70°C'lik sıcaklıklara ulaşmakta kullanılır.
- ii. Vakumlu Güneş Kolektörleri: 70°C'lik sıcaklıkları aşan sistemlerde kullanılır. Bu amaçla vakumlu cam borularla veya ısıyı emici yüzeylere gelen enerjiyi artırmak için metal ya da cam yansıtıcılarla 120°C'ye kadar sıcaklık artırılabilir. Bu tip sistemlerde çıkış sıcaklıkları 100-120°C civarındadır.
- iii. Güneş Havuzları: Zeminden 5-6 metre daha derinde olan su dolu havuzların duvar ve taban kısmı siyah renge boyanarak, güneşten gelen ışınım soğurur. Bu sayede 90°C'lik ısıda sıcak su elde edilir. Havuzda ısı dağılımının homojen olması için suya tuz eklenerek sudaki tuz konsantrasyonu düzenlenir.

- iv. Güneş Bacaları: Bu metotta güneşin ısıyla ısınan hava hareketinden faydalanarak elektrik üretilir. Güneşe maruz kalan şeffaf malzemeyle kaplı yapı içindeki toprak ve hava, çevre sıcaklığına göre daha fazla ısınır. Isınan hava tabiatı gereği yükselerek çatıya doğru hareket eder. Çatının eğimli yapısı nedeniyle toplanan sıcak hava yüksek bir bacaya yönlendirildiği takdirde, baca içinde 15 m/sn'lik bir hızda hava akışı oluşmaktadır. Baca girişine yerleştirilen yatay rüzgâr türbiniyle 15 m/sn'lik hızdaki rüzgârdan elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Deneysel bir kaç uygulama haricinde, bu yöntem ile elektrik üretilmemektedir [13].
- v. Güneş Mimarisi: Binaların yapımı ve tasarımında uygulanan değişiklikler ile ısıtma, aydınlatma ve soğutma işlemleri gerçekleştirilebilir. Güneş mimarisi yöntemi pasif bir yöntem olup, doğal yollarla ısı transferi gerçekleştirilerek güneş enerjisi toplanır, depolanır ve dağıtılır.

Şekil 2.16.a'da güneş bacası uygulaması ve Şekil 2.16.b'de güneş mimarisi uygulaması gösterilmiştir.



a) Güneş bacası b) Güneş mimarisi  
Şekil 2.16. Güneş bacası ve güneş mimarisi uygulamaları

- vi. Güneş Ocakları: Çanak şeklinde veya herhangi bir kutu şeklindeki içi yansıtıcı özellikli olan maddelerle kaplama yapılmış güneş ocaklarının odak noktasında, ısının toplanarak yemek pişirme işleminde kullanılmasıdır.

#### 2.4.2. Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş enerjisi uygulamalarında düzlemsel güneş kolektör sistemlerinin yanı sıra daha yüksek sıcaklıklara ulaşmak için yoğunlaştırıcı

kollektör sistemleri kullanılmaktadır. Güneş termal güç santralleri, birincil enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanan elektrik üretim sistemleridir. Bu sistemler temelde aynı yöntemle çalışmakla birlikte, güneş enerjisini toplama yöntemleri, yani kullanılan kollektörler bakımından farklılık gösterirler. Toplama elemanı olarak parabolik oluk kollektörlerin kullanıldığı güç santrallerinde, çalışma sıvısı kollektörlerin odaklarına yerleştirilmiş olan absorban boru içerisinde dolaştırılır. Daha sonra, ısınan bu sıvıdan eşanjörler yardımı ile kızgın buhar elde edilir. Parabolik çanak kollektörler kullanılan sistemlerde de ya aynı yöntem kullanılır ya da merkeze yerleştirilen bir motor (Stirling) yardımı ile direkt olarak elektrik üretilir. Merkezi alıcılı sistemlerde ise, güneş ışınları düzlemsel aynalar (heliostat) yardımı ile alıcı denilen ısı eşanjörüne yansıtılır. Alıcıda ısıtılan çalışma sıvısından konvansiyonel yollarla elektrik elde edilir.

#### 2.4.2.1. Parabolik Oluk Kollektörler

Parabolik oluk kollektörlü güç santral sistemlerinde, santral bileşenleri güneş tarlası, buhar üretim sistemi ve elektrik üretim sistemlerinden oluşmaktadır. Bu tip santrallerde doğrusal yoğunlaştırma yapılmak suretiyle güneş enerjisiyle 300°C'lik bir sıcaklığa ulaşılır. Parabolik oluk kollektörlü sistemlerde ısı transferinde kullanılan akışkan sıvı yüksek sıcaklığa dayanabilen termal yağlardır [3,13]. Örnek parabolik oluk sistemi uygulamaları Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Parabolik oluk sistemi uygulamaları [3].

#### 2.4.2.2. Parabolik Çanak Kollektörler

Parabolik çanak kollektör sistemleri, yüzeye gelen güneş radyasyonunu noktasal olarak odak noktasında yoğunlaştırırlar. Bu tip

kollektörlerin yüzeyi de parabolik oluk kolektörlerin yüzeyi gibi yansıtıcı aynalarla veya yansıtıcı boya ile kaplıdır. Güneşten gelen ışınım parabolik çanak yüzey sayesinde aynalarla odak noktasındaki Stirling motorun ısıtılacak ucu üzerine yoğunlaştırılır. Oluşan ısı farkıyla displacer içindeki yerdeğiştirme pistonunun hareketiyle Stirling motoru güneş aracılığıyla elde edilen ısyı elektrik enerjisine dönüştürür. Çanak-Stirling sistemlerinde güneş enerjisinden elektrik üretiminde %30-%40'a kadar verim elde edilebilmektedir. Çanak-Stirling sistemlerinde;

- Termik kayıplar bulunmamaktadır.
- Güneşin yoğunlaştırma oranı yaklaşık olarak parabolik oluk sistemlerde 80 kat; kule sistemlerinde 1000 kat iken, çanak-Stirling sistemlerinde ise 15000 katdır.
- Özel amaçlı olarak üretilen Stirling motorlar kullanılır.
- Yatırım maliyeti yüksek bir teknolojidir.

Stirling motorlu parabolik çanak sistemi uygulamaları Şekil 2.18'de görülmektedir.



Şekil 2.18. Stirling motorlu parabolik çanak sistemi uygulamaları [3].

#### 2.4.2.3. Merkezi Alıcı Güç Santralleri

Merkezi alıcı güç santralleri güneşten gelen enerjiyi yoğunlaştırmak suretiyle kullanılmaktadırlar. Bu tip güç santrallerinde güneşten gelen enerji, heliostat denilen aynaların yardımıyla merkezdeki kuleye doğru yöneltilerek yansıtma yapılır. Bu sayede 1000°C ve üzerindeki sıcaklıklara ulaşılır. Heliostat aynalar farkı algoritmalar kullanılarak bilgisayarlar yardımıyla

güneşi takip eder ve güneşten gelen enerjiyi merkezi kuledeki alıcı üzerine yansıtır. Alıcı içinde ısıtılan akışkan madde buhar jeneratörüne gönderilir ve buharlaşma sağlanarak basınç artışı sağlanır. Üretilen buhar, buhar türbini içinden geçerek elektrik üretimini yapacak hale gelir. Bu işlem sonrası buhar, soğutma suyuyla soğutma işlemine tabi tutularak, tekrar buhar jeneratörü üzerinde ısıtma işlemi için gönderilir [3,13]. Merkezi alıcılı güç sistemi uygulamaları Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Merkezi alıcılı güç sistemi uygulamaları

## 2.5. Güneş Enerjisinde Verim Arttıracı Geleneksel Yöntemler

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmenin birçok yöntemi bulunmaktadır. Bunlar güneş ışınlarından direkt olarak elektrik sinyalleri üretmek veya güneş enerjisinin ısı etkisiyle belli bir alan veya sıvıyı ısıtarak enerji üretmektir. Güneşten elektrik üretimi Dünya üzerindeki enerji potansiyeli yüksek olan bir kaynaktır. İlk kurulum maliyeti yüksek olmasına rağmen işletme giderleri açısından en düşük maliyetlere sahiptir.

Güneş sistemlerinde düşük verimlilik nedenleri:

- Güneş ve Dünya'nın dinamik hareketliliğinin anlık olarak değişmesi,
- FV hücrelerde maksimum verim için güneşin dik gelme zorunluluğunun olması,
- Bulutlu havada arzulanan ışınım düzeyine ulaşamaması,
- Büyük güç talebinde geniş sahalara ihtiyaç duyulması,
- FV panellerin ısınması nedeniyle oluşan verim kayıpları,

şeklinde sıralanabilir.

Bu tip olumsuzluklar nedeniyle güneşten enerji üretim amacıyla istenen düzeyde faydalanılamamaktadır. Bu yüzden verimi arttırmak için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar FV panel sıcaklığını düşürme, FV panellerin güneş ışınlarını dik açıyla alabilmesi için güneş takip sistemlerinin geliştirilmesi ve maksimum güç noktası takip yöntemidir. Maksimum güç noktası takip yönteminde FV panelden üretilen gücün yüke bağlı olarak sürekli maksimum değerde tutulması sağlanmaktadır. Bu şekilde verim artışı sağlanmaktadır. Güneş takip sistemleriyle FV bir sistemin verimi %35-40'lara kadar arttırılabilir. Şekil 2.20'de sabit Sabit FV panel ile güneşten elektrik üretim uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Sabit FV panel ile güneşten elektrik üretimi

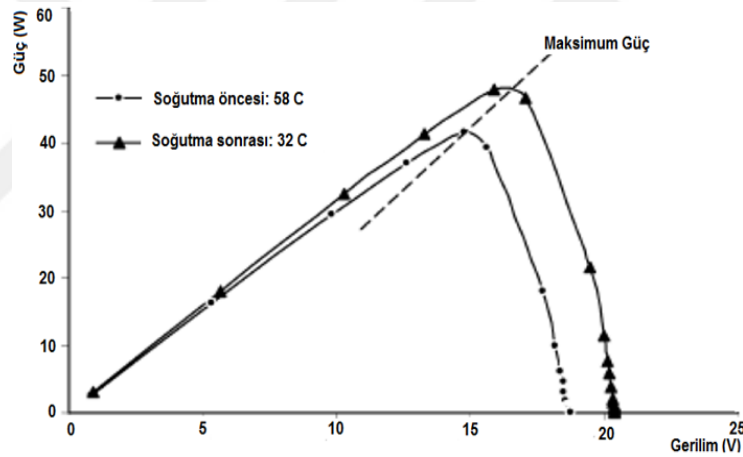
### 2.5.1. FV Panel Soğutma Sistemleri

FV panellerin üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle FV panellerden elektrik üretiminde verim artışına yönelik güneş panellerini soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Panel sıcaklığı FV panellerin elektriksel verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Yani çalışma sıcaklığı arttıkça panelin elektriksel verimi azalmaktadır. Çünkü FV panellerin çalışma esnasındaki sıcaklığı ortam sıcaklığından daha yüksek değerlerdedir.

FV panelin sıcaklığını tayin eden ortam parametrelerinden en önemlileri hava sıcaklığı ve rüzgâr hızıdır. Buna göre ortamın hava sıcaklığının artması panelin elektriksel verimini azaltmakta, rüzgâr hızının artması soğutucu etki yaptığından verim artışına katkı sağlamaktadır. Diğer

bir deyişle panel sıcaklığı arttıkça olumlu yönde çok az bir akım artışı olsa da ciddi anlamda gerilim düşümü nedeniyle toplam güç %10'a kadar düşebilmektedir.

Literatürde çeşitli iklimlendirme sistemleri kullanılarak FV panellerden %4 ile %10 arasında daha fazla elektrik üretilebileceğine dair çalışmalar bulunmaktadır. Buna göre soğutma sistemi olmadan FV panelin enerji üretim faaliyeti esnasında çalışma sıcaklığı 58°C yükselmiş ve bu esnada maksimum 41 W üretim yapılmıştır. Daha sonra FV panel soğutulmuş panel sıcaklığı 32°C'ye kadar düşürüldüğünde üretilen maksimum gücün 49 W olduğu görülmüştür. Dolayısıyla FV panel sistemlerinin soğutulmasının verimlilik artışına katkı sağladığı görülmektedir. Şekil 2.21'de farklı sıcaklık değerleri için FV panelin güç–gerilim değişimi gösterilmiştir [16].



Şekil 2.21. Farklı sıcaklık değerleri için FV panelin güç–gerilim değişimi [16]

### 2.5.2. Güneş Takip Sistemleri

Güneşlenmenin günün her saatinde en yüksek seviyede tutulabilmesi için FV panellerin güneşi takip etmesi gerekmektedir. Güneş ile panel yüzeyi arasındaki açı günün her saatinde dik olursa, verim en yüksek seviyelerde olur. FV panellerin güneşi dik açı ile görebilmesi için sabah gün doğumundan akşam gün batımına kadar güneşi takip etmeleri gerekir. Ancak gün boyu yapılan takip işlemi yılın her mevsimi için aynı kazancı sağlamaz. Çünkü dünyanın güneş eksenindeki hareketine bağlı olarak yıl içerisinde güneş her mevsim farklı yörüngeleri takip etmektedir.

Güneş takip sistemleri, güneş ışınlarının FV panelin yüzeyine dik gelmesini sağlayarak elde edilen enerji kazanç miktarını arttırmaktadır. Bu sistemleri kullanarak FV panellerden elde edilen enerji kazancı yaklaşık olarak %35 oranında arttırılabilmektedir. Örneğin; NREL (National Renewable Energy Lab.) tarafından Denver, USA eyaleti için yapılan ölçümlere göre [16,17];

- Güneş takip sistemi olmayan sabit FV panellerden  $5.5 \text{ kW/m}^2$  yıllık elektrik üretilmiş,
- Tek eksen güneş takip sisteminde ise  $7.2 \text{ kW/m}^2$  yıllık elektrik üretilmiş,
- Çift eksen güneş takip sisteminde de  $7.4 \text{ kW/m}^2$  yıllık enerji üretimi yapılmıştır.

Güneş takip sistemleri özellikle yer kısıtlaması olan uygulamalarda nisbi olarak daha kullanışlı olmaktadır. Örneğin; gemi, karavan gibi araçlarda gerekli enerji elde etmek için kullanılacak panel sayısı güneş takip sistemleri ile daha az sayıya düşürülerek alandan tasarruf edilebilmektedir [16]. Örnek bir güneş takip sistemi uygulaması Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



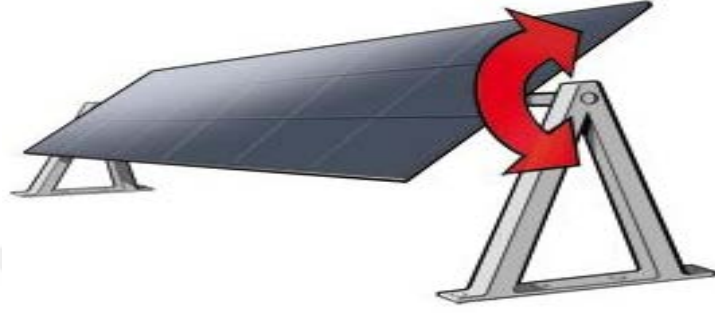
Şekil 2.22. Güneş takip sistemi uygulaması

Güneş takip sistemleri takip eksenine ve kontrol yöntemine göre iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

- Eksen sayısına göre:

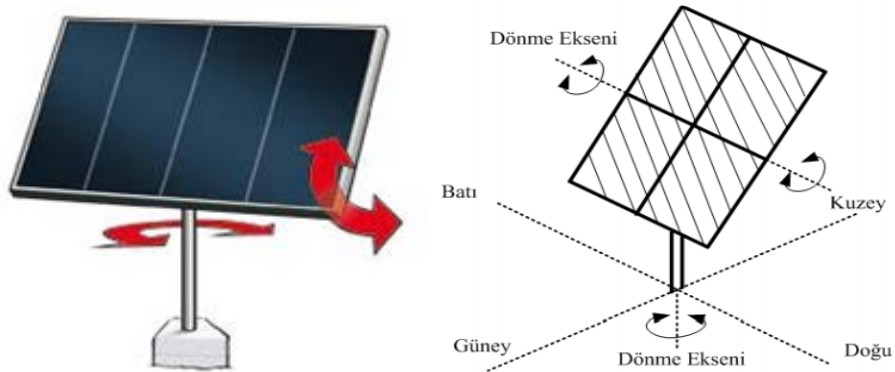
**Tek eksenli kontrol:** Tek eksenli kontrol sistemlerinde panel tek yönde hareketini sürdürür. Bu sistemde verimlilik %20 oranında artabilmektedir. Tek eksen kontrol sisteminde hareket yönü doğudan batıya

olup, FV paneller kuzeyden güneye hareket eder. Bundan farklı olarak FV panel kuzey güney hattına yerleştirildiği takdirde ise FV panel hareketi doğudan batıya doğru olur. Türkiye için doğu batı yönünde takip yapılacaksa  $240^\circ$ , eğer takip dik ekseninde yapılacaksa  $72^\circ$  kadar hareket alanı oluşturulmuş olur. Şekil 2.23'te tek eksen için güneş takip sistemi örneği gösterilmiştir [18].



Şekil 2.23. Tek eksen için güneş takip sistemi

Çift eksenli kontrol: Çift eksenli kontrol sisteminde ise Güneş'in gökyüzündeki konumuna göre yani azimut ve zenit açısına göre hareket edilir. Bu tarz kontrolde eksenlerden biri azimut yönünde, diğeri ise zenit yönünde hareket eder. Çift eksen kontrol sistemlerinde FV panellerdeki verim %35-40 oranında arttırılabilmektedir. Azimut eksenini FV panelin doğu-batı istikametindeki hareketini, zenit ekseniyse FV panelin yükseklik ayarını ifade eder. Şekil 2.24'te çift eksen güneş takip sistemi gösterilmiştir.

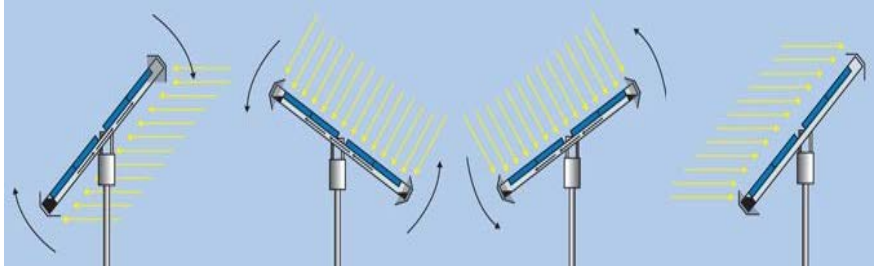


Şekil 2.24. Çift eksen güneş takip sistemi

- Kontrol yöntemine göre:

Pasif kontrol sistemleri (kapalı döngü): Takip işlemi için konum bilgisi sensörler tarafından alınır. Bu sistem kapalı çevrim çalışır. Sensörler sayesinde FV paneller ışımının yoğunlaştığı yöne dönerek enerji üretimine

başlanır. Sensörler gün içi dinamik değişimi ışınımın yoğunlaştığı yönü baz alarak algılamaya devam eder. Üretilen sinyaller kontrol ünitesince sürekli işlenerek sistem tek eksen veya çift eksende hareketine gün batımına kadar devam eder. Şekil 2.25'te Pasif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları gösterilmiştir.



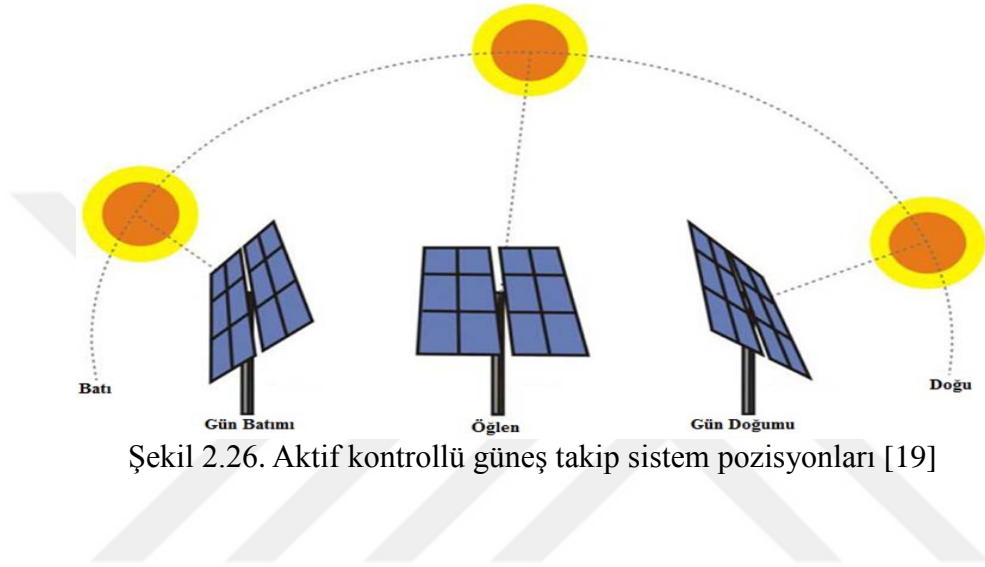
Şekil 2.25. Pasif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları [18]

Pasif kontrol yapısına sahip sistemlerde avantaj kullanılan algoritmaların basit olmasıdır. Ancak kullanılan sensörler ortam koşullarından fazlaca etkilenebilir. Mesela sensörler gece ay ışığını veya yıldızları ışık kaynağı gibi algıladığından hareket esnasında daha çok enerji harcaması söz konusu olabilmektedir. Sensörlerden alınan bilgiler sürekli olarak kontrol ünitesince izlendiğinden ve bu veriye göre sistem çalıştığından bu sistemlere kapalı çevrim sistemler de denilmektedir.

Aktif kontrol sistemleri (açık döngü): Güneşin pozisyonu için herhangi bir sensör kullanmayan, güneşin konum bilgisine algoritmalarla ulaşılan, açık çevrim takip sistemlerdir. Güneşin yeri ve dinamik değişimi yıl ve gün bazlı olarak bazı yaklaşımlarla matematiksel olarak modellenir. Üretilen matematiksel model ile sisteme dair açı değerleri ve kontrol ünitesi parametreleri oluşturulur.

Aktif kontrollü sistemler pasif kontrol sistemlerine göre daha karmaşıktır. Ancak doğruluk oranları daha yüksektir. Sensörleri etkileyen bulutlu hava, alıcı uçlarının kirlenmesi, yağmur etkisi gibi bozucu etkiler aktif kontrollü sistemleri etkilemez. Bulutlu havada güneşin yeri matematiksel formda bilindiğinden FV paneller sürekli olarak güneşe doğru dik açıdadır. Aktif kontrollü sistemlerde tek eksen veya çift eksen FV sistem olarak tasarlanabilirler. Gerek tek eksen gerekse çift eksen kontrol için kullanılan iki tip çalışma metodu vardır. Bunlar sürekli çalışma ve ayırık

çalışma şeklidir. Sürekli çalışmada güneş kontrolörün anlık takibindedir. Alınan bilgiler anlık olarak hareket motorlarına iletilerek, güneş takibinde süreklilik sağlanır. Ayrık çalışmada ise kontrolör konum bilgisi anlık olarak alınır, ancak güneşi izleme işlemi seçilen zaman dilimlerinde yapılır. Bu tür bir işlem ile ise izleme sisteminin enerji tüketimi minimum düzeye çekilebilir. Aktif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları Şekil 2.26'da gösterilmiştir [19].



Şekil 2.26. Aktif kontrollü güneş takip sistem pozisyonları [19]

### 3. STİRLİNG MOTORLAR

Stirling motorlar teorik olarak en yüksek verime sahip motorlardır. Sessiz ve titreşimsiz çalışmaları, özel bir yakıtı veya enerji kaynağına ihtiyaç duymadan kullanılabilmeleri, üretilen güç değerleri ve basit tasarımları ile bu motorlar günümüzde güneş enerjili sistemler de kullanılmaktadır.

Stirling motorların üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [20]:

- Stirling motorlarda her türlü ısı kaynağı kullanılabilir.
- Hareketli parçaların az olması üretim maliyetinin düşük olmasına neden olmaktadır.
- Montajı ve bakımı diğer motorlara göre daha kolay ve ucuzdur.
- Çok küçük ebatlarda yapılabileceği gibi, çok büyük boyutlarda da yapılabilir.
- İçten yanmalı motorlarda olduğu gibi gürültülü çalışmazlar.
- Silindir içerisinde yanmanın gerçekleşmemesi ve hareketli parçaların az olması, Stirling motorların ömrünün uzun olmasını sağlamaktadır.
- Yanma ürünü olan NO<sub>x</sub>, CO, yanmamış HC ve partikül emisyonları oluşmadığından, çevre kirliliğine neden olmamaktadır.

Stirling motorların olumsuz yanları:

- Piston malzemesinin ısı iletim katsayısı, silindirin et kalınlığı ve ısı transfer alanı gibi sistem özelliklerinin etkisi ile motorun çalışması için gerekli olan ısının silindir içerisindeki çalışma akışkanına transferi, zaman almaktadır. Bu nedenle motorun ilk hareketi, ani olarak gerçekleşmemektedir.
- Motor, kapalı sistemli olduğundan, çalışma akışkanı sürekli olarak silindir içerisinde yer almaktadır.
- Sızdırmazlık problemi çözülmezse gaz kaçaqları oluşmakta ve motor verimi azalmaktadır.
- Ölü hacimlerin fazla olması, motor verimini düşürmektedir.
- Motorun yavaşlaması ve hızlanması zaman almaktadır. Piston hızı kontrolü zordur.

- Silindirin uç bölgesi kesintisiz olarak yüksek sıcaklığa maruz kaldığından, bu bölgede termal gerilmeleri önlemek için sıcaklığa dayanımı fazla, yüksek maliyetli malzemeler kullanılmaktadır.

### 3.1. Stirling Motorların Tarihsel Gelişimi

Güneş enerjili Stirling motorlar ilk olarak 1872 yılında John Ericson tarafından imal edilmiştir. Motor güneş enerjisi ile çalıştığında, güneş ışınlarını odaklayıcı güneş kollektörleri veya dış bükey mercekler kullanılmaktadır. Bu şekilde çalışma maddesi üzerinde doğrudan ısı etkisi oluşturulur. Stirling motorlar dıştan ısı verme prensibine göre çalışırlar. Hareket mekanizması, ısıtıcı, rejeneratör, soğutucu, güç pistonu, piston ve motor bloğundan oluşurlar. Çeşidi ne olursa olsun ısıtıcı, rejeneratör ve soğutucu Stirling motorlarının temel parçalarıdır. Hareket mekanizmasının görevi piston ve displacer'i birbiri ile zamanlamalı olarak hareket ettirmek ve termodinamik çevrimi gerçekleştirmektir. Stirling motorlarda güneş bir alıcı üzerine toplanır. Güneşten gelen radyasyon alıcı odaklayıcı sayesinde ısıya dönüştürülerek, ısının akışkan maddeye aktarılması sağlanır [21].

Stirling motorunu (ısı motoru) 1816 tarihinde 4081 patent no'suyla icat eden kişi Robert Stirling'dir. İlk nesil Stirling motorları 100 W ile 4 kW arasında elektrik üretmişlerdir. 1853 yılında, John Ericsson, 220 kW güç üreten, deniz taşıtlarında kullanılan Stirling motoru imal etmiştir. İmalatı 1915 yılına kadar devam eden ilk nesil Stirling motorların verimi %7'yi geçmemiştir. 1862'de Parker ve Malik tarafından tek silindirli bir rhombic-drive Stirling motoru imal edilmiş ve güneş enerjisi ile test edilmiştir [22]. 1864 yılında, Ericsson reflektör kullanarak güneş enerjili Stirling motor tasarlamıştır [23]. 1864-1870 yılları arasında, Stirling motoru ısıtmak için parabolik oluk kollektörleri kullanan buharlı sistemler önerilmiştir [24-27]. 1937 yılında Philips, özellikle Asya ve Afrika'da düzenli güç kaynağı bulunmayan bölgelerde radyolar için küçük ve sessiz elektrik jeneratörü olarak kullanmak amacıyla Stirling motor üretimine başlanmıştır [28].

1950-1955 yılları arasında Ghai ve Khanna Hindistan'da güneş enerjili Stirling motorun ısı kaybı sorunlarına değinmiştir. Reader ve Hooper, 1908 yılında bir güneş enerjili Stirling motorun su pompalama

sistemleri için kullanılabileceğini önermiştir [29]. Childs ve arkadaşları, güneş enerjili deniz suyu arıtmasında kullanılan güneş çanak/Stirling motorunu %22 verimle çalıştırmışlardır [30]. 1984'te Arizona ve Nevada'da güneş enerjisi test alanlarında güneş odaklı Stirling sistemleri ile 118.000 kWh'dan fazla elektrik üretilmiştir [31]. Gupta ve arkadaşları kırsal uygulamalar için 1 ve 1.9 kW güneş enerjili pistonlu motorlar geliştirmiştir. Motor verimleri ortalama %5.5'tir [32]. Pearch ve arkadaşları 1 kW kombine ısı ve güç sistemini analiz ederek elektrik maliyetinin yaklaşık %25 oranında azaltılabileceğini göstermiştir [33].

## **3.2. Stirling Motorlarda Termodinamik ve Mekanik Prensipler**

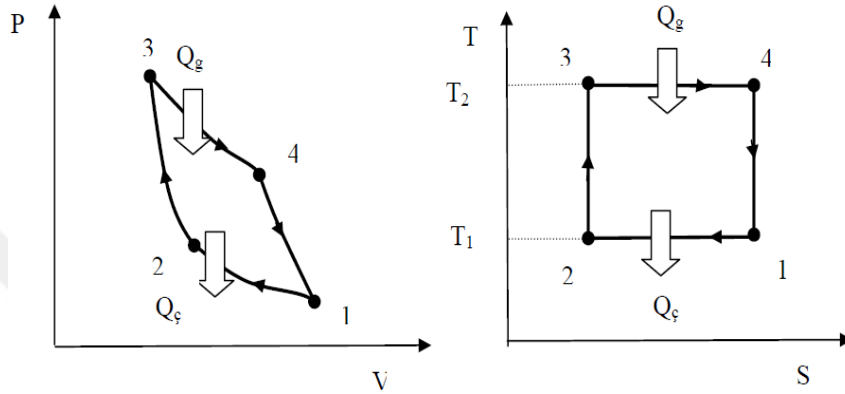
### **3.2.1. Termodinamik Çevrimler**

Güç üreten makineler genellikle termodinamik çevrim mantığına göre çalışırlar. Termodinamik çalışma sürecindeyken güç çevrimleri incelenerek sonuca ulaşılır. Değerlendirme sürecinde sistemin dengeye ulaşma süresi, sürtünme düzeyi gibi şartlar gözönüne alınır. Termodinamik çevrimlerin nümerik hesabında tersinir hal değişimi gibi bazı kabuller yapılır. Tersinir hal değişimi, bir yönde gerçekleşirken, hiçbir iz bırakmadan ters yönde de gerçekleşen hal değişim olaylarıdır. Pratikte tersinir hal değişimi yoktur, çünkü herhangi bir işlemin geriye dönük gerçekleşmesinde kayıplar söz konusu olmaktadır. Çevrim analizlerini basitleştirmek için hal değişimleri tersinir kabul edilerek işlem yapılır.

#### **3.2.1.1. Carnot Çevrimi**

İşin diğer enerji şekillerine dönüşümü kolaydır. Ancak termal enerjiyi işe dönüştürmek için özel düzenlemeler gereklidir. Stirling motorlar farklı enerji biçimlerini işe dönüştüren makinelerdir. Bu makinelerin çalışması ısı verimle ifade edilir. Belirli alt ve üst eşik sıcaklık değerleri arasında çalışan bir Stirling motor göz önüne alındığında Stirling motor çevriminin tümüden tersinir olması için, herhangi termal aktarım esnasında çalışma akışkanına ait sıcaklıkla kaynak sıcaklığı arasındaki fark, diferansiyel  $dT$  değerini geçemez. Carnot çevrimi gereği termal geçişler bu kurala göre yürümektedir.

1824'te Fransız mühendis Sadi Carnot'un bulduğu Carnot çevriminde dört hal değişimi mevcut olup, bu hal değişimlerinin ikisi sabit sıcaklık, diğer ikisi de adyabatik hal değişimleridir. Carnot çevrimine ait P-V ve T-S diyagramları Şekil 3.2'de gösterilmiştir [20]. Şekil 3.1'de 1-2 aralığı tersinir sabit sıcaklıktaki sıkıştırmayı, 2-3 aralığı tersinir adyabatik sıkıştırmayı, 3-4 aralığı tersinir sabit sıcaklıkta genişlemeyi ve 4-1 aralığıysa tersinir adyabatik genişlemeyi sembolize eder.



Şekil 3.1. Carnot çevrimi P-V ve T-S diyagramları [20]

İdeal Carnot çevrimli Stirling motora ait çalışmayı değerlendirmek için bir ucu kapalı silindir ile ve bu silindirde sürtünmesiz olarak hareketine devam eden bir piston düşünüldüğünde (silindirin yalıtımının yapıldığı kabul edilmiştir), başlangıç anında piston alt ölü noktadadır, yani pistonla silindir arası mesafe en fazladır (bu esnada ölü hacim maksimumdur). Çalışma akışkanına ait basınç ve sıcaklık değerleri minimumdur. Piston silindirin ucuna doğru hareket ettiğinde, silindir içinde hacimsel sıkışma olayı gerçekleşir. Bu işlem esnasında silindir ucunun iletkenliğinin maksimum olduğu kabul edilir. Bu şekilde işlem sabit sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Sıcaklığın diğer uca sabit kalması amacıyla, silindirin diğer ucundaki izolasyon kaldırılarak bu tarafa büyük bir soğutucu yaklaştırılarak bu kaynakla ısı atılımı gerçekleştirilir. 2 noktasına gelince soğuk kaynak geri çekilerek silindir ucu tekrar izolasyona tabi tutulur.

2-3 hal değişimi, sıkıştırma işlemidir. Silindir kafası tamamıyla yalıtılmıştır. Piston, silindir kafasına doğru hareketine devam ettiği zaman, hacimdeki azalma ve hem basınç hem de sıcaklıktaki artma ile sonuçlanır. Bu hal değişiminde entropi sabit kalmaktadır.

3-4 hal değişimi, tersinir sabit sıcaklıkta genişleme işlemdir. Piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru hareket ederken silindir içindeki gaz genişleyerek soğumaktadır. Sıcaklığı  $T_1$ 'de sabit tutmak için silindirin alt kısmındaki izolasyon kaldırılmakta ve buraya sonsuz büyüklükte,  $T_1$  sıcaklığında sıcak kaynak yaklaştırılarak silindir içerisine ısı aktarılmaktadır. Piston 4 noktasına geldiğinde silindir kafası tekrar izole edilmekte ve sıcak kaynak çekilmektedir.

4-1 hal değişiminde, pistonun hareketine bağlı olarak üst ölü noktaya kadar sıkıştırma yapılır ve çevrim tamamlanır. Çevrimin ısı verimi Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

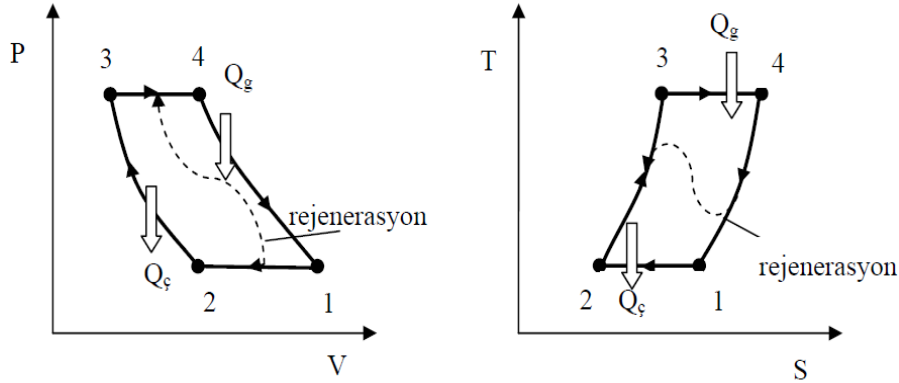
$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (3.1)$$

Pratikte Carnot çevriminin uygulamaya geçirilmesi mümkün değildir. Çünkü büyük ısı değişimlerine ve uzun süreye gerek vardır. Oysa motorda çevrim çok kısa sürede gerçekleşmektedir. Bu nedenle Carnot çevriminin pratikte uygulanabilirliği yoktur. Carnot çevrimi, gerçek ve diğer ideal çevrimlerin karşılaştırılacağı bir standart haline gelmiştir [20]. Carnot çevrimi verimi, sisteme verilen ve sistemden alınan sıcaklıkların fonksiyonudur. Isıl verim, sisteme verilen sıcaklık yükseldikçe veya sistemden atılan sıcaklık düştükçe artar.

### 3.2.1.2. Ericsson Çevrimi

Carnot çevrimi haricinde, çevrime ısı geçişinin  $T_H$  sabit sıcaklığında, çevreden ısı geçişinin  $T_L$  sabit sıcaklığında olduğu iki çevrim daha vardır. Bunlardan biri Ericsson ve Stirling çevrimidir. Ericsson çevrimi, Stirling çevrimine benzerdir. Stirling çevriminde yer alan sabit hacimde ısı geçişleri, bu çevrimde sabit basınçta gerçekleşir [20]. Ericsson çevriminin, T-S ve P-V diyagramları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Ericsson çevriminde Şekil 3.3'deki 1-2 aralığı izotermal (Sabit sıcaklık) sıkıştırmayı (sistemden dış ortama ısı geçişi), 2-3 aralığı sabit basınçta rejenerasyonu (rejeneratörden aracı akışkana sistem içi ısı transferi), 3-4 izotermal (Sabit sıcaklık) genişlemeyi (sisteme dış kaynaktan ısı geçişi) ve 4-1 aralığı sabit basınçta

rejenerasyonu (aracı akışkandan rejeneratöre sistem içi ısı geçişi) ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Ericsson çevrimi P-V ve T-S diyagramları [20]

Ericsson çevriminde sıkıştırma ve genişleme işlemi sırasıyla kompresör ve türbinde gerçekleşir. Ters akışlı bir ısı değiştiricisi rejeneratör görevini üstlenir. Sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı hiç bir noktada  $dT$  diferansiyel miktarını geçmez. Soğuk akışkanın giriş sıcaklığı, sıcak akışkanın giriş sıcaklığına eşit kabul edilir. Çevrimin ısıl verimi Eşitlik 3.2’de görülmektedir.

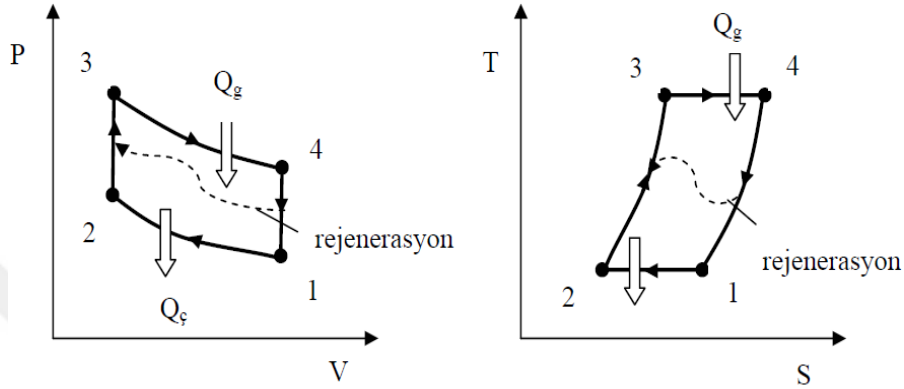
$$\eta_{th, Ericsson} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (3.2)$$

### 3.2.1.3. Stirling Çevrimi

Stirling çevrimine göre çalışan bir Stirling motor temel olarak iki pistonla oluşmaktadır. Pistonlardan bir tanesi yer değiştirme pistonu olarak adlandırılır ve görevi çevrim akışkanını sıcak ve soğuk bölge arasında nakletmektir. Diğer piston güç pistonu olarak adlandırılır ve motordaki gücü üreten pistondur. Carnot çevriminden bilindiği üzere sıcak ve soğuk ısı kaynaklarının sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça ısıl verimin arttığı bilinmektedir. Dolayısıyla bu sıcaklık farkını arttırmak için Stirling çevriminde sistem içi ısı geçişi yapılır; bu sistem içi ısı geçişine literatürde rejenerasyon denilir.

Stirling çevrimi sıcak hava motorları için ideal bir çevrimdir. Dört tünden tersinir hal değişiminden oluşan Stirling çevriminin P-V ve T-S diyagramları Şekil 3.3’te görülmektedir. Şekil 3.3’te gösterilen Stirling

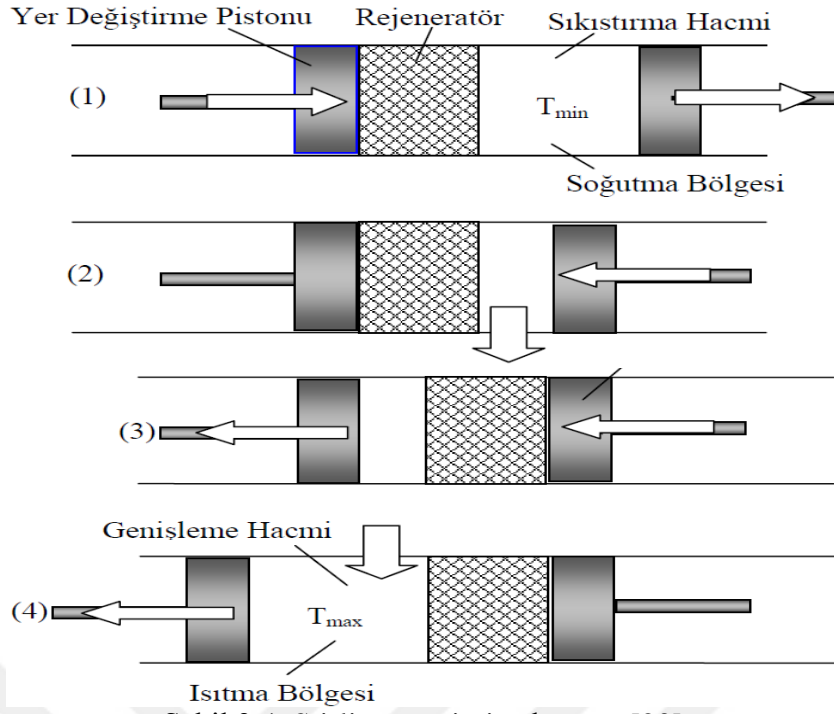
çevriminde 1-2 arası izotermal (Sabit sıcaklık) sıkıştırmayı (sistemden dış ortama ısı geçişi), 2-3 arası sabit hacimde rejenerasyonu (rejeneratörden akışkana sistem içi ısı transferi), 3-4 arası izotermal (Sabit sıcaklık) genişlemeyi (sisteme dış kaynaktan ısı geçişi) ve 4-1 aralığı sabit hacimde rejenerasyonu (akışkandan rejeneratöre sistem içi ısı geçişi) ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Stirling çevrimi P-V ve T-S diyagramı [20]

Stirling çevriminin nasıl gerçekleştiği, Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi aralarında bir rejeneratör bulunan karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki pistondan oluşan bir sistem ile anlatılmaktadır. Rejeneratör ve pistonlar arasındaki hacimlerden biri en yüksek sıcaklığa ulaşılan genişleme hacmi, diğeri en düşük sıcaklık değerinin elde edildiği sıkıştırma hacmidir.

Çevrim başlangıcında, genişleme hacmindeki pistonun rejeneratöre bitişik bir konumda üst ölü noktada, sıkıştırma bölgesindeki pistonun ise alt ölü noktada olduğu kabulü yapılmaktadır. İş akışkanının tamamı sıkıştırma hacminde bulunmaktadır. Bu konumda hacim maksimum değerine ulaştığından basınç ve sıcaklık en düşük değere sahip olmaktadır. Sıkıştırma süresince (1-2 hal değişimi), sıkıştırma pistonu üst ölü noktaya doğru hareket ederken, genişleme hacmindeki piston sabit kalarak, konum değiştirmemektedir. İş akışkanının sıkıştırma hacminde sıkıştırılması, basıncın artmasına neden olmaktadır. Bu esnada yapılan soğutmanın etkisi ile sıcaklık sabit kalmaktadır [20].



Şekil 3.4. Stirling çevrimi çalışması [20]

2-3 hal değişiminde, sıkıştırma pistonu rejeneratöre doğru ilerlemesi, genişleme pistonu rejeneratörden uzaklaşması ile iki piston eş zamanlı olarak hareket etmektedir.

Bu esnada çalışma akışkanı rejeneratörden geçerek, sıkıştırma hacminden genişleme hacmine dolmaktadır. Bu geçiş esnasında rejeneratörde depolanan ısı, iş akışkanına transfer edilerek, iş akışkanının sıcaklık değeri en düşük değerden en yüksek değere ulaşmaktadır. Sabit hacimde sıcaklığın artması, basıncında artmasına neden olmaktadır.

3-4 hal değişiminde, genişleme pistonu rejeneratörden uzaklaşarak hareketine devam etmektedir. Bu esnada sıkıştırma pistonu rejeneratör ile bitişik bir durumdadır. Genişleme işleminde, artan hacmin etkisi ile basınç düşmektedir. Dış kaynaklardan sisteme transfer edilen ısı etkisi ile sıcaklık sabit değerde seyretmektedir.

Çevrimdeki son işlem olan 4-1 işleminde, iki piston, sabit hacimde çalışma akışkanının rejeneratörden geçerek, genişleme hacminden sıkıştırma hacmine dolması için iki piston eş zamanlı olarak hareket etmektedir. Rejeneratörden geçiş esnasında ısı, çalışma akışkandan rejeneratöre transfer edilmektedir. Böylece çalışma akışkanının sıcaklığı azalmakta ve minimum

sıcaklık değerindeki akışkan sıkıştırma hacmine dolmaktadır. Bu işlem esnasında rejeneratörde depolanan ısı, bir sonraki çevrimin 2-3 hal değişiminde çalışma akışkanına transfer edilecektir.

Sıcaklık limitleri eşit ise bu üç ideal çevrim yönteminin (Carnot, Ericsson, Stirling) termik verimleri birbirine eşit olup, bu durum Eşitlik 3.3'te görölmektedir.

$$\eta_{th,Stirling} = \eta_{th,Ericsson} = \eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_{Min}}{T_{Max}} \quad (3.3)$$

### 3.2.2. Stirling Motorlarda Mekanik Prensipler

Stirling motorlar tiplerine göre geçmişten günümüze birçok farklı tipte üretilmişlerdir. Tüm Stirling motorlar için çalışma mantığı benzerdir. Ancak tasarımsal olarak sızdırmazlık sorunu, ölü hacim alanının büyüklüğü gibi benzeri problemler karşısında çözüm üretebilmek amacıyla çeşitli mekanik tasarıma sahip motorlar üretilmiştir.

Stirling motorlar mekanik açıdan Tek etkili ve Çift etkili Stirling motorlar şeklinde sınıflandırılmaktadır.

#### 3.2.2.1. Tek Etkili Stirling Motorlar

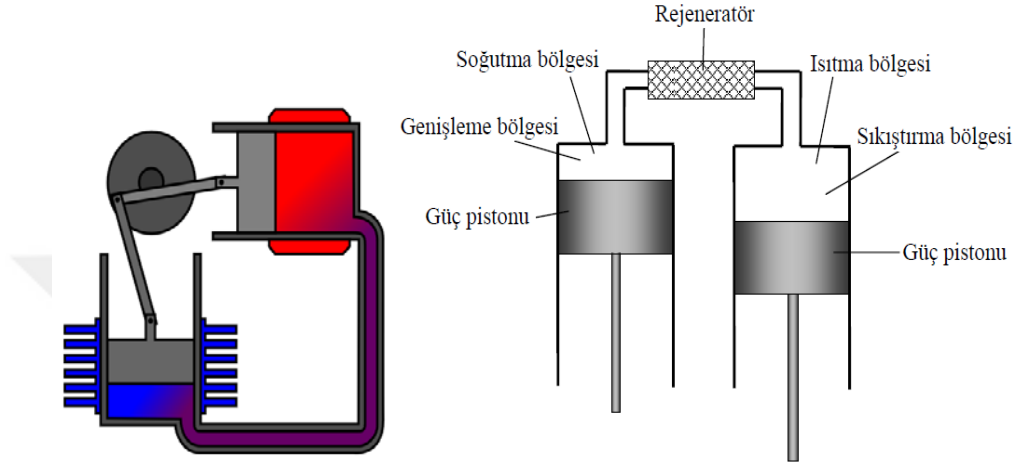
Stirling motorlarda, motor içindeki basınç pistonun tek yönüne etki ettiğinden dolayı bu motorlar tek etkili olarak adlandırılmıştır. Tek etkili Stirling motorlar sıkıştırma, genişleme ve rejeneratörden oluşurlar. Silindir içinde çalışan elemanların her ikisi de piston olabileceği gibi, bir piston bir de yerdeğiştirme pistonu olabilmektedir. Krank mekanizmalı veya ayrı bir hareket mekanizması da kullanılabilir [34].

Tek etkili Stirling motorları üç grupta toplamak mümkündür. Bunlar alfa, beta ve gama tipleridir.

- Alfa tipi Stirling motorlar

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi bu motor iki ayrı güç pistonuna sahiptir. Pistonlardan ilki sıcak taraftaki silindirin içinde, diğer piston ise soğuk silindirin içinde çalışmaktadır. İki silindir arası bağlantıya seri bağlı

rejeneratörle gerçekleştirilmektedir. Sıcak silindirle soğuk silindir farklı bölgelerde olduğundan termal geçiş yani ısı tranferi yaşanmamaktadır. Alfa Stirling motorunun üstünlüğü yüksek güç/hacim oranlarına sahip olmasıdır. Alfa Stirling motorunun dezavantajı ise ısıtılan piston tarafında sızdırmazlık sorununun görülmesiyle ve ölü hacmin fazla oluşu nedeniyle güç kayıplarının meydana gelmesidir.



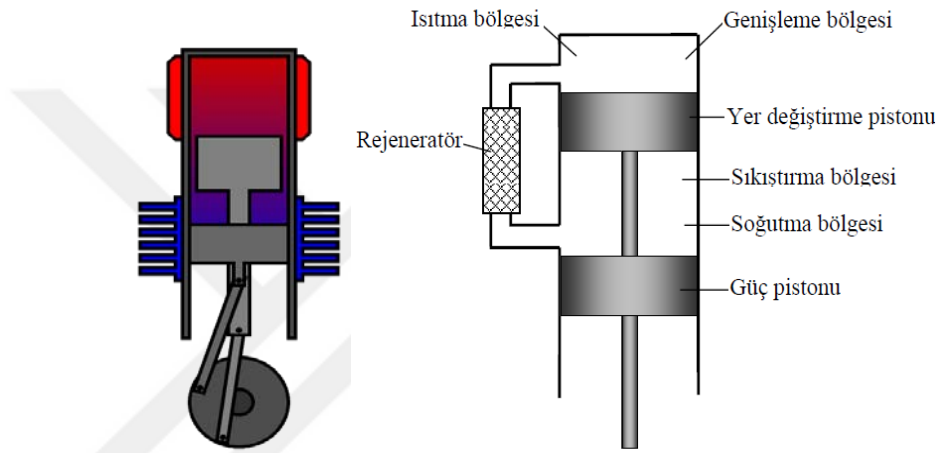
Şekil 3.5. Alfa tipi Stirling motor [20,35]

Alfa Stirling motoru sızdırmazlık problemi nedeniyle düşük sıcaklıklarda çalışmak zorundadır. Bu nedenle buzdolabı ve ısı pompası gibi sistemlerde kullanılmaktadır.

- Beta tipi Stirling motorlar

Beta tipi Stirling motorlar bir silindir içinde bulunan, birbirleriyle eş zamanlı çalışan bir yerdeğiştirme ve güç pistonundan oluşur. Yerdeğiştirme pistonu çalışma akışkanı olan gazların hareketini sağlar. Yani sıcak çalışma akışkanını soğuması için iterek ısıtma noktasından uzaklaştırır. Beta tipi Stirling motorlarda displacer, yerdeğiştirme pistonu veya silindir olarak tanımlanan bölmenin bir ucu ısıtılırken, diğer ucu soğutulur. Isıtma ve soğutma işlemleri, silindir çeperinden yapılmaktadır. Silindirin bir ucu ısıtılırken diğer ucunun soğutulması sağlanır ki; bu şekilde ısı farkıyla daha yüksek güç üretimi sağlanabilir. Bu amaçla silindirdeki sıcak ve soğuk uçlar arasında ısıl etkileşimi azaltacak yalıtım gibi bazı yöntemlere başvurulabilir. Beta tipi Stirling motor sisteminin en önemli avantajı pistonların birbirini desteklemesiyle yüksek sıkıştırma yani itme gücüne ulaşılabilmesidir.

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, beta tipi Stirling motorda silindir hacmi yerdeğiştirme pistonuyla iki ayrı hacimden oluşmaktadır. Yerdeğiştirme pistonu üzerinde bulunan hacimsel alandaki gazlar ısıtma işlemine tabi tutularak gazın genleşmesi sağlanır. Yerdeğiştirme pistonuyla güç pistonu arasındaki hacimsel sıkıştırmanın olduğu hacimsel alanı belirtir. Burada da çalışma akışkanı olarak kullanılan herhangi bir gaz türü soğutmaya tabi tutulur. Isıtma ve soğutma bölmelerinde Stirling motor çalıştığı sürece ısıtma ve soğutma kesintisiz devam etmektedir [15]. Şekil 3.6’da beta tipi Stirling motor prototipi ve displacer bloğu gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Beta tipi Stirling motor prototipi ve displacer bloğu [20,35]

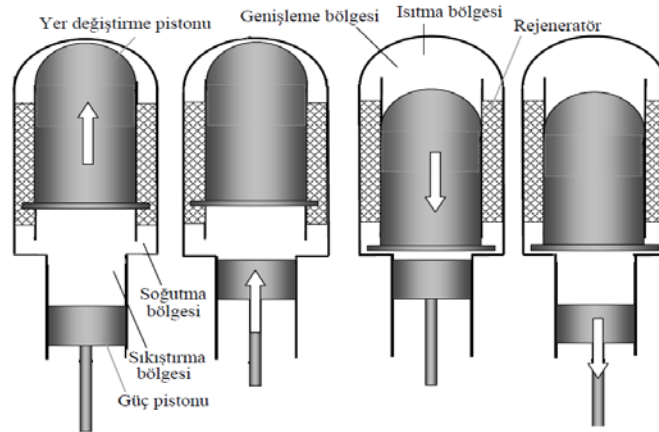
Şekil 3.8’de görüldüğü gibi 1-2 başlangıç sıkıştırma evresinde, çalışma akışkanının büyük bir kısmı soğuk bölgededir. Güç pistonu ilk hareket ettirildiğinde itme kuvvetinin etkisiyle, akışkan soğuk bölgede sıkıştırılmaktadır.

2-3 sabit hacimde ısıtma işleminde, sıkışma sonunda basınç artışının etkisiyle soğuk bölgedeki gaz, rejeneratör kanalından geçerek sıcak bölgeyi doldurmaktadır. Bu geçişte rejeneratörden çalışma akışkanına ısı transferi meydana gelir. Burada sıcaklığı artan çalışma akışkanı, genişerek yer değiştirme pistonunun alt uca doğru ilerlemesine neden olmaktadır. Bu esnada güç pistonu üst uçta olduğundan soğuk bölgedeki gaz, sıkışmaya devam etmektedir. Anlık olarak yer değiştirme pistonu alt uçta iken güç pistonu üst uçta bulunmaktadır. Bu çok kısa zaman diliminde iş akışkanının hemen hemen tamamı sıcak bölgede yer almaktadır. Bu evrede sadece yer

değiştirme pistonu hareket ettiğinden silindir içinde hacim değişikliği olmamaktadır.

3-4 genişleme işleminde, soğuk bölgede oluşan basınç kuvveti etkisi ile güç pistonu üst uçtan alt uca doğru hareket etmektedir. Genişleme evresinde hacim arttığı için basınç azalmaktadır.

4-1 sabit hacimde soğutma evresinde, yay kuvvetlerinin etkisi ile hareket pistonunun, alt konumundan üst uç konumuna doğru hareketi sonucunda, sıcak bölgeyi dolduran gazlar rejeneratör kanalından geçerek soğuk hacme dolmaktadır. Rejeneratörden geçiş esnasında ısı, çalışma akışkanından rejeneratöre transfer edilmektedir. Rejeneratöre verilen ısı, bir sonraki çevrimin 2-3 süreci sırasında iş akışkanına transfer edilmektedir. Yer değiştirme pistonu üst uca ulaştığında, çalışma akışkanının hemen hemen tamamı soğuk bölgede yer almaktadır. İşlem süresince sadece hareket pistonu yer değiştirdiğinden silindir hacmi değişmemekte ve soğutma sabit hacimde gerçekleşmektedir. Diğer motorlarda da olduğu gibi motorun çalışması için ilk hareket dışarıdan verilmektedir. Şekil 3.7’de beta tipi Stirling motor hareket aşamaları görülmektedir.



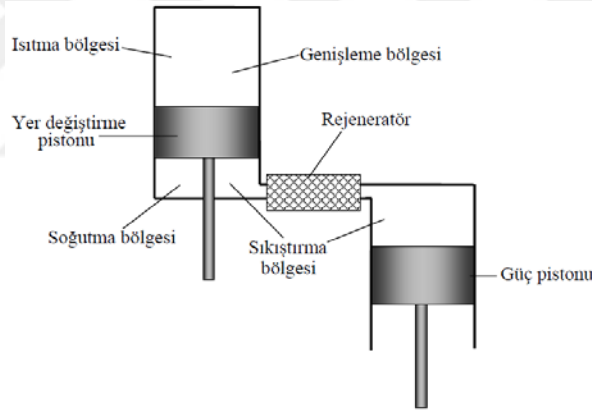
Şekil 3.7. Beta tipi Stirling motor hareket aşamaları [20]

- Gama Tipi Stirling Motorlar

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi gama tipi Stirling motorlar, beta motoruna benzer şekilde bir yer değiştirme ve bir güç pistonu mekanizmasına sahiptir. Beta tip Stirling motordan farklı olarak pistonlar birbirleriyle eş merkezli değildir. Silindirler birbirleriyle paralel şekilde

çalışırlar. Bu tasarım ölü hacmi en dip seviyeye çekecek şekilde tasarlanmıştır. İlk silindir, çalışma hacmini azaltıp artırırken, çalışma akışkanını sıkıştırıp, genişletir. Diğer silindir ise yerdeğiştirme pistonuyla çalışma akışkanını soğutup, ısıtır. Gama tipi Stirling motor tasarımının avantajlı yönü mekanik dizayn olarak basit yapıda olmasıdır. Bu motorun dezavantajı ise düşük sıkıştırma oranlarına sahiptir.

Gama tipi Stirling motorun çalışmasında bir yer değiştiriciye ve bir pistonu ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma akışkanı Gama tipi Stirling motorun yerdeğiştirme pistonu içinde sabit hacimde ısıtılıp soğutulur. Bu şekilde güç silindirinde çalışma akışkanının bulunduğu toplam hacimsel alan daralır. Bunun etkisiyle güç silindirinde bulunan sıcak gaz, yer değiştirme silindirinin soğuk bölgesine geçer. Dönüş periyodu tamamlandığında çalışma akışkanının çoğu yer değiştirme silindirinin soğuk bölgesinde yer alır. Bu işlem süresince çalışma akışkanının hacmi sabit kalır.



Şekil 3.8. Gama tipi Stirling motor [20]

### 3.2.2.2. Çift Etkili Stirling Motorlar

Stirling motorlarda motor içindeki basınç, pistonun her iki yönüne de etki ettiğinden, bu motorlar çift etkili olarak adlandırılmıştır. Çift etkili Stirling motorlarda silindir sayısı motor sayısına eşittir. Çift etkili Stirling motorlarda da birçok tasarım mevcuttur. Bu tip Stirling motorlarda silindirin genişleme hacmi ile diğer silindirlerin sıkıştırma hacmi arasında rejeneratör yerleştirilmiştir. Çift etkili motorların en büyük avantajı, tek etkili Stirling motorlara göre daha az parça sayısına sahip olmalarıdır [20, 34].

- Çift etkili Franchot Stirling motoru

Şekil 3.10'da çift etkili Franchot Stirling motorun prensip şeması görülmektedir. İki piston dört ayrı bölgeyle sınırlanmaktadır. Bu durum için iki ayrı alfa makinesi çalışıyormuş gibi düşünülebilir. Alfa makinesinde olduğu gibi genişleme ve sıkıştırma pistonları arasında yaklaşık 90°'lik bir faz açısı gereklidir. Sıcak tarafta çalışan piston çubuğunun sızdırmazlığı bu motorda sorun teşkil etmektedir.

- Çift etkili Siemens Stirling motoru

1863 yılında Sir William Siemens tarafından dizaynı yapılan motor 1940'ta Weenan tarafından tekrar geliştirilmiştir. Günümüz yüksek performanslı Stirling motor prensipleri Weenan yaklaşımına dayanmaktadır.

Pistonun sadece bir tarafında sıkıştırma bölgesi bulunmaktadır. Soğuk odası olarak anılan sıkıştırma bölgesi sızdırmazlığın düşük sıcaklıkta olmasını sağlamaktadır. Siemens Stirling motor çift etkili olup, diğer Stirling motorlara göre avantajı sızdırmazlığın soğuk bölgede oluşmasını sağlayan birleştirme özelliğine sahip olmasıdır. Bu sayede Siemens Stirling motorla yüksek güçlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Çift etkili Siemens Stirling motor incelendiğinde aslında bu motorun alfa tipi Stirling motorların birleşiminden meydana geldiği görülmektedir.

- Serbest pistonlu Stirling motor

Bu tip motorlarda güç pistonunun, yerdeğiştirici pistonla ve diğer metal aksamla herhangi bir mekanik bağlantısı bulunmamaktadır. Pistonlar serbest hareket ederek, dönüştürülen enerji bir rejeneratör yardımı ile (elektrik enerjisiyle), bir ısı değiştiricisiyle (ısı iletimiyle) veya daha farklı metotlarla iletilebilir. Prensipde tüm Stirling motorlar serbest pistonlu motora dönüştürülebilir. Düşük sıcaklık değişimleriyle basınç değişimleri oluşarak serbest pistonlu Stirling motorda titreşim oluşarak pistonda hareketlenme olur.

- Sıvı pistonlu Stirling motor

Cam tüpten imal edilmiş bir sistemin üst kısmında hava ve su buharı karışımı bulunmaktadır. Cam tüpten imal edilen bu sistemin sol tarafında hava ısıtılırken sağ tarafındaysa soğutma işlemi yapılmaktadır. Makina harici bir kaynakla ısıtılarak sıvı akışkanın hareketi sağlanmaktadır. Bu esnada sıcak bölme ile soğuk bölme arasındaki hava bağlantı borusu üzerinden hava sıcak silindire doğru çekilmektedir. Sıcak silindir içinde ısınan hava ise tüm sistemdeki basıncı arttırmaktadır. Basınç artışı ise güç pistonunu aşağıya doğru hareketlendirir. Bu çevrimin tamamlanması için yerdeğiştiricinin itme etkisi ile suyun soğuk bölmeden sıcak bölmeye doğru akışı devam eder. Böylelikle havanın soğuk silindirde soğutulmasıyla sistem basıncı azalır. Oluşan basınç düşüşünü dengelemek amacıyla güç pistonu kendiliğinden geriye hareket ederek çalışmaya devam eder. Eğer ısıtma işlemi devam ederse ve enerji çekilmezse salınım hareketi hızlanıp devam eder.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Beta Tipi Stirling Motorun Matematiksel Modeli

Beta tipi Stirling motorun çevrim boyunca genişleme ve sıkıştırma hacimlerinin değişimini gösteren bağıntılar Shmidt'in denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplama yapılan kabullerle işlem karmaşıklığı önlenmiştir. Teorik modellemede;

1. Çevrim adiabatic kabul edilmiş,
2. Motor çeperlerinden dış ortama aktarılan ısı kayıpları ihmal edilmiş,
3. İş gazı ideal gaz denklemine göre  $PV = M RT$  kabul edilmiş,
4. Akışkan maddenin ve rejeneratörün özgül ısısının değişmediği yani ısının sabit kaldığı varsayılmış,
5. Isıtma, soğutma ve rejeneratif süreçlerdeki basınç kayıpları ihmal edilmiş,
6. Rejeneratörde doğrusal sıcaklık dağılımı gerçekleştiği

kabul edilmiştir. Matematiksel modelde, Şekil 4.1'de verilen Stirling motor genişleme ve sıkıştırma işleminin her biri için kütle ve enerjinin korunumu yasaları kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Çalışma akışkanı ile rejeneratör duvarları arasındaki sıcaklık farkı 1 ve 2 konumları arasında iş gazındaki sıcaklık artışının yarısına eşittir. Çalışma akışkanının sızdırmazlığı ihmal edildiğinden akışkanın toplam kütlesi değişmemiş, dolayısıyla ideal gaz denklemleri ile hesaplama yapılmıştır. Enerjinin korunumu genişleme süreci için Eşitlik 4.1'de ve sıkıştırma süreci ise Eşitlik 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'de Stirling motor genişleme ve sıkıştırma işlemi gösterilmiştir.

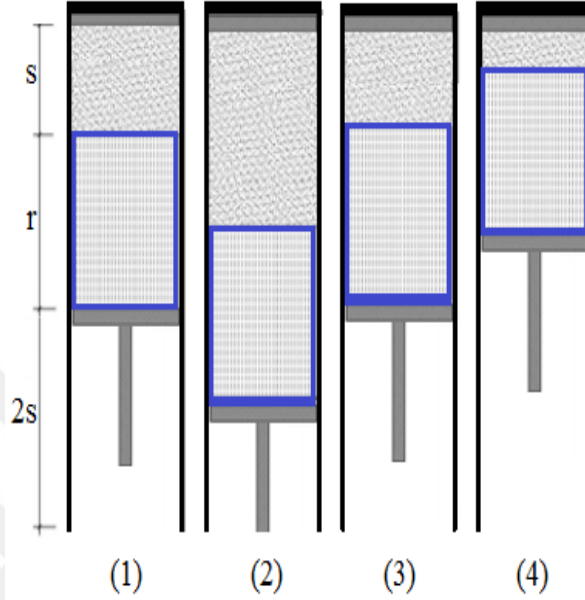
$$\frac{(Q_{hi} - Q_{rh})}{f_r} - W_{ei} = M_{c_p} \Delta T_i \quad (4.1)$$

$$\frac{(\varepsilon_r Q_{rh} - Q_{ci})}{f_r} + W_{ci} = M_{c_p} \Delta T_i \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.3'te,  $W_{ei}$  genişleme sürecindeki faydalı işi ve Eşitlik 4.4'te  $W_{ci}$  sıkıştırma sürecinde kayıp işi ifade etmektedir.

$$W_{ei} = M R T_h I_n \left( \frac{V_e}{V_c} \right) \quad (4.3)$$

$$W_{ci} = M R T_c I_n \left( \frac{V_e}{V_c} \right) \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. Stirling motor genişleme ve sıkıştırma işlemi

Eşitlik 4.5'te  $Q_{hi}$ , sıcak dış yüzey ile iş gazı arasındaki ısı transferini matematiksel olarak ifade etmektedir. Çevrimin adiabatik olması nedeniyle dış yüzeyin ısıtma gücü güneş ışınımına eşit olarak alınabilir.

$$Q_{hi} = h_h A_h (T_H - T_{hi}) = \tau_{cam} \alpha_i Q_{solar} \quad (4.5)$$

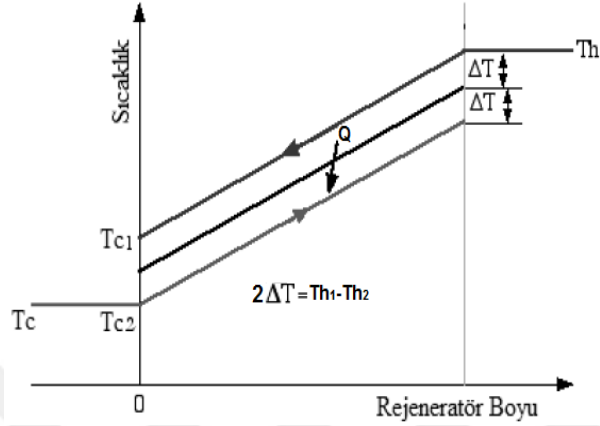
Eşitlik 4.6'da  $Q_{ci}$  ise sıkıştırma esnasında iş gazından çekilen ısının matematiksel olarak ifade edilmiş halidir.

$$Q_{ci} = U_c A_c (T_{ci} - T_a) \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2'deki  $Q_{rh}$ , Şekil 4.1'de görülen Stirling motora ait 2 ve 3 konumları arasındaki işlemi göstermektedir. Bu işlem ısınan çalışma akışkanından rejeneratör çeperine geçen ısıyı sayısal olarak ifade etmektedir. Şekil 4.1'de görülen Stirling motor çalışmasında 4-1 konumları arasında ise rejeneratöre verilen ve geri taşınan ısı, Şekil 4.2'de 2-3 ve 1-4 konumları arasındaki rejeneratör boyunca gerçekleşen sıcaklık değişimleri

verilmiştir. Rejeneratör yüzeyleri ile soğutucu akışkan arasındaki ısı transferi Eşitlik 4.7’de görülmektedir.

$$Q_{rh} = h_r A_r \left( \frac{\Delta T_h}{2} \right) \quad (4.7)$$



Şekil 4.2. Rejeneratörde sıcaklık dağılımı

Rejeneratörün etkinliği ısı kapasiteleri aynı olan akışkanlar için (hava gazı gibi) Eşitlik 4.8’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{rh} = \frac{1 + NTU}{NTU} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8’de NTU ısı transfer birimi olup, Eşitlik 4.9 ile hesaplanmaktadır.

$$NTU = \frac{h_r A_r}{m c_p} \quad (4.9)$$

$f_r$ , motorun çalışma frekansı olmak üzere Eşitlik 4.10’da akışkanın kütleli debisi  $m$ , genleşme ve sıkıştırma sonu hacimleri arasındaki fark ile (süpürme hacmi), çalışma frekansı ve iş gazı yoğunluğunun çarpılmasıyla elde edilir.

$$m = \rho_i f_r (V_e - V_c) \quad (4.10)$$

Çevrimin termodinamik verimi ise Eşitlik 4.11’de verilmiştir.

$$\eta_t = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \quad (4.11)$$

## 4.2. Stirling Motor Simülasyon Çalışmaları

Sürdürülebilir gelişme için güneş vb. yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmiş enerjinin kullanımı gereklidir. Bu çalışmada ısıtma kaynağı güneş olan, beta tip krank hareket mekanizmasına sahip Stirling motorunun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu sayede Stirling motor için güç, çalışma frekansı, sıcaklık değerleri, basınç ve elektriksel verim gibi performansı belirleyen parametreler hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Kullanılan çalışma gazına göre sıcaklığın ve basıncın değişimi vb. parametreler izlenebilmektedir.

### 4.2.1. Stirling Motor Karakteristik Simülasyonu

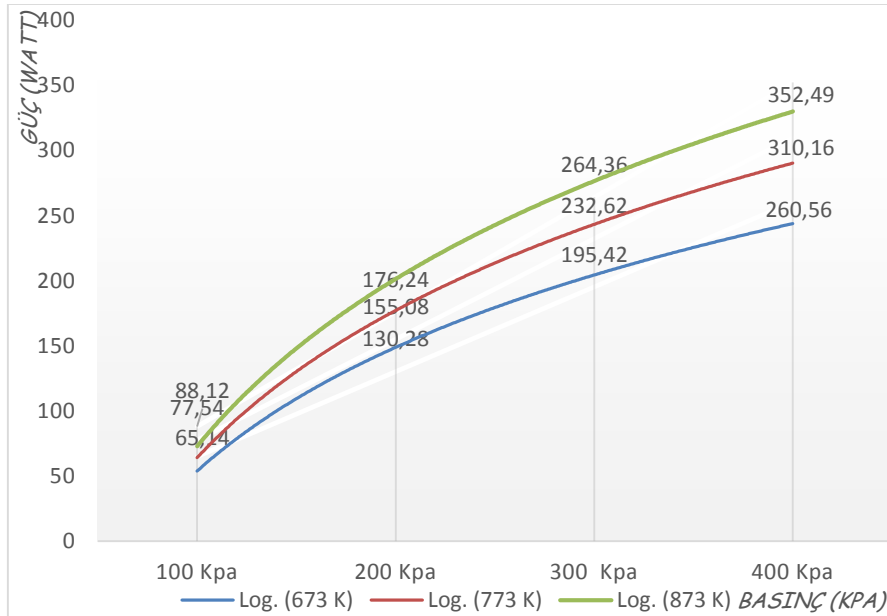
Bu çalışmada Stirling motorlarda sıcaklık, basınç, frekans ve displacer çıkış ucu (soğuk uç) sıcaklığı parametrelerine göre elektriksel gücün değişimi analiz edilmiştir. Yapılan performans testinde, düşük güçlü beta tipi bir Stirling motorun performans karakteristikleri iş gazının hava gazı olması durumu için belirlenmiş, sonuçlar grafikler halinde sunularak karşılaştırılmıştır. Güneşin termal özelliği kullanılarak ısınan bir Stirling motorun simülasyon ortamındaki performans testleri 673°K, 773°K ve 873°K ısıtıcı sıcaklıkları için gerçekleştirilmiştir. Şarj basıncı her bir test aşamasında 100 KPa'dan(1 atm bar) 400 KPa'ya (4 Atm bar) kadar 100 KPa aralıklarla değiştirilmiştir. Krank mili frekansı 10, 30, 50 ve 60 Hz alınarak maksimum güç ölçülmüş, ayrıca displacer ısıtma borusunun sıcak ucu ile soğuk uç arasındaki ısı farkının artırılmasıyla üretilen elektriksel gücün verim artışı sağladığı görülmüştür.

Stirling motor için çalışma gazı olarak Hava kullanılmıştır. Ideal Adiabatic Simulation of Stirling Engines v.1.x programı kullanılarak çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı simülasyonda Stirling parametrelerine yönelik yapılan veri girişlerine ait bilgiler Tablo 4.1'de verilmiştir [36]. Tablo 4.1'de 4 farklı değerdeki basınç için, 3 farklı soğuk uç sıcaklığında ve krank miline yönelik 4 farklı veri girişi yapılmıştır. Giriş kaynak sıcaklığı, basınç, soğuk uç sıcaklığı ve krank milinin dönüş hızına göre elektriksel güç ve verim analizi yapılmıştır.

Tablo 4.1. Simülasyon programında kullanılan giriş verileri

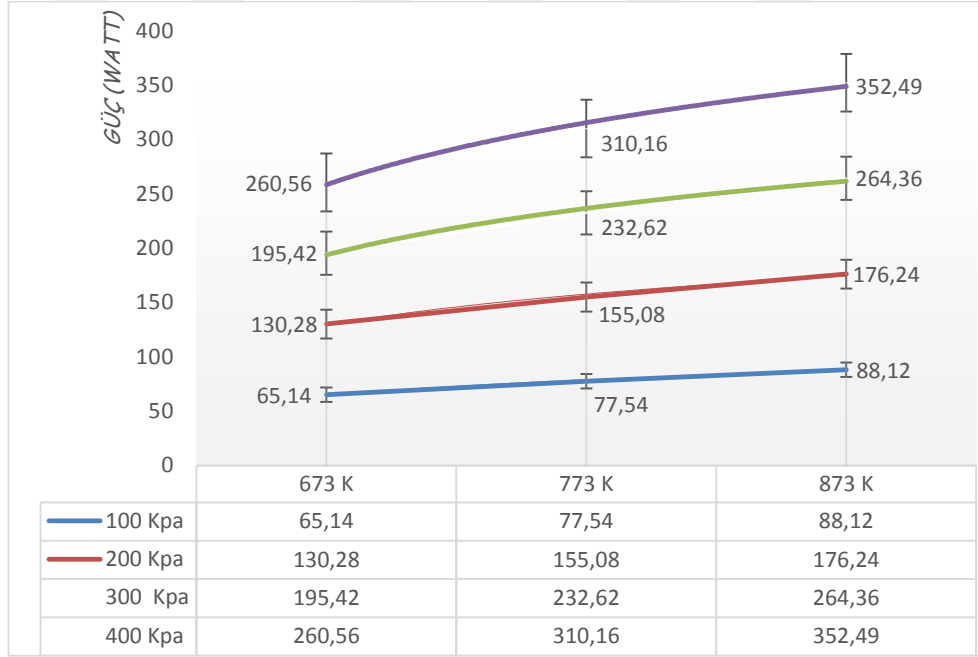
Çalışma gazı		Hava
Ortalama basınç	<i>yüzey</i>	100 / 200 / 300 / 400 kPa
Isıtıcı sıcaklığı	<i>Th</i>	673°K / 773°K / 873°K
Soğuk uç sıcaklığı	<i>Tk</i>	300°K / 400°K / 500°K
Sıkıştırma hacmi	<i>Vclc</i>	8 cm <sup>3</sup>
Genişleme hacmi	<i>Vswc</i>	61,045 cm <sup>3</sup>
Soğuk uç hacmi	<i>Vk</i>	31,2101 cm <sup>3</sup>
Rejeneratör hacmi	<i>Vr</i>	34,8885 cm <sup>3</sup>
Isıtıcı hacmi	<i>Vh</i>	28,5093 cm <sup>3</sup>
Isıtıcı genişleme hacmi	<i>Vswe</i>	61,045 cm <sup>3</sup>
Isıtıcı sıkıştırma hacmi	<i>Vcle</i>	10 cm <sup>3</sup>
Krank mili frekansı	<i>freq</i>	10 / 30 / 50 / 60 1/sec

Üretilen gücün, 673°K (400°C), 773°K (500°C) ve 873°K (600°C) ısıtıcı sıcaklıklarında, 100, 200, 300 ve 400 kPa basınç altında analizi yapılmıştır. Bu şartlar altında elektriksel gücün, ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncının artışıyla doğru orantılı olarak belli bir seviyeye kadar arttığı görülmektedir. 873°K (600°C)'de 400 kPa'da en yüksek güç değerlerine 352.49 W üretimle ulaşılmıştır. Şekil 4.3'te güç basınç ilişkisi gösterilmiştir.



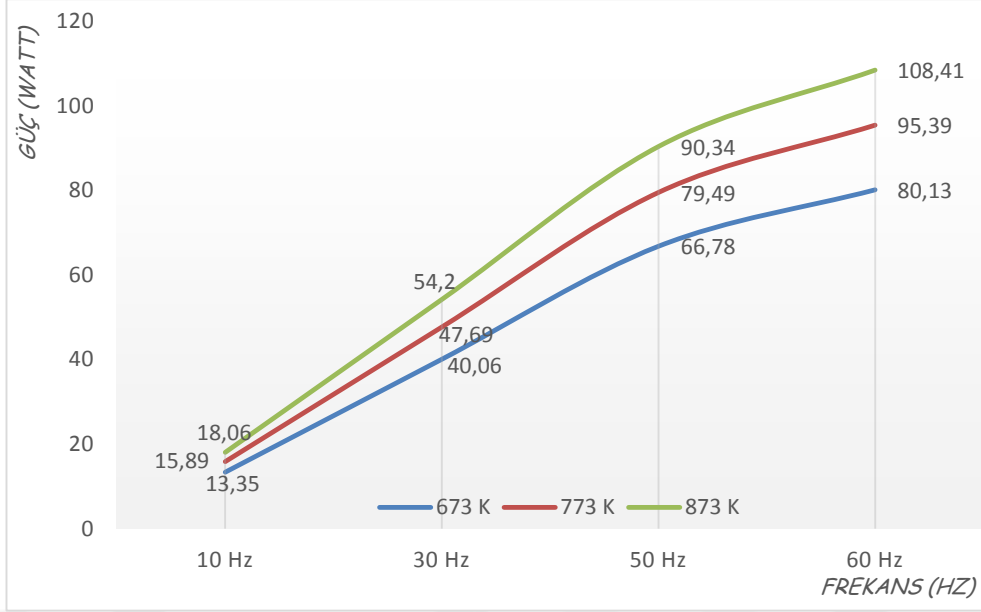
Şekil 4.3. Stirling motorlarda güç basınç ilişkisi

673°K (400°C), 773°K (500°C) ve 873°K (600°C) ısıtıcı sıcaklıklarında, 100, 200, 300 ve 400 kPa basınç koşullarında Stirling motorun çalıştırılmasıyla yapılan performans testlerinde en yüksek güç değerlerine 873°K (600°C)'de 400 kPa'da 352.49 W ulaşılmıştır. Basınç ve sıcaklık değerlerinin belli bir değere kadar doğrusal olarak yükseldiği, daha yüksek basınç ve sıcaklık değerlerinde ise displacer'in hareket pistonu içindeki yüzeye sürtünme oranının artması, gerek havanın gerekse displacer ısı iletim kapasitesinin sınırlı oluşu ve ısı kayıplarının artması nedeniyle verim artışının azalan yönde değiştiği görülmüştür. Toplamda ise verimlilik artışı devam etmektedir. Verim artışı bir eşik noktasından sonra durağanlaşmaktadır. Şekil 4.4'te Stirling motorlarda elektriksel gücün sıcaklık ve basınç ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Stirling motorlarda elektriksel gücün sıcaklık ve basınç ilişkisi

673°K, 773°K ve 873°K ısıtıcı sıcaklıklarında, 10, 30, 50 ve 60 Hz frekansta Stirling motorun çalıştırılmasıyla yapılan performans testlerinde en yüksek güç değerlerine 873°K (600°C)'de 60 Hz'de 108.41 W'a ulaşılmıştır. Sıcaklık değerlerinin ve frekansın 50 Hz'e kadar doğrusal olarak yükseldiği, daha yüksek frekans değerlerinde yani 60 Hz'de sürtünme nedeniyle elektriksel güç artış hızının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.5'te Stirling motorlarda elektriksel güç ve frekans ilişkisi gösterilmiştir.



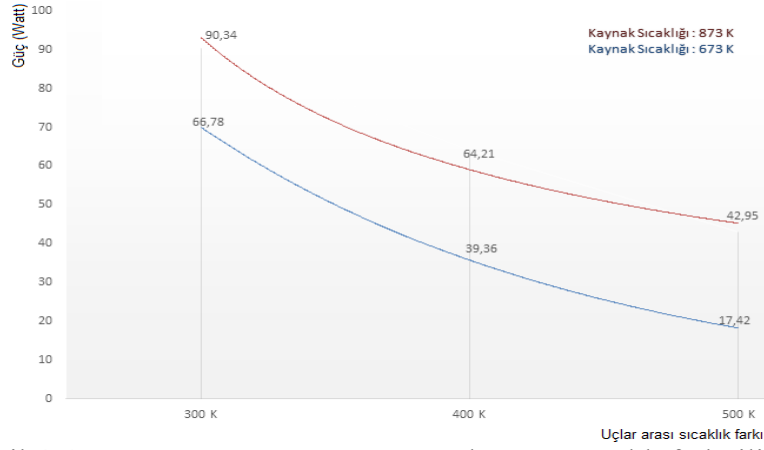
Şekil 4.5. Stirling motorlarda elektriksel güç ve frekans ilişkisi

Şekil 4.6’da Stirling motorlarda elektriksel güç ile soğuk uç sıcaklığı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buna göre displacerin soğuk ucuyla ısıtılan ucu (ısı kaynağı ucu) arasındaki sıcaklık farkı  $300^{\circ}\text{K}$  iken en düşük elektriksel güç üretilmişken, uçlar arası sıcaklık farkı  $500^{\circ}\text{K}$  iken ise en yüksek elektriksel güç değerlerine ulaşılmıştır. Bu işlem iki kez uygulanmış yani  $673^{\circ}\text{K}$  giriş sıcaklığı ve  $873^{\circ}\text{K}$  giriş sıcaklığında ısı farkının artırılmasıyla elektriksel verimin arttığı gözlenmiştir.

Kaynak sıcaklığı  $673^{\circ}\text{K}$  iken;

- i. Soğuk uç sıcaklığı  $300^{\circ}\text{K}$  (bu sırada displacer uçları arası ısı farkı  $373^{\circ}\text{K}$ ) iken  $66.78\text{ W}$ ,
- ii. Soğuk uç sıcaklığı  $400^{\circ}\text{K}$  (bu sırada displacer uçları arası ısı farkı  $273^{\circ}\text{K}$ ) iken  $39.36\text{ W}$ ,
- iii. Soğuk uç sıcaklığı  $500^{\circ}\text{K}$  (bu sırada displacer uçları arası ısı farkı  $173^{\circ}\text{K}$ ) iken  $17.42\text{ W}$

enerji üretilmiştir.



Şekil 4.6. Stirling motorlarda güç ile uçlar arası sıcaklık farkı ilişkisi

Displacerin soğuk ucundaki sıcaklık değeri  $300^{\circ}\text{K}$ ,  $400^{\circ}\text{K}$  ve  $500^{\circ}\text{K}$  iken Stirling motorun çalıştırılmasıyla yapılan performans testinde en yüksek güç değerine  $90.34\text{ W}$  displacer kaynak uç sıcaklığı  $873^{\circ}\text{K}$  ( $600^{\circ}\text{C}$ ) iken ve soğuk uç sıcaklığının  $300^{\circ}\text{K}$  olduğu esnada ulaşılmıştır. Bu sırada kaynak sıcaklığı  $873^{\circ}\text{K}$  ve kooler uç sıcaklığı  $300^{\circ}\text{K}$ 'dir. Yani sıcaklık farkı  $573^{\circ}\text{K}$  iken en yüksek performansa ulaşılmış ve  $90.34\text{ W}$  enerji üretilmiştir.

#### 4.2.2. Isı farkıyla Verim Artışının Sağlanması

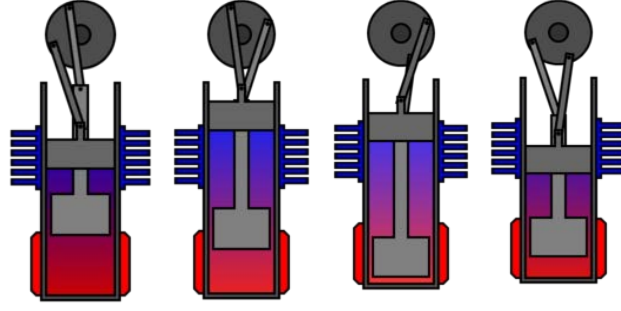
Stirling motorlarda displacer borusunun bir ucunun ısıtılmasıyla uçlar arası oluşan sıcaklık farkıyla enerji üretilmektedir. Displacer borusu içindeki güç pistonunun itme ve çekme hareketi sonucu elektrik enerjisi üretilmektedir. İtme ve çekme hareketinin hızı ise sıcak uç ve soğuk uç arasındaki ısı farkıyla ilişkilidir. Displacer borusunun bir ucu ısıtılırken başlangıçta diğer ucun sıcaklığı, ortam sıcaklığı değerlerindedir. Yani bir uç ısınırken diğer uç ısınmamış ve bu nedenle ısı farkı yüksek iken üretilen elektrik enerjisi maksimum düzeydedir. Ancak ısınan uçtan soğuk uca (kooler tarafına) kısa bir süre sonra ısı aktarımı gerçekleşerek, uçlar arası ısı farkı azalmakta, bu nedenle üretilen elektrik enerjisi minimum düzeye gerilemektedir. Enerji üretimindeki verim düşüşünü önlemek amacıyla bu çalışmada displacer borusu iki eşit parçaya ayrılarak ısınan uç Demir'den ve soğuk uç ise Zirkonyum'dan imal edilmiştir. Bu sayede soğuk ucun ısınması önlenerek elektriksel verimin artması sağlanmıştır. Zirkonyum'un madeni görünümü Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Zirkonyum madeni görünümü [37]

673 K, 773 K ve 873 K sıcaklık değerleri için ANSYS Products 13.5 programında bir simülasyon gerçekleştirilerek 50 cm uzunluğunda Demir'den imal edilen displacer borusu ve sıcaklığı üzerinde toplayıp ısınan 25 cm Demire eklenmiş 25 cm Zirkonyum'dan imal edilmiş displacer borusu için simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Demir ve Zirkonyumun birleşmesiyle oluşan yer değiştirme pistonunun soğuk uç tarafının yaklaşık %29 kadar daha az ısınmasını sağladığı tespit edilmiştir. Daha az ısınan displacer için elektriksel verim artışını görmek amacıyla Ideal Adiabatic v.1.x simülasyon programı kullanılarak üretilen elektrik miktarında %288.83-%319.28 oranında artış sağlanmıştır.

Dıştan ısı verme prensibine göre çalışan Stirling motor bir hareket mekanizması, bir ısıtıcı, bir rejeneratör, bir soğutucu, bir güç pistonu, bir piston ve motor bloğundan oluşmaktadır. Çeşidi ne olursa olsun tüm Stirling motorlar ısıtıcı, rejeneratör ve soğutucu parçalarından oluşmaktadır. Hareket mekanizmasının görevi piston ve displacer'i birbiri ile zamanlamalı olarak hareket ettirmek sureti ile termodinamik çevrimi gerçekleştirmektir. Bu çalışmada düşük sıcaklıklarda (673°K, 773°K ve 873°K) çalışan bir Stirling motor için simülasyon çalışmaları yapılarak, displacer borusu üzerindeki ısı farkı arttırıldığı takdirde düşük sıcaklıkta elektriksel verimin nasıl arttırılabileceği ıspatlanmaya çalışılmıştır. Çalışma için baz alınan Beta tipi bir Stirling motorun çalışma esnasındaki hareket aşamaları Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Beta tipi stirling motor hareket aşamaları [35]

Demir ve Zirkonyum'un özelliklerini karşılaştırmalı olarak gösteren Tablo 4.2 incelendiğinde soğuk uç tarafı için Zirkonyum'un kullanılması durumunda ek avantajlar sağlanacağı anlaşılmaktadır. Bu avantajlar [37,38];

- Demirin yoğunluğu  $7.86 \text{ g/cm}^3$  iken, Zirkonyum ise  $6.52 \text{ g/cm}^3$  yoğunluktadır. Buna göre yoğunluğu daha az olan gözenekli yapıya sahip Zirkonyum Demir'den daha fazla soğutma yapabilmektedir.

- Demirin ergime noktası  $1811^\circ\text{K}$  iken Zirkonyumun ergime noktası  $2128^\circ\text{K}$ 'dir. Bunun anlamı  $1200\text{-}1300^\circ\text{K}$  gibi yüksek sıcaklıklarda Demir fiziksel deformasyona uğrarken Zirkonyum bu sıcaklıkta fiziksel değişime uğramaz. Zirkonyum  $1700\text{-}1800^\circ\text{K}$  sıcaklıkta deformasyona uğramaktadır.

- Demirin ısı iletkenliği  $80.4 \text{ W/(m.K)}$  iken Zirkonyumun ısı iletkenliği  $22.6 \text{ W/(m.K)}$  değerindedir. Yani Zirkonyum'un ısı iletkenliği Demire göre 4 kat daha düşüktür.

- Demirin ısı iletme değeri  $11.8 \mu\text{m/(m.K)}$  ( $25^\circ\text{C}$ 'de) iken, Zirkonyumun ısı iletme değeri  $5.7 \mu\text{m/(m.K)}$  ( $25^\circ\text{C}$ 'de)'dir. Yani ısı karşısında Zirkonyum Demire göre yaklaşık iki kat daha geç genişerek fiziksel değişime uğramaktadır.

- Demirin ses iletme özelliği  $5120 \text{ m/s}$  değerlerinde iken Zirkonyum  $3800 \text{ m/s}$  değerlerindedir. Yani Zirkonyum Demir'e göre daha az gürültüyle çalışabilmektedir.

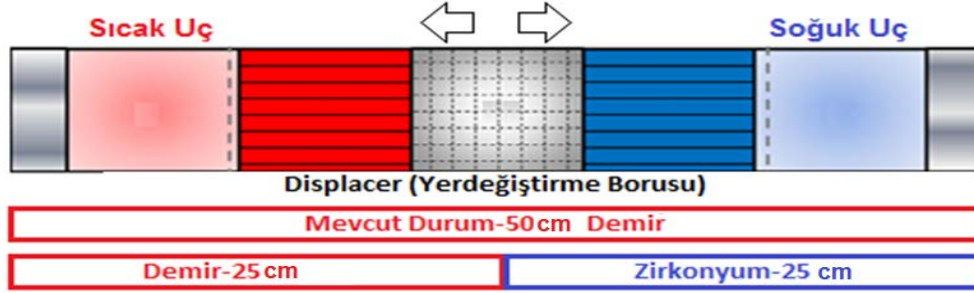
şeklinde sıralanabilir. Tüm bu özellikleri nedeniyle Stirling motorlarda soğuk uç tarafının Zirkonyum'dan imal edilmesi elektriksel verim artışı açısından daha avantajlıdır. Zirkonyum;

- Korozyona dayanıklılığı ve nötron absorblama özelliğinin az olması nedeniyle nükleer reaktörlerin yapı malzemesi olarak, nükleer reaktörlerin yanma odalarında doğrudan,
  - Uzay ve havacılık endüstrisinde ZrO<sub>2</sub> bileşiğinden imal edilen malzemeler ısıya karşı dirençli olduklarından uzay araçlarına ait parçalarda,
  - Isıya karşı yüksek direncinden dolayı yanma odaları, yüksek sıcaklıklara maruz kalan jet motor kanatları ve gaz türbin kanatlarında,
  - Zirkonyumdioksit (ZrO<sub>2</sub>) bir refrakter malzeme olarak, yüksek ısı gerektiren döküm kalıp işlemlerinde, metalurjik fırınlarda kullanılan, erime noktasının yüksek olması nedeniyle ateşe dayanıklı malzemelerin yapımında, cam ve seramik endüstrisinde,
  - Korozyona dayanıklılığı nedeniyle birçok aletin yapımında,
- kullanılmaktadır [37].

Tablo 4.2. Demir ve Zirkonyumun karşılaştırmalı özellikleri [37,38]

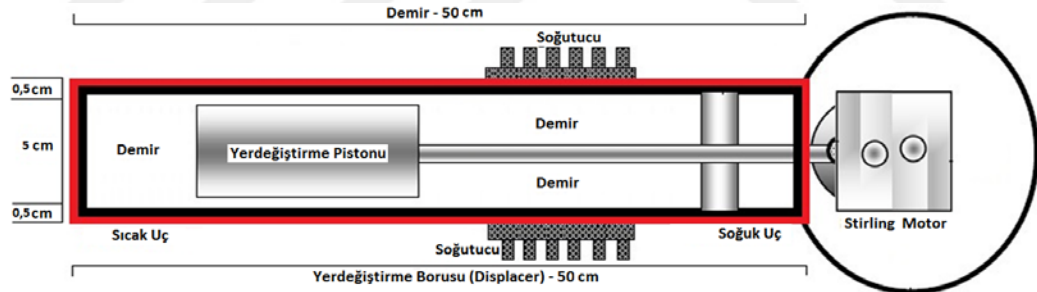
Özellikler	Demir	Zirkonyum
Maddenin hali	katı	katı
Yoğunluk	7.86 g/cm <sup>3</sup>	6.52 g/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	1811°K	2128°K
	1538°C	1855°C
Kaynama noktası	3134°K	4682°K
	2861°C	4409°C
Ergime ısısı	13.81 kJ/mol	14 kJ/mol
Buharlaştırma ısısı	340 kJ/mol	573 kJ/mol
Isı kapasitesi	25.10 J/(mol·K)	25.36 J/(mol·K)
Elektrik direnci	96.1 nΩ·m (20°C)	421 nΩ·m (20°C)
Isıl iletkenlik	80.4 W/(m·K)	22.6 W/(m·K)
Isıl genişleme	11,8 μm/(m·K)	5.7 μm/(m·K)
	(25°C'de)	(25°C'de)
Ses hızı	5120 m/s	3800 m/s

Günümüzde Stirling motorların displacer borusu tek tip malzemeden üretilmektedir. Şekil 4.9’da Stirling motora ait bir displacer blok şeması görülmektedir.



Şekil 4.9. Displacer blok şeması

Şekil 4.10’da Displacer borusu 50 cm uzunluğunda Demir’den imal edilmiş Beta tipi Stirling motor görülmektedir. Demir veya çelik gibi malzemeden imal edilen displacer borusu ısıyı emme kapasitesi açısından avantajlı olsa da ısıyı iyi ilettiği için displacer borusunun diğer ucu olan soğuk uç tarafına ısı çok kısa bir sürede ulaşmaktadır. Dolayısıyla ısının hızlı iletilmesi sıcaklık farkını azaltarak üretilen enerji miktarı olumsuz yönde etkilemektedir.

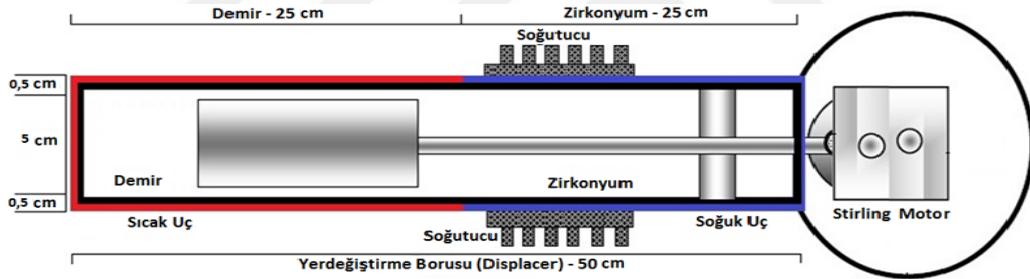


Şekil 4.10. Displacer borusu 50 cm uzunluğunda Demir’den imal edilmiş Beta tipi Stirling motor

Bu amaçla ANSYS Product 13.5 programında gerçekleştirilen simülasyonda Demirden imal edilmiş 50 cm uzunluğundaki displacer borusu ile 25 cm Demir’e eklenmiş 25 cm Zirkonyum’dan imal edilen displacer borusu ısıyı iletmesi açısından karşılaştırılmıştır [39].

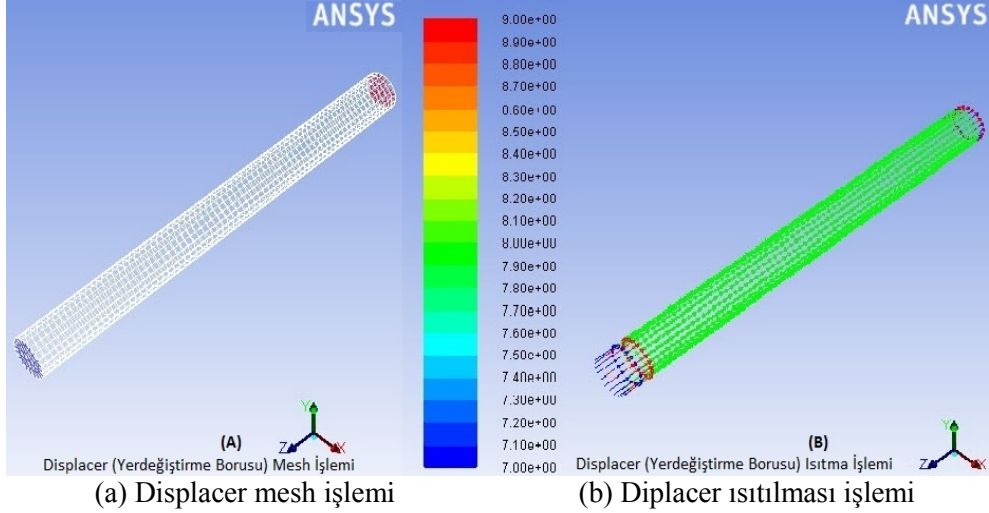
Örneğin ANSYS Product 13.5 programında gerçekleştirilen simülasyonda Demir’den imal edilmiş 50 cm uzunluğundaki displacer borusunun kaynak sıcaklığı 673°K ısıdayken kısa bir süre sonra soğuk uç sıcaklığı 535°K değerine ulaşmıştır. Yine bir diğer örnekte kaynak sıcaklığı

773°K iken soğuk uç sıcaklığı 600°K'ye ve 873°K kaynak sıcaklığında ise soğuk uç sıcaklığı 660°K'ye yükselmiştir. Tablo 4.2'den de görüleceği gibi ısı farkının az olduğu durumlarda üretilen elektriksel güçte azalma olmuştur. Displacer borusu uçları arası ısı farkı arttıkça üretilen elektriksel güçte maksimum verime yaklaşıldığı görülmektedir. Yani kaynak sıcaklığının yüksek olması fiziksel deformasyon, sürtünme katsayısının artması ve sızdırmazlık sorunları gibi teknik sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle Stirling motorlarda düşük sıcaklıklarda yüksek verimle elektrik üretimi yapılmalıdır. Yüksek verim için kaynak sıcaklığının soğuk uç tarafına geçmesi önlenmelidir. Bu amaçla displacer borusu iki farklı malzemeden üretilip ısınan uç için ısıyı üzerine toplayan bir metal olan Demir kullanılır ve soğuyan uç yani soğuk uç tarafı için ısıyı ivedi olarak üzerinden uzaklaştıran ısı iletim katsayısı daha düşük olan Zirkonyum'un kullanılması düşünülmüştür. Şekil 4.11'de Sıcak ucu 25 cm Demir ve soğuk uç tarafı 25 cm Zirkonyum'dan imal Beta tipi Stirling motor örneği görülmektedir.



Şekil 4.11. Sıcak ucu 25 cm Demir ve soğuk uç tarafı 25 cm Zirkonyum'dan imal Beta tipi Stirling motor

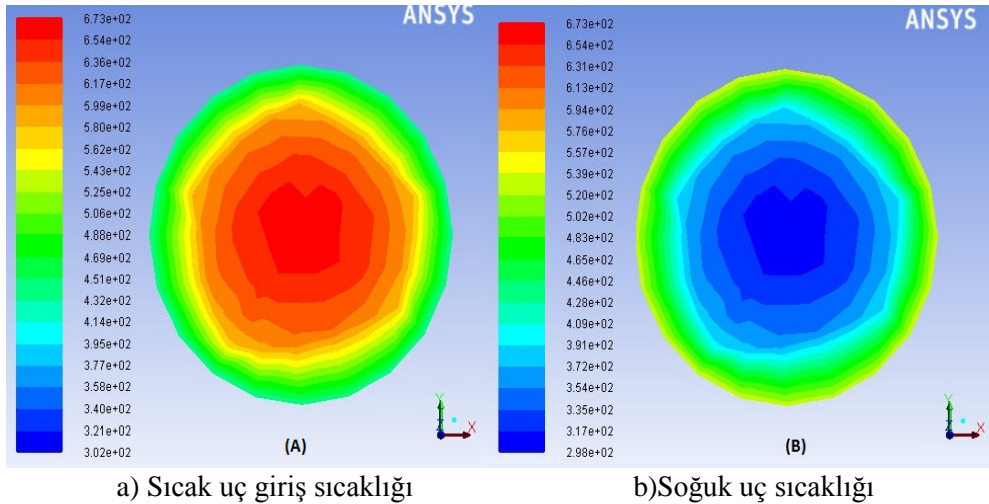
Şekil 4.12.a'da ANSYS programı kullanılarak hazırlanan simülasyon da 50 cm'lik Demir'den imal edilen displacer borusunun mesh işlemi yapılmıştır. Displacerin ısı analizini yapabilmek için displacer simülasyon ortamında yaklaşık 300.000 parçaya ayrılmıştır. Bu sayede ayrıntılı olarak istenen her noktanın sıcaklık değeri ölçülebilmektedir. Şekil 4.12.b'de de görüldüğü gibi displacer borusunun ısıtılması işlemine geçilmiştir.



Şekil 4.12. Displacer için mesh ve ısıtılma işlemi

Yapılan simülasyon çalışmasında  $673^{\circ}\text{K}$ ,  $773^{\circ}\text{K}$  ve  $873^{\circ}\text{K}$  sıcaklık değerleri için 50 cm uzunluğundaki Demir'den imal edilen displacer borusu ile 25 cm Demir'e eklenen 25 cm Zirkonyum'dan imal edilen displacer borusu karşılaştırılmıştır.

50 cm uzunluğundaki Demir'den imal edilen displacer borusuna uygulanan sıcak uç giriş sıcaklığı  $673^{\circ}\text{K}$  iken soğuk uç sıcaklığı  $535^{\circ}\text{K}$  olarak ölçülmüştür.  $673^{\circ}\text{K}$ 'deki Demir'den imal displacer borusu için sıcak uç giriş sıcaklığı Şekil 4.13.a'dan ve  $673^{\circ}\text{K}$ 'deki Demir'den imal displacer borusunun soğuk uç sıcaklığı Şekil 4.13.b'den görülmektedir.



Şekil 4.13.  $673^{\circ}\text{K}$  Demir'den imal displacer borusunun sıcak uç giriş ve soğuk uç sıcaklıkları

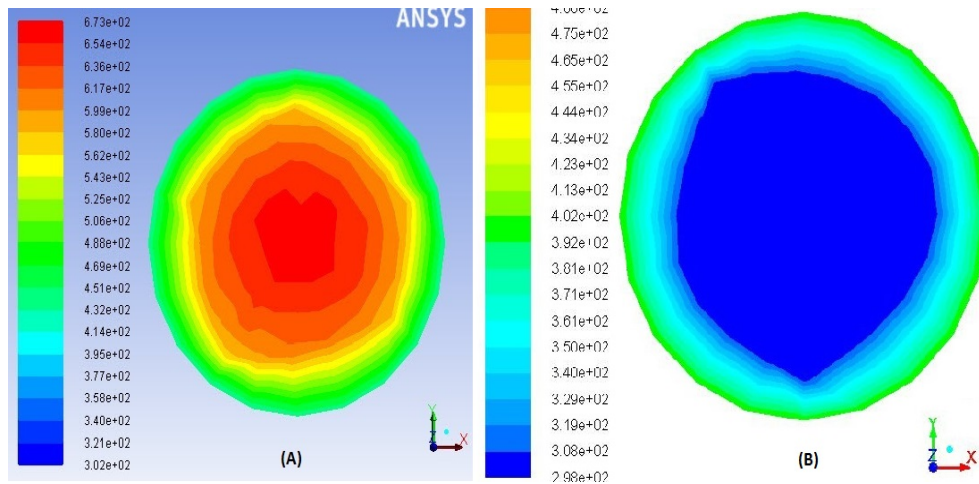
$673^{\circ}\text{K}$ 'de 50 cm Demir'den imal edilen displacer borusu için ANSYS programında yapılan analize ait sıcaklık değişim grafiği Şekil

4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'teki değişim incelendiğinde Demir displacer borusunun soğuk uç sıcaklığının  $535^{\circ}\text{K}$  olduğu görülmektedir. Yani giriş sıcaklığı  $138^{\circ}\text{K}$  kadar azalarak aslında halen yüksek olan bir sıcaklık değerinde seyrettiği görülmektedir.  $138^{\circ}\text{K}$  ısı farkı varken yani soğuk uç sıcaklığı  $535^{\circ}\text{K}$  iken, üretilen elektriksel güç  $10.69\text{ W}$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14. 50 cm uzunluğundaki Demir displacer borusunun sıcaklık değişimi

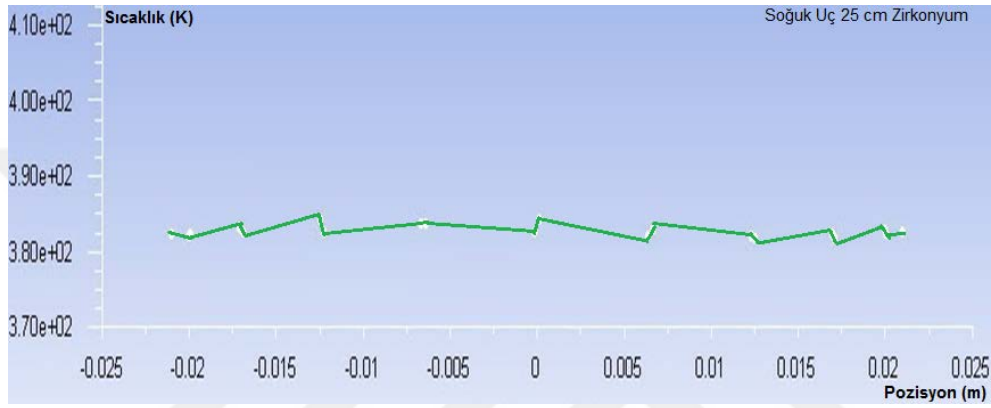
25 cm Demir (sıcak uç) ve 25 cm Zirkonyum'dan (soğuk uç) imal edilen displacer borusuna uygulanan sıcak uç giriş sıcaklığı  $673^{\circ}\text{K}$  iken, soğuk uç sıcaklığı  $535^{\circ}\text{K}$  olarak ölçülmüştür.  $673^{\circ}\text{K}$ 'deki Demir'den imal displacer borusu için sıcak uç giriş sıcaklığı Şekil 4.15.a'dan ve soğuk uç sıcaklığı Şekil 4.15.b'den görülmektedir.



a) 25 cm Demir displacer giriş sıcaklığı b) 25cm Zirkonyum displacer soğuk uç sıcaklığı  
Şekil 4.15.  $673^{\circ}\text{K}$ 'de 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyumdan imal displacer sıcak uç giriş ve soğuk uç sıcaklıkları

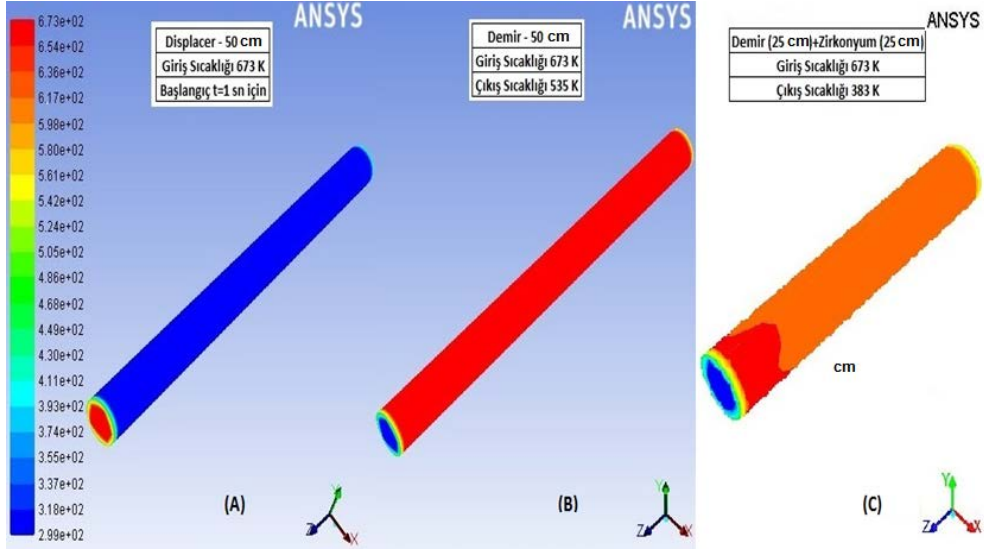
$673^{\circ}\text{K}$ 'de 25 cm Demir (sıcak uç) ve 25 cm Zirkonyumdan (soğuk uç) imal edilen displacer borusu için ANSYS programında yapılan analize

ait sıcaklık değişim grafiği Şekil 4.16'da görülmektedir. Şekil 4.16'daki değişim incelendiğinde Demir ve Zirkonyum'dan imal edilen displacer borusunda soğuk uç sıcaklığının 383°K olduğu görülmektedir. Yani giriş sıcaklığı 290°K düşmüş ve daha düşük sıcaklık değerine inildiği görülmüştür. 290°K ısı farkı varken üretilen elektriksel güç 43.57 W olarak ölçülmüştür. Buna göre 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyumdan imal edilen displacer borusu, 50 cm tek paręa Demir'den imal displacer borusundan % 307.58 daha fazla elektrik üretebilmektedir.



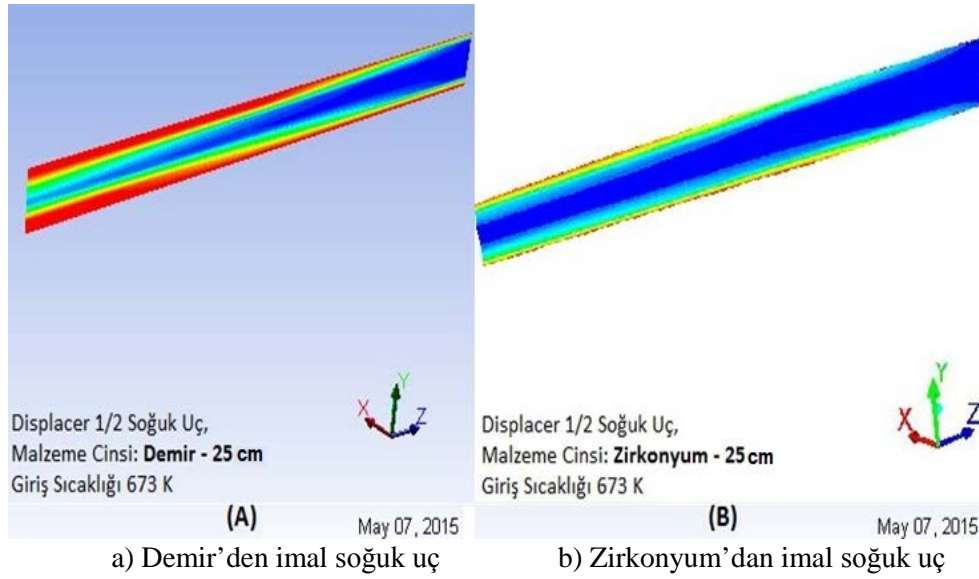
Şekil 4.16. 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyum'dan imal displacerda sıcaklık değişimi

ANSYS simülasyon programında 50 cm Demir'den imal displacer borusunun ısıtılmamış ortam sıcaklığındaki hali Şekil 4.17.a'da, displacer borusunun 673 °K'de ısıtılmış hali Şekil 4.17.b'de görülmektedir. Şekil 4.17.c'de ise 25 cm Demir ve 25 cm Zirkonyum'dan imal edilen displacer borusunun sadece 25 cm'lik Zirkonyum kısmının sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.17 incelendiğinde 50 cm Demir'den imal displacer borusunun ısıtma işlemi sonrası dış çeperinin yüksek ısı ifadesi olan kırmızı renge dönüştüğü Şekil 4.17.b'de gözlenmektedir. Ancak Şekil 4.17.c'den de görüleceği gibi Zirkonyum'dan imal edilen soğuk uç tarafının sadece Demir'den imal sıcak uca temas eden 5 cm'lik kısmının yüksek sıcaklık değerlerini ifade eden kırmızı renkte olduğu görülmektedir. Soğuk uç tarafındaki diğer 20 cm'lik kısım ise turuncu renkteyken, en uçta ise düşük sıcaklık ifadesi olarak kabul gören sarı-yeşil renk görülmektedir. Displacer borusu için ısı değişimleri Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17. Displacer borusu için ısı değişimleri

Bu sıcaklık değişimi Şekil 4.18'de displacer borusuna ait yandan kesitteki sıcaklık değişiminden de görülmektedir. Şekil 4.18.a'da Demir'den imal displacer borusunun 25 cm'lik soğuk uç tarafına ait yandan kesit görünümünde yüksek sıcaklık ifadesi kırmızı rengin displacer borusunun sonuna kadar devam ettiği görülmektedir. Yüksek sıcaklık değerleri Şekil 4.18.b'den de görülebilmektedir. Bu esnada ölçülen 50 cm'lik Demir'den imal displacer borusundan simülasyon ortamında ölçülen soğuk uç sıcaklığı 535 °K'dir. Ancak Şekil 4.18.b'den de görüleceği gibi 25 cm'lik soğuk uç sıcaklığının çıkış ucuna kadar devam etmediği Zirkonyum'dan imal displacer borusunun 25 cm'lik soğuk uç bölümünün yandan kesit görünümünden görülmektedir. Düşük sıcaklıklığı sembolize eden mavi rengin displacer borusunun sonuna kadar devam ettiği, dış çeperde sarı-yeşil rengin hakim olduğu ve kırmızı renge hiç rastlanılmadığı görülmektedir. Düşük sıcaklık değerleri Şekil 4.15.b ve Şekil 4.18.b'den de görülebilmektedir. Bu esnada 25 cm Demir'den ve 25 cm Zirkonyum'dan imal edilen displacer borusundan simülasyon ortamında ölçülen soğuk uç sıcaklığı 383 °K'dir.



Şekil 4.18. Demir ve Zirkonyum için soğuk uç yandan kesit görünümü

İdeal Adiabatic v.1.x Stirling motor simülasyon programında 673 °K'de uzunluğu 50 cm ve Demir'den imal edilmiş displacer borusu üzerindeki sıcak uç ile soğuk uç arasındaki ısı farkı 138 °K iken 10.69 W üretilmektedir. 673 °K için uzunluğu 50 cm olan ve bunun 25 cm kadarı Demir'den imal edilmişken diğer 25 cm yani soğuk uç tarafının Zirkonyum'dan imal edildiğinde, displacer borusu üzerindeki sıcak uç ile soğuk uç arasındaki ısı farkı 310 °K olarak ölçülmüş olup, 43.57 W elektriksel güç üretilmektedir. 773 °K ve 873 °K için Tablo 4.2'den ısı farkının artması sonucu üretilen elektriğin birkaç kat arttığına dair simülasyondan elde edilen elektriksel güç değerleri görülebilmektedir.

Tablo 4.3. Farklı madenlerden imal edilmiş displacer borusu için çeşitli sıcaklıklarda üretilen güçler

Sıcak uç için imalat malzemesi (25 cm)	Soğuk uç için imalat malzemesi (25 cm)	Sıcak uç (°K)	Soğuk uç (°K)	Isı farkı (°K)	Üretilen güç (W)	Güç artışı (%)
Demir	Demir	673	535	138	10,69	307,58
Demir	Zirkonyum	673	383	290	43,57	
Demir	Demir	773	600	173	13,07	288,83
Demir	Zirkonyum	773	408	365	50,82	
Demir	Demir	873	660	213	13,69	319,28
Demir	Zirkonyum	873	430	443	57,4	

- Bu yöntem ile daha yüksek ısı değerlerine ihtiyaç duyulmadan daha fazla elektrik enerjisi üretilebilecektir. Yani ısıtma işlemi güneşle yapılıyorsa, gerekli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmak için daha büyük yansıtıcı çanak veya daha kaliteli ve pahalı fresnel mercek kullanılmalıdır. Eğer ısıtma işlemi farklı bir kaynaktan üretilen enerjiyle yapılıyorsa daha fazla tüketim yaparak ısıtma işlemi gerçekleştirecek rezistansların kullanılması gerekmekte ya da LPG veya benzeri bir gaz kaynağı kullanılacak ise daha fazla gaz tüketilerek ısıtma işlemi yapılacaktır. Bu yöntem ile daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşma ihtiyacı olmadan daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek elektrik enerjisi üretimi sağlanabilmektedir.
- Yine yüksek ısı değerlerinde bazı metaller ergime noktalarına yaklaştıklarından fiziksel deformasyona uğramaktadırlar. Örneğin Demir metali yaklaşık 1811 °K erimekte iken 1200 °K'de fiziksel şekil değişikliğine yani deformasyona uğramaktadır. Displacer borusu üzerindeki deformasyon ise yer değiştirme pistonunun hareketini sürtünme nedeniyle kısıtlayarak, enerji üretimini olumsuz yönde etkilemekte veya tamamen durdurabilmektedir. Demir'in ergime noktasına dair bilgiler Tablo 4.2'de görülmektedir.

Sonuç olarak tüm bu analiz işlemleri ANSYS 13.5 simülasyon programında 673 °K, 773 K ve 873 °K'de Stirling motora ait displacer borusunun 50 cm Demir ve 25 cm Demir'e eklenen 25 cm Zirkonyum boru için tekrar edilmiştir. Elde edilen sıcaklık değerleri Stirling motor Ideal Adiabatic v.1.x simülasyon programı kullanılarak, üretilecek elektriksel güç miktarları hesaplanmıştır. Tablo 4.3'ten de görüleceği gibi;

- 673°K'de sıcaklık farkı 138°K'den 290°K'ye çıkarıldığında %307.58,
- 773°K'de sıcaklık farkı 173°K'den 365°K'ye çıkarıldığında %288.83,
- 873°K'de sıcaklık farkı 213°K'den 443°K'ye çıkarıldığında %319.28

oranlarında elektriksel güç artışı sağlanmıştır. Dolayısıyla Stirling motorlarda displacer borusu üzerindeki ısıyı arttırarak elektriksel üretimin arttırmaya çalışılması bazı tip displacer boruları üzerinde fiziksel deformasyonlara, ek maliyetlere ve kontrol edilemeyen sıcaklık değerleri nedeniyle iş kazalarına sebep olmaktadır. Stirling motorlarda giriş kaynak sıcaklığını arttırmak yerine displacer borusunda uçlar arası sıcaklık farkının arttırılması yöntemi, elektriksel güç üretimini arttırarak kazanç miktarını yükseltmektedir.

### **4.3. Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemi Uygulaması**

Bu çalışmada İspanya modeli baz alınarak ısı kaynaklı çalışan SMGTS ile FV panelli (sabit ve hareketli) sistemler karşılaştırılmıştır. Öncelikle bir Stirling motor imalatı yapılmış ve motorun ısıtılması için çanak şeklindeki odaklayıcının iç yüzeyine yansıtıcı folyo döşenerek yaklaşık 400°C ısıya ulaşılmıştır. Güneş takip sistemi ile gün doğumundan gün batımına kadar sürekli olarak güneş ışınları dik açıyla takip edilmiş, gerek FV sistemlerden gerekse Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemin (SMGTS)'den alınan elektriksel parametreler eşzamanlı olarak ölçülerek veri kaydedici aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmayla sıcaklığın olumsuz etkisinin yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri aracılığıyla avantaja dönüştürülebileceği görülmüştür. Ülkemizde güneşten elektrik üretiminde yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleriyle elektrik üretimi benimsenebileceği anlaşılmıştır. Çünkü sabit ve hareketli FV panelli sistemlerde sıcaklık dezavantaj olup verimi azaltırken, SMGTS gibi ısı kaynaklı sistemlerde ise sıcaklık, elektriksel verimi arttırmaktadır.

Andraka ve Mills'in çalışmalarında da anlaşılacağı gibi güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi konusunda geçmişte yapılan araştırmalarda en verimli dönüşüm sisteminin bir çanak yansıtıcı ve bir Stirling motordan oluşan sistemler olduğu görülmektedir [40,41]. Bu sistemlerin verimi yüksek olmakla birlikte bazı teknik zorluklar nedeniyle Stirling motorlu sistemlerin yaygın biçimde kullanımı sağlanamamıştır. Güneş enerjisinin yaygın biçimde elektrik üretiminde kullanılabilmesi için, kırsal kesimde kullanılabilecek ölçülerde küçük güçlü bireysel kullanıma

uygun sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Stirling motorlarının evsel uygulamaları yaklaşık 20 yıl önce ortaya atılmış bir fikir olsa da hala ciddi bir uygulamaya rastlanmamaktadır [42,43].

Verim ve uygulanabilirlik açısından yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinden olan SMGTS'nin avantajı ortaya konulduğu takdirde, ülkemize güneş paneli ithal edilmesi yerine yoğunlaştırılmış güneş enerjisi üretim yöntemlerini kullanarak elektriksel üretim kapasitesinin artırılacağı görülecektir. Bilindiği üzere FV panel kaynaklı elektrik üretim sistemlerinde Dünya'da ilk sırada olan Almanya güneş ışınım değerleri açısından avantajlı bir konuma sahiptir. Bu nedenle Almanya doğal olarak FV panel kaynaklı üretime yönelmekte ve bu hususta elektrik tüketicilerini bilinçlendirerek teşvik mekanizmalarıyla bireysel elektrik üretimini artırmaktadır. Ancak Türkiye ışınım değerleri açısından Almanya'dan farklılık gösteren sıcaklık ve iklim koşullarına sahiptir. Türkiye'de FV panel sistemine uygun yüksek rakım değerlerine sahip olan tek bölge olan Doğu Anadolu bölgesi ile bazı yüksek yayla ve dağ tepeleridir. Buradan hareketle hem ışınım değerlerinin yüksek olduğu hem de havanın sıcaklığının paneller üzerinde olumsuz etki göstermediği diğer coğrafi bölgelerimiz (Karadeniz Bölgesi hariç) güneş potansiyelimizin %80'ine karşılık gelmektedir. Yani bir başka deyişle ülkemiz güneşten elektrik üretim potansiyelinin %80'ni, ısı kaynaklı olan yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemiyle elektrik üretimine daha uygundur. Bu çalışma sonucunda Avrupa'da son 10 yılda ısı kaynaklı güneş enerjisinden elektrik üretimi alanında atılım yapan İspanya örneğinin, Türkiye için model olabileceği öngörülmektedir. Şekil 4.19'da Türkiye ve Avrupa güneş enerji potansiyeli haritası görülmektedir.



Şekil 4.19. Türkiye ve Avrupa güneş enerji potansiyeli haritası

Bu amaçla Türkiye’de ısı kaynaklı enerji üretimine yönelik olarak öncelikle;

- i. Stirling motor prototipi imal edilmiş,
- ii. Çanak yansıtıcıdan daha fazla sıcaklık elde edebilmek için yüzey yansıtıcı folyolarla kaplanmış,
- iii. Aktüatörler kullanarak çift eksenli güneş takip sistemi imal edilmiş,
- iv. Sabit FV panel, güneş takipli FV panel sistemi ve SMGTS’ye ait parçalar montajlanmış,
- v. Hazırlanan güneş enerji sistemlerine ait bilgiler bir yazılım ile kaydedilmiş ve analizler yapılmıştır.

Dolayısıyla;

- a) Stirling motor seri üretimi için sektörel bazda çarpan etkilerinin yaygınlaşacağı,
- b) Bilimsel çalışmalara kaynak teşkil edebilecek bir çalışma yürütülerek literatüre katkı sağlanacağı
- c) Araştırma sonuçlarının makale, bildiri ve kitap hazırlanmasında SMGTS ile ilgili önemli bir kaynak teşkil edeceği,
- d) FV panelli sistemlerin ülkemiz için (%20’si hariç) çok kullanışlı olmadığının anlaşılacağı,
- e) Sıcak havanın verimi düşürücü olumsuz etkisinin yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleriyle avantaja dönüştürülerek verimi artırıcı

bir etki yaratacağı ve nihayetinde Türkiye’de FV panelli üretim yerine yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemli enerji üretiminin benimsenmesinin gerektiği,

- f) Tamamen yerli kaynaklarla elektrik üretiminin yapılabileceği,
- g) İlgili teknik kadrolarda gerekli deneyimin bu şekilde oluşturulabileceği,
- h) Güneş enerjisi alanında faaliyet gösteren iş kollarında imalat ve teknik açıdan yeni istihdama imkân sağlanabileceği,
- i) Enerji ithalatı yerine güneşten elektrik üretimi sayesinde ülke ekonomisine katkı sağlanabileceği,
- j) FV panellerin dış ülkelerden ithal edilmemesi gerektiği, anlaşılmıştır.

Bu doğrultuda,

- i. SMGTS, sabit FV panelli sistem ve FV panelli güneş takip sistemleri elektriksel verimlilik açısından karşılaştırılmış,
- ii. SMGTS, sabit FV panelli sistem ve FV panelli güneş takip sistemi kuruluş ve işletim maliyetleri açısından kıyaslanarak en optimum sonuca ulaşılmıştır.

#### **4.3.1. Stirling Motor Kullanım Gerekliliği**

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

Bu çalışmada düşük güçlü, kırsal yörelerde kullanılacak, şebekeden bağımsız, kolay bozulmayan ve uzun süreler boyunca bakım gerektirmeyen, çalışma gazı olarak hava gazı kullanan dolayısıyla can güvenliği ve sızdırmazlık sorunlarıyla karşılaşılacak konsantre güneş sistemine dayalı olarak çalışan SMGTS imalatı yapılmıştır. Söz konusu

SMGTS ile sabit FV panel sistemi elektriksel parametrelerden verim açısından analizi yapılmıştır. Stirling motor parametrelerine yönelik çalışmalar literatürde mevcut olmakla birlikte, elektriksel boyutlarıyla karşılaştırmalı SMGTS ve FV panel sistemlerinin analizine rastlanmadığından elektriksel verim açısından SMGTS ve FV panel sistemi karşılaştırılmıştır.

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli Avrupa'da ilk sırada olup, FV panellerden elektrik üretim potansiyeli, tüm güneşten elektrik üretim potansiyeline oranı %20'dir. Türkiye'nin güneşten elektrik üretme potansiyelinin %80'ni ısı kaynaklı yoğunlaştırılmış güneş enerjili sistemlere uygundur. Ülkemizdeki yüksek sıcaklık değerleri FV panellerdeki verimi olumsuz etkilerken, SMGTS sayesinde bu durum avantaja dönüştürülebilir. Yüksek ısı verim artışına katkı sağlayacak, hammaddenin ulusal bazlı olması ekonomik karlılık sağlayacaktır.

#### **4.3.2. Stirling Motorlu Güneş Kaynaklı Üretim Sistemi Tasarımı**

Bu tezdeki temel amaç, güneş radyasyonunun sıcaklık etkisini kullanarak elektrik üretecek bir Stirling motor tasarlamak, tasarlanan Stirling motor güneş takip sistemine monte edilerek enerji üretim kapasitesi açısından sabit ve hareketli FV panel sistemiyle verim yönünden karşılaştırmaktır.

Çalışmada öncelikle Stirling motorlarda görülen sorunlardan olan balans sorunlarına, sızdırmazlık sorunlarına, ölü hacme, sürtünme kayıplarına çözüm üretilmeye çalışılmıştır. Bir sonraki aşamada tasarlanan Stirling motor güneş takip sistemine monte edilerek eşzamanlı çalışma sağlanmıştır. Üçüncü aşamada FV panel sisteminin geçmişten günümüze verim performans gelişimi incelenmiş, varolan en son teknolojiyle üretilmiş FV panel sistemleriyle SMGTS elektriksel verim açısından karşılaştırılmıştır.

Tasarımı yapılan Stirling motorun displacer borusu (silindir şekilli) 50 cm uzunluk ve 6.014 cm çap ölçülerine sahiptir. Buna göre Stirling motorun displacer borusunun toplam hacmi  $1422.8 \text{ cm}^3$  olup, displacer

pistonunun Genişleme hacmi, Sıkıştırma hacmi ve Ölü hacmin toplamına eşittir. Bir başka ifadeyle ısınma işlemi esnasında Isıtıcı genişleme hacmi ile Isıtıcı sıkıştırma hacminin toplamıda Stirling motor toplam hacmini yani 1422.8 cm<sup>3</sup> değerini sağlamaktadır. Ideal Adiabatic v.1.x Stirling motor simülasyon programıyla hesaplanan hacimsel parametreler ve motor ölçüleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Hesaplanan hacimsel parametreler ve motor ölçüleri

Motor tipi	Beta	
Yerdeğiştirme Borusu		
Uzunluk	50 cm	
Yarıçap	3,007 cm	
Motor ağırlığı	5.65 Kg	
Silindir çapı	7 cm	
Piston hareket mili	9 cm	
Çalışma gazı	Hava	
Stirling motor toplam hacmi	1422.8 cm <sup>3</sup>	
Isıtıcı genişleme hacmi	$V_{swe}$	1222.8 cm <sup>3</sup>
Isıtıcı sıkıştırma hacmi	$V_{cle}$	200 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma hacmi	$V_{clc}$	160 cm <sup>3</sup>
Genişleme hacmi	$V_{swc}$	1222.8 cm <sup>3</sup>
Ölü hacim	40 cm <sup>3</sup>	

Bu çalışmada kullanılan Stirling motorun tasarımında göz önünde bulundurulması gereken motor parametreleri aşağıda sıralanmaktadır;

- ✚ Motorun kullanım amacı: Enerji üretimi
- ✚ Motor gücü: 80-100 W
- ✚ Motoru çalıştırmak için kullanılacak enerji türü: Güneş enerjisi
- ✚ Motor tipi (alfa, beta, gama): Beta tipi Stirling motor
- ✚ Çalışma sıcaklığı: 673°K
- ✚ Motorda kullanılacak çalışma akışkanı: Hava
- ✚ Çalışma basıncı: 100 kPa (1 Atm)
- ✚ Tüm hesaplama ve uygulama 1 m<sup>2</sup>'lik alan içindedir.

#### 4.4. Uygulama Devresi Materyalleri

Günümüzde yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri sayesinde güneşin termal özelliği sayesinde ısının Stirling motor ile güç üretimine yönelik çalışmalar artmıştır. Stirling motorlar ısıtıcı, rejeneratör ve soğutucu bölümlerinden oluşmaktadırlar. Stirling motorlarda, güç pistonuyla yerdeğiştirme pistonu olarak bilinen pistonlar arasında bulunan çalışma gazının ısıtılıp soğutulmasıyla elektriksel güç üretilmektedir. Isınıp genişleyen gaz güç pistonunu iterek mekanizmayı ileri doğru hareketlendirmektedir. Stirling motorlarda karşılaşılan problemlerin başında;

- i. Çalışma akışkanı olarak kullanılan gazın yani helyum ve hidrojen gazları için yüksek basınç altında sızdırmazlık sorunlarının ortaya çıkması,
- ii. Soğutma işleminin hızlı yapılması gerekliliği,
- iii. Yüksek sıcaklıkta deforme olmayacak malzemelerin temini edilmesi gerekliliği,
- iv. Kullanılan malzemenin ısı iletim hızının kabul edilebilir düzeyde olması,

gibi sorunlar ile karşılaşılmaktadır. Ayrıca diğer bir dezavantajda rejeneratöre ait ısıtıcı ve soğutucu boşluklarının yani ölü hacim bölgelerinin optimum olmaması durumunda sıkıştırma oranları, elektriksel verimi olumsuz etkileyerek elektriksel gücün azalmasına sebep olmaktadır.

Günümüzde güç pistonları çeşitli tiplerdedir. Bunların en çok bilinen tipleri alfa, beta, gama tipi Stirling motorlardır [44,45]. Isı kaynağı olarak güneş enerjisini kullanan kollektörlü Stirling motorlarda, termal verimin yüksekliği sebebiyle beta tip Stirling motorlar en yaygın olarak kullanılan ısı makinalarıdır [46,47].

##### 4.4.1. Çalışma Akışkanının Seçimi

Bu çalışmada Stirling motor için çalışma maddesi olarak hava kullanılmıştır. Farklı bir madde kullanımına başvurulmamıştır. Stirling motorlarda farklı çalışma maddeleri ısı transferi ve sürtünme kayıpları göz

önünde bulundurulurarak seçilmektedir. Stirling motorlarda kullanılan çalışma maddelerinden hava ve helyum en çok kullanılan gazlardır. Bu çalışma maddelerinden hava ortamda serbest olarak bulunabilmesi, helyum ise termo-fiziksel özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Helyum ve Hidrojenin ısı transfer kabiliyetlerinin yüksek olması Stirling motorlarda bu gazların kullanımını arttırmaktadır. Motorun performansı açısından Helyum gazı avantajlı olmasına rağmen, hava veya oksijen ile etkileşime geçtiğinde yanıcı etki ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sadece serbest pistonlu Stirling motorlarda kullanılmaktadır. Hidrojen ve Helyum gibi hafif gazlar basınç altında sıkıştırmaya tabi tutulmak suretiyle kullanılmaktadırlar. Basınç işlemi nedeniyle havaya göre daha kalın çeperlere sahip yerdeğiştirme pistonu kullanılmaktadır. Dolayısıyla daha hantal motorların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca bu gazlar motor içinde muhafaza zorluğu ve ilave yardımcı sistemler gerektirir. Helyum gazının kokusuz oluşu imalat işlemlerinin yürütüldüğü ortamlarda zehirlenme ihtimalini artırmaktadır. Helyum oksijen içermez ve kapalı alanda tahliye olduğunda boğulmaya neden olur. Ürünün yanlış kullanımı ciddi akciğer hasarına veya ölüme neden olabilmektedir. Helyum basınçlı gaz olduğundan 50°C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılması tavsiye edilmektedir. Tüm bu olumsuz etkilerden korunabilmek için ek maliyetler ile ek önlemlerin alınması gerekmektedir. Buda toplam maliyet artışına sebep olmaktadır. Hava dışındaki bu gazların kullanılabilmesi için sızdırmazlık probleminin çözülmesi gerekmektedir. Kinematik motorlarda sızdırmazlık problemi halen devam etmektedir. Can güvenliği açısından sızdırmazlık sorununun çözümü sonrasında Helyum gibi gazların kullanımı tavsiye edilmektedir.

Çalışma maddesi olarak hava kullanılan motorlarda, Helyum kullanılan motorlara göre yüksek ısı ve kütle akışı seviyelerine ulaşılamaz. Ancak çalışma maddesi olan havanın atmosferden kolaylıkla sağlanması, sızdırmazlık sorununun yaşanmaması ve yüksek ısıya dayanacak özellikteki malzemenin temini ve işlenmesine dair zorlukların aşılması nedeniyle hava ile çalışan Stirling motorlar düşük maliyetlerle imal edilebilmektedir.

Genel olarak, nakledilme şartlarında en iyi özelliklere sahip akışkan Hidrojendir. Seçilen basınç ve sıcaklık değerlerinde ısı transferi özelliği

bakımından en az sürtünmeye sahip olan gaz yine Hidrojen'dir. Performans açısından Hidrojenden sonra Helyum gazı verimlidir. Hidrojenle çalışan bir Stirling motorda akış kayıpları daha azdır. Stirling motorlarında en iyi iş gazı olan Hidrojen birçok cazibesine rağmen, hava ile karışımının %5-%75 oranları arasında gerçekleşmesi durumunda yanıcılık özelliğinin yüksek olması nedeniyle tercih edilmemektedir [48].

Literatürde Stirling motorlar ile ilgili Helyum ve Hidrojen gazının iş gazı olarak kullanıldığı çalışmalarda Helyum ve Hidrojen gazları nedeniyle meydana gelmiş ölümcül kazalara rastlanmaktadır. Helyumun boğucu etkisi nedeniyle ve Hidrojenin ise yanıcı özelliği nedeniyle can güvenliği açısından bu çalışmada çalışma akışkanı (gazı) olarak Hava tercih edilmiştir [35]. Ayrıca havanın maliyetinin çok düşük olması (maliyetsiz olması) ve sızdırmazlık sorununun olmayışı nedeniyle çalışma akışkanı olarak Hava Stirling motorlarda daha çok tercih edilmektedir [49].

Koca A., güneş enerjisi ile çalışan bir Stirling motoru tasarlamıştır. Çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı Stirling motorda en yüksek güç 2.5 bar şarj basıncında ve 900°C ısıtıcı sıcaklığında 30.5 W olarak ölçülmüştür [50,51]. Demiralp M., yapmış olduğu çalışmada, çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı küçük hacimli bir Stirling motoru tasarlamış ve değişik ısıtıcı sıcaklığı ile değişik şarj basınçlarında yapmış olduğu denemelerde en yüksek gücü 2 bar şarj basıncında 1000°C ısıtıcı sıcaklığında 21.46 W olarak ölçülmüştür [52].

#### **4.4.2. Pyranometre Seçimi**

Pyranometrenin işlevi ve çalışmasının anlaşılabilmesi için öncelikle bazı temel kavramlara değinilmesi önem arz etmektedir.

Pyranometre yatayda yeryüzüne gelen global (küresel) radyasyon şiddetinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Termoelektrik özelliktedir, yani termal radyasyondan gerilim üretmeye yarar. 300 nm ile 3000 nm arasındaki dalga boyunu algılar. Sensör güneş radyasyonu şiddetine bağlı olarak  $\mu\text{V}$  seviyesinde gerilim üretmektedir. Bu değer sensör sensivity değerine bölünerek  $\text{w/m}^2$  olarak güneş radyasyon şiddeti elde edilir. Direkt ve diffuse radyasyon toplamını ölçer. Diffuse radyasyon bileşenini belirlemek için

gölgeleme bandı, disk veya top kullanılmaktadır [53]. Şekil 4.20’de Pyranometre görünümü verilmiştir.



Şekil 4.20. Pyranometre görünümü

➤ Güneş Radyasyonu:

Güneş tarafından yayılan ve atmosfere ulaşan radyasyondur. Kısa dalga radyasyon olarak adlandırılır.

- ✚ Direkt radyasyon :  $S$
- ✚ Diffuse (yayılan) radyasyon :  $H$
- ✚ Yansıyan Radyasyon :  $R$

➤ Yerel Radyasyon:

Dünya ve atmosfer tarafından yayılan radyasyondur. Uzun dalga radyasyon olarak adlandırılır 300 K için %99.99’u 3000 nm’den büyük dalga boyundadır

- ✚ Yerel Yüzey Radyasyonu: Dünya yüzeyinden yayılan radyasyon :  $E$
- ✚ Atmosferik Radyasyon: Atmosfer tarafından yayılan radyasyon :  $A$

➤ Toplam Radyasyon:

Güneş ve yerel radyasyonun toplamıdır. Global radyasyon, kısa dalga radyasyon (300–3000 nm) ve yer ile atmosferden yansıyan uzun dalga boylu radyasyon (300–100.000 nm) toplamıdır. Pyrradiometre (Pyrradiometre) ile ölçülür. Aşağı ve yukarı bakan iki sensör kullanılarak ölçülür. İkisinin toplamı total radyasyonu, farkı ise net radyasyonu verir.

- ✚ Pyrradiometre 300–100.000 nm arasında dalga boylu radyasyonu ölçecek özellikte olmalıdır.

✚ Kısa Dalga Radyasyon: Güneş tarafından yayılan radyasyondur. Direkt, diffuse ve yansıyan radyasyondan oluşur. Kısa dalga radyasyon parametreleri:

- ✓ Direkt Güneş Radyasyonu:  $S$
- ✓ Diffuse radyasyon:  $H$
- ✓ Global Radyasyon:  $G = (S + H)$
- ✓ Yansıyan Global radyasyon:  $R$
- ✓ Albedo (Yansıtma Faktörü):  $\frac{R}{(S + H)}$

şeklinde olduğuna göre kısa dalga radyasyon dengesi  $Q_K$  ile sembolize edildiği takdirde  $Q_K$  bağıntısı Eşitlik 4.12’de ifade edilir.

$$Q_K = (S + H) - R \quad (4.12)$$

✚ Uzun dalga Radyasyon: Atmosferden gelen ve yer yüzeyinden giden radyasyondur. Uzun dalga radyasyon parametreleri:

- ✓ Atmosferik radyasyon:  $A$
- ✓ Yerden yayılan radyasyon (Yansıyan atmosfer radyasyonu dahil):  $E$
- ✓ Aşağı yönde global radyasyon:  $S + H + A$
- ✓ Yukarı yönde global radyasyon:  $R + E$
- ✓ Uzun dalga radyasyon dengesi:  $A - E$

şeklindedir.

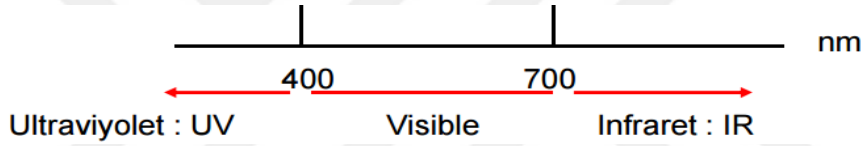
✚ *Net Radyasyon*: Yeryüzüne gelen radyasyon (aşağı doğrultudaki toplam güneş radyasyonu =  $(S + H + A)$  ile yeryüzünden giden (yukarı doğrultudaki Radyasyon =  $R + E$  radyasyon arasındaki farktır. Buna göre net radyasyon dengesi  $Q_N$  ile sembolize edildiği takdirde  $Q_N$  bağıntısı Eşitlik 4.13’te ifade edilir.

$$Q_N = (S + H + A - R - E) \quad (4.13)$$

Güneşten gelen dönüştürülebilir enerji potansiyelinin yaklaşık yarısı atmosferde kaybolmakta diğer yarısı ise yeryüzü tarafından emilerek ısıya yani güneş enerji sistemlerinde kullanılacak enerji türüne dönüştürülmektedir.

- ❖ %49 atmosferde kaybolur.
  - %30 geri yansıma şeklinde kaybolur. Yani %20 bulutlar, %4 yeryüzü ve %6 atmosfer tarafından yok edilir.
  - %16 atmosfer tarafından emilerek yeryüzüne ulaşmaz. Bir başka deyişle ozon, CO<sub>2</sub> ve su buharı tarafından engelenen güneş ışınları yeryüzüne ulaşamaz.
  - %3 güneş ışını ise bulutlar tarafından emilerek yeryüzüne ulaşamaz.
- ❖ %51 yer yüzeyi tarafından emilerek ısıya çevrilir.

Güneş radyasyonu dalga boyuna göre ise gözle görülebilen, ultravioleto ve İnfraret şeklinde sınıflandırılmıştır. Şekil 4.21’de dalga boyuna göre güneş radyasyonu görülmektedir.



Şekil 4.21. Dalga boyuna göre güneş radyasyonu [53]

1. Gözle görülebilen (Visible) radyasyon:


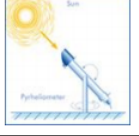

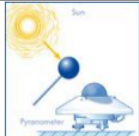

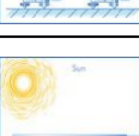

- 🚦 Alt sınır 360 – 400 nm
- 🚦 Üst sınır 760 – 830 nm
- 🚦 Yani görülebilir radyasyonun %99’u 400 – 700 nm arasındadır.

2. Ultravioleto (UV): 400 nm’den düşük dalga boylu radyasyon

- 🚦 UV-A:315 – 400 nm
- 🚦 UV-B:280 – 315 nm
- 🚦 UV-C:100 – 280 nm

3. İnfraret (IR): 800 nm’den büyük dalga boylu radyasyon

Şekil 4.22’de radyasyon çeşitleri ve ilgili ölçüm cihazları gösterilmiştir [53].

Radyasyon	Dalga Boyu	Ölçen Cihaz	Ölçüm açısı	Aksesuar	Ölçüm Resmi
Global Radyasyon	300 – 3000 nm	Pyranometre	180° Yukarı	-----	
Direkt Radyasyon	300 – 3000 nm	Pyrheliometre	< 5°	Tracker	
Yerden Yansıyan Global Radyasyon	300 – 3000 nm	Pyranometre	180° aşağı	-----	
Diffuse Radyasyon	300 – 3000 nm	Pyranometre	180° yukarı	Gölge bantı, disk, topu	
Atmosferik Radyasyon	300 – 50.000 nm	Pyranometre Pyrgeometer	180° yukarı	-----	
Yer yüzünden yansıyan radyasyon	300 – 50.000 nm	Pyranometre Pyrgeometer	180° aşağı	-----	
Total ve Net Radyasyon	300 – 50.000 nm	Pyranometre Pyrgeometer	180° yukarı 180° aşağı	-----	

Şekil 4.22. Radyasyon çeşitleri ve ilgili ölçüm cihazları [53]

## 4.5. Güneş Enerji Sistemlerinin İmalat ve Kurulum Aşaması

### 4.5.1. FV Panel Sistemleri

FV paneller 2 grupta değerlendirilecek olup, bir FV panel Sabit panel olarak ve bir panel de hareketli güneş takip sistemine montajlanarak kullanılmıştır. Hareketli ve sabit FV panel için 24 V DC, 80 W güç üretebilen paneller kullanılmıştır. Şekil 4.23'te FV güneş panelleri görülmektedir.



Şekil 4.23. FV güneş panelleri

#### 4.5.2. Stirling Motor ve Çanak Sistemi

Stirling motor için gerekli sıcaklığa ulaşmak amacıyla gelen güneş ışınlarını odaklayacak 180 cm çapında bir çanak kullanılmıştır. Kullanılan yansıtıcı folyonun yansıtma veriminin yüksek olması amaçlanmıştır. Ayrıca fiziksel etkilere karşı dayanımının yüksek olması amacıyla Almanya menşeli güneş enerji uygulamalarında kullanılan yansıtıcı folyo kullanılmıştır. Şekil 4.24'te çanak yansıtıcının folyo ile kaplanması gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Çanak yansıtıcının folyo ile kaplanması

Şekil 4.25'te Stirling motorun iç yapısı görülmektedir.



Şekil 4.25. Stirling motorun iç yapısı

Şekil 4.26’da Stirling motorun dıştan görünümü görülmektedir.



Şekil 4.26. Stirling motorun dış yapısı

#### 4.5.3. Meteorolojik Ölçüm İstasyonu

Meteorolojik ölçüm istasyonu olarak dokunmatik ekranlı hava istasyonu kullanılmıştır. Kablosuz hava istasyonu 5 Sensör ve 1 meteoroloji direğinden oluşmuştur. Bu sayede rüzgar yönü, rüzgar hızı, sıcaklık, bağıl nem ve yağmur miktarı için, alarm fonksiyonu, USB girişi, analiz-yazılımı ve vericiye güç sağlamak için güneş paneline sahip komplike bir sistem kullanılmıştır. Cihaz çok fonksiyonlu bir ekipman olup, profesyonel kullanım için tasarlanmıştır. Rüzgar yönü, rüzgar hızı, sıcaklık, bağıl nem ve yağmur miktarını hassas bir şekilde tespit eder. Ayrıca belirli bir rüzgar

hızı veya belirli bir basınç değeri seçiminde çeşitli alarmları ayarlayabilme özelliğine de sahiptir. Meteorolojik veriler, kablosuz olarak maksimum 100 metreye kadar hava durumu sensörlerinden alıcıya gönderilir. Vericinin güç ihtiyacı güneş panelinden ve aküden sağlanmaktadır [54].

Meteorolojik hava durumunu izleyip kayıt altına alan hava ölçüm istasyonu Şekil 4.27’de görülmektedir.



Şekil 4.27. Ölçüm istasyonu görünümü

Hava istasyonuna ait fonksiyonlar [54];

- ✓ Oda sıcaklığını ve dış hava sıcaklığını Celsius veya Fahrenheit olarak ölçme,
- ✓ İç ortama ve dış havaya ait nem oranını ölçme imkânı,
- ✓ Hava basıncını inHg veya hPa olarak ölçme
- ✓ Mutlak veya bağıl atmosferik basıncı ölçme imkânı
- ✓ Yağış Göstergesi (birim: mm oder inch)
- ✓ Yağış Göstergesi (Saatlik, Günlük, Haftalık, Aylık)
- ✓ Çiğ noktası sıcaklığı göstergesi
- ✓ Hava tahmini ve hava eğilim göstergesi
- ✓ Fırtına uyarısı ve farklı hava şartlarına ait programlanabilir alarm fonksiyonları
- ✓ Alınan hava durumu bilgileri Min-Maks. değerleri depolama
- ✓ Rüzgâr hızı (Birim: mph, km/h, m/s, knots oder beaufort)

- ✓ Rüzgâr yönü göstergesi
- ✓ Wind chill sıcaklık göstergesi (hissedilen Sıcaklık)
- ✓ LED arka plan Aydınlatmalı
- ✓ Takvim
- ✓ Enerji tasarruf fonksiyonu

şeklinde sıralanmaktadır. Hava istasyonuna ait ölçüm istasyonu ve dokunmatik kontrol paneli Şekil 4.28’de gösterilmiştir [54].



Şekil 4.28. Ölçüm istasyonu ve dokunmatik kontrol paneli

#### 4.5.4. Kumanda Panosu

Kumanda panosu içinde 1 adet röle kartı, 2 adet 24 V akü, 2 adet akü şarj cihazı ve 99 ohm DC yük bulunmaktadır. Şekil 4.29’da SMGTS kumanda panosu görülmektedir.



Şekil 4.29. SMGTS kumanda panosu

Röle kartı 0,15 V'luk 4 adet mini FV panelden gelen akımı karşılaştırarak 4 mini FV panelin herbirinden gelen akım eşit oluncaya kadar güneşe doğru dönmektedir. Güneş karşısındaki konumları açısal anlamda eşit olunca 2 saniyede bir konumunu kontrol ederek üretilen akımları tekrar karşılaştırmaktadır. Şekil 4.30'da Alıcı mini FV paneller görülmektedir.



Şekil 4.30. Alıcı mini FV paneller

Röle endüstride ve otomasyonda yüksek güçlü elektrik sinyallerini anahtarlama işlemi için kullanılır. Röle kartı sayesinde 12 V<sub>DC</sub>, 24 V<sub>DC</sub> ya da 220 V<sub>AC</sub>'luk sinyalleri 3.3 V ya da 5V'luk mikrodenetleyici ile kontrol imkanı sağlar. Röle kartı üzerinde 4 adet 5 V bobin gerilimine sahip röle bulunmaktadır. Bu rölelerin anahtarlama işlemleri transistör ile kontrol edilmektedir. Her bir röle için kontrol ledleri bulunmaktadır. Röleler lojik 0 (0 V) ile tetiklenir. Röleler için NC, NO ve COM bacakları dışarı alınmıştır. Böylece tetikleme durumunda kısa devre veya tetikleme durumunda açık devre olması istenilen durumlarda kullanılabilme imkânı sağlanmıştır. Röle bağlantıları [55];

- V<sub>Bobin</sub>: 5V (Header ya da Klemens'den bağlantı yapılabilir)
- GND: GND (Bobin gerilimini aldığınız kaynak ya da kartın ground'u)
- R<sub>L1</sub>, R<sub>L2</sub>, R<sub>L3</sub>, R<sub>L4</sub>: Röle kontrol pinleri (Bu pinlere 3.3V ya da 5V verildiğinde ilgili pine bağlı röle çekilecektir)
- V<sub>Röle</sub>: Anahtarlama istenen sinyal girişi; 12 V<sub>DC</sub>, 24 V<sub>DC</sub>, 110 V<sub>AC</sub> /10 A, 220-240 V<sub>AC</sub>/5 A
- R<sub>LOut</sub>: Anahtarlama sinyali çıkışı

şeklinde tanımlanmıştır [55]. Şekil 4.31'de röle kartı görünümü verilmiştir.



Uzaktan kontrolde yeni bir ürün olan MP200, PLC ve haberleşmeyi tek cihazda toplamıştır. MP200, temel ve orta düzey endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir kabiliyette, ekonomik olan aynı zamanda geliştirilebilir esnek çözümler sunan bir otomasyon sistemi denetleyicisidir.

MP200, sahip olduğu fonksiyon bloklarıyla sürükle bırak mantığıyla tamamen blok diyagramlar sayesinde programlanabilen bir PLC cihazıdır. MP200–G serisinde, GSM modem tümleşiktir. Uzaktan erişim ihtiyacı olan bir projelerde, GSM tabanlı haberleşmeyle ilgili blokları sürükle bırak mantığıyla işlem yapar. MP200–G serisinde hazır olarak SMS alma ve SMS gönderme blokları bulunmaktadır. Burada da haberleşmeyle ilgili bloklar sürükle bırak mantığıyla çalışmaktadır [56]. Tablo 4.5'te MP200 cihazına ait teknik özellikler ve entegre giriş-çıkış birimleri gösterilmiştir.

Tablo 4.5. MP200 teknik özellikleri ve entegre giriş-çıkış birimleri [56]

DC besleme	9-36 V
Güç	5 W
CPU Hızı	80 MHz
RTC	Gerçek saat, haftalık, yıllık ve astronomik zamanlayıcı
Program Yükleme	USB, ethernet, GPRS
GSM	GPRS class 10/12
Ethernet	100 Mbit
Seri port (RS422 /485)	15 kv ESD koruma
Çalışma sıcaklığı	30
Diğital giriş	4
Dijital çıkış 3,3-550 V <sub>DC</sub>	4
Analog giriş	4
Röle çıkışı 3A 30 V <sub>DC</sub>	4

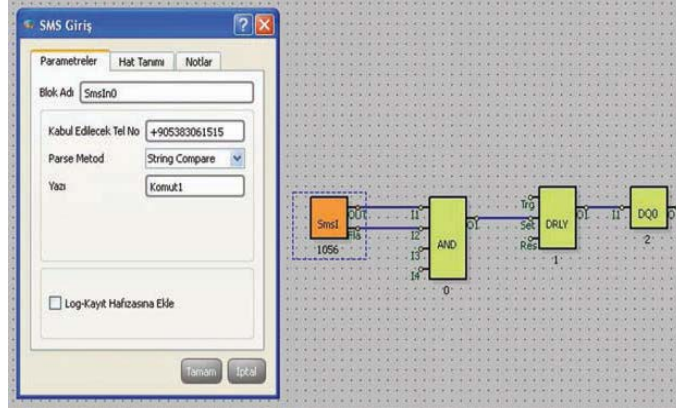
MP200 ürünü; GSM/GPRS, 100 Mbit ethernet ve RS485/RS232 seri haberleşme kanallarına sahiptir. Modbus protokol desteği, Modbus blokları sayesinde eksiksiz ve hatasız olarak sunulabilmektedir. Modbus TCP,

Modbus-RTU protokolleri Master veya Slave olarak tercihe göre programlanmaktadır.

Modbus-RTU master veya Modbus-TCP master seçeneği seçilerek MP200 PLC cihazı aynı zamanda bir Modbus Gateway cihazı olarak da yalnızca iki blok eklenerek kullanılmaktadır.

Mikro PLC sınıfı PLC ile gerçekleştirilebilecek bir proje uzaktan kontrolde yeni bir ürün olan MP200 ile kolaylıkla yapılırken buna ilaveten aynı anda hem Modbus-Gateway, hem de PLC gibi çalışmaktadır. Modbus-Gateway olarak çalışırken slave cihazlardan alınan değerler okunabilirken aynı anda okunan ilgili değerler PLC programlama işleminde de kullanılmaktadır. Uzaktan kontrol MP200 cihazı ile alarm işlemi oluşturulabilir veya istenen değerler SMS olarak izlenebilir. Hangi slave cihazından hangi register değeri kullanılacaksa seçim hakkı kullanıcıya ait olmak üzere hazır bloklarla ihtiyaca göre seçim yapılabilir. Bu sistem scada sistemlerine yönelik zorlu karmaşık işlemler yerine blok diyagramlar kullanılarak kolay ve basit bir çözümlene yöntemidir. Direkt olarak Scada işlemlerine yöneliktir. Modbus-Gateway olarak kullanıldığında yalnızca slave cihazlardan veri okumakla kalmamakta, aynı zamanda ilgili sisteme ait programda kullanılan bloklara ait değerleri uzaktan okuyarak müdahale imkânı sağlamaktadır. Ayrıca herhangi bir yazılım olmadan veya bir Scada yazılımı olmadan Modbus tabanlı haberleşme imkânı sağlamaktadır [56].

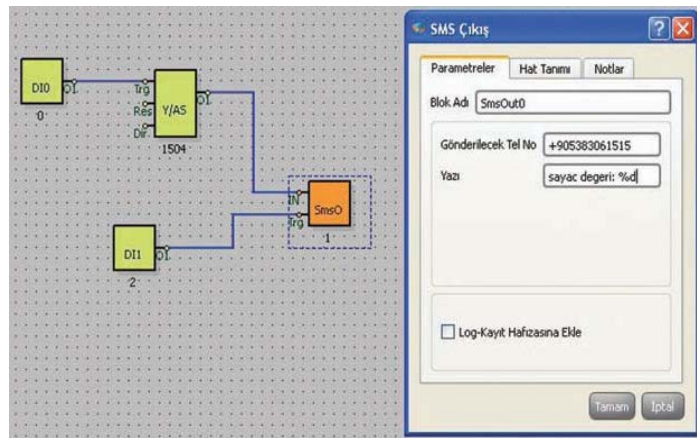
MP200 programlama yazılımında geliştirilen projedeki fonksiyon blokları cihazın Modbus adres haritasına adreslenir. Bu sayede diyagramdaki blokların değerlerine Modbus protokolü üzerinden uzaktan erişim sağlanmış olur. MP200 serisi PLC'lerde kullanım kolaylığı ön plana çıkan birdiğer özelliktir. Programlama dili bilgisi gerektirmeden, fonksiyon bloklarını fare yardımı ile sürükleyip bırak şeklinde programlama imkânı sunar. Şekil 4.33'te MP200 ile SMS ile uzaktan kontrol uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 4.33. MP200 ile SMS ile uzaktan kontrol uygulaması [56]

MP200 ailesinde mevcut olan işlem bloklarından bazıları temel lojik işlem blokları, zamanlayıcı blokları, analog işlem blokları, sayıcı blokları, Modbus TCP/RTU blokları, PID kontrol blokları, analog TON–TOFF, histeresiz alarm, kontrol blokları, matematiksel işlem blokları, long bloklar, astronomik zamanlayıcı blok, gerçek zaman saati, GSM tabanlı kontrol erişimine imkân sağlayacak SMS ve CALL blokları ve tablo işlem blokları şeklinde sıralanabilir.

Ayrıca, Canbus üzerinden 32 DIN modülden 16 adet, 32 DOUT modülden 16 adet, 16 röle modülden 16 adet, 4 AIN modülden 16 adet, 4 AOUT modülden 16 adet, 8 PT100 modülden 16 adet genişleme modülü ile genişleme imkânı sağlanmaktadır. Bu sayede bir adet PLC ile I/O sayısını istediğiniz şekilde kolayca artırabilir ve aynı ekran üzerinden kontrol etme imkânına ulaşılabilir. İhtiyaca göre özel genişleme modülleri veya özel giriş/çıkış birimleri eklenebilecek yapıdadır. Şekil 4.34'te MP200 ile SMS gönderme işlemi görülmektedir.



Şekil 4.34. MP200 ile SMS gönderme işlemi [56]

MP200-G serisinde SMS tabanlı bir uygulamanın nasıl gerçekleştirildiğini Şekil 4.30'daki diyagramda görülmektedir. Bu projedeki SmsI isimli blok SMS alma işlemini gerçekleştirmektedir. Tanımlanan telefon numarasından SMS gelindiğinde SMS'teki mesaj bilgisine göre bir çıkış üretir. SMS alma bloğunun çıkışına kurulacak devre ile de projede istenilen kontrol işlemi gerçekleştirilmiş olur. SMS alma bloğundan maksimum 300'e kadar SMS alınabilmektedir.

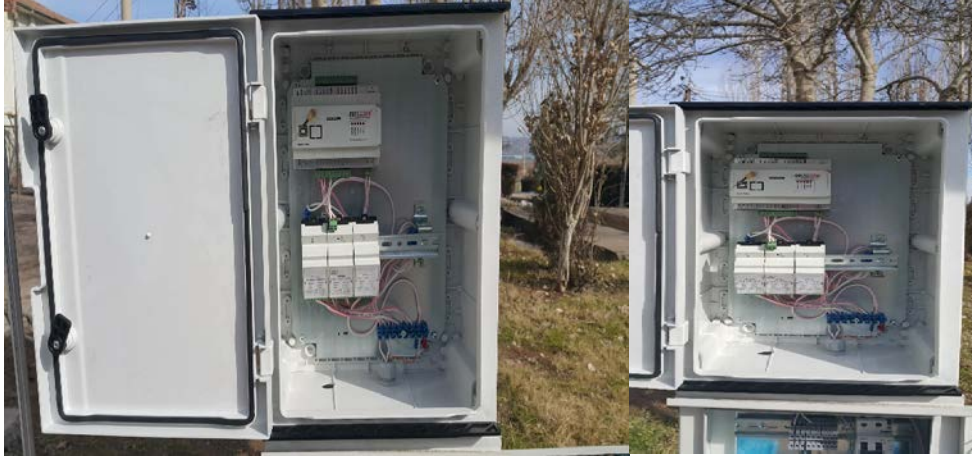
MP200, SMS alma işlemi gibi SMS gönderme işlemini de kolay bir şekilde gerçekleştirmektedir. Bu fonksiyon için Şekil 4.32'deki diyagram SMS gönderme işlemini göstermektedir. Bu diyagramda SmsO isimli blok, SMS gönderme görevini yerine getirmektedir. Trg girişinden bir yükselen kenar tetiklemesi algılandığında IN girişindeki veriyi tanımlanan yazı formatında tanımlanan telefon numarasına SMS olarak gönderecektir. Diyagramdaki uygulamada, cihaz 1 numaralı dijital girişindeki darbe sayısını saymakta ve 2 numaralı dijital girişe basıldığında bunu "Sayaç Değeri: 231" şeklinde SMS atmaktadır. MP200 Modbus tabanlı kontrol uygulamaları için de kolaylıklar sunar. Modbus TCP veya Modbus RTU blokları ile cihaza ulaşıp cihazın içeriğindeki veriler okunabilir ve değiştirilebilir. Şekil 3'teki uygulamada cihaz Modbus TCP ve Modbus RTU arasında geçit oluşturacak şekilde ayarlanmıştır [56].

PLC cihazı aynı zamanda Modbus Gateway cihazı gibi davranarak RTU hattındaki bir cihazın parametrelerini okuyup, diyagramdaki kontrol uygulamasında kullanabilmektedir.

Scada panosunun imalatında kullanılan malzemeler;

- ✚ 1 adet PLC kontrol cihazı
- ✚ 1 adet 0-24 V<sub>DC</sub> gerilimi 0-10 V aralığında V<sub>DC</sub> gerilime çevirecek dönüştürücü
- ✚ 1 adet 0-70 mV<sub>DC</sub> yi 0-10 V<sub>DC</sub> ye çeviren dönüştürücü
- ✚ 1 adet 0-8 A DC akımı 0-20 mA DC akıma çeviren dönüştürücü
- ✚ 1 adet M2M sim kart

şeklinde sıralanabilir. Şekil 4.35'te SMGTS scada panosu görülmektedir.



Şekil 4.35. SMGTS scada panosu

0-24 V<sub>DC</sub>'yi 0-10 V<sub>DC</sub>'ye çeviren dönüştürücü; 24 V<sub>DC</sub> veriyi PLC cihazıyla 0-10 V aralığındaki analog veriye dönüştürür. Yani çevirici kullanılarak PLC'nin okuyabileceği aralığa getirilmiştir.

0-70 mV<sub>DC</sub>'yi 0-10 V<sub>DC</sub>'ye çeviren dönüştürücü; PLC'den gelen verileri 0-10 V arası analog veriye dönüştürür. 0-70 mV aralığındaki veriyi hassas okuma zorlaşacağından 0-70 mV<sub>DC</sub> 0-10 V<sub>DC</sub>'ye dönüştürülmüştür.

0-8 A aralığındaki DC akımı 0-20 mA DC akıma çeviren dönüştürücü; PLC cihazı 0-20 mA arasındaki DC akım değerlerini okuduğundan 20 mA üzerindeki DC akım değerlerini okumak amacıyla Pyranometreden alınan veriler dönüştürülmüştür. Veriler PLC cihazı ile alınarak GSM üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır.

#### 4.5.6. Çift Eksen Hareket Aktüatörleri

Aktüatör, düşük voltaja sahip (12/24 V'luk) DC motorun dönme hareketini doğrusal (lineer) harekete çeviren yani itme ve çekme hareketlerini sağlayan cihazlardır. Elektrikli lineer aktüatörler bir motor, bir dişli yatak ve dönmeyi sağlayan bir somun içerirler. Komple bir aktüatör sistemi, aktüatörün kullanımı için bir ya da daha fazla aktüatör için bir kontrol kutusu ve kontrol cihazından oluşmaktadır. Dolayısıyla bu da aynı anda birden fazla aktüatörün tek bir kutu ve kontrol cihazı ile kumandası anlamına gelmektedir. Doğrusal aktüatörler geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Bir mekanizmanın veya teçhizatın kaldırılması, itilmesi, bastırılması, farklı bir pozisyonda konumlanması, çekilmesi, döndürülmesi

gerektiği zaman aktüatörler kullanılır. Bu tür aktüatörlerin kullanımı oldukça basit, verimli, temiz ve sessizdir. Aktüatörler karmaşık işlemler gerektirmedinden kullanım ömrü açısından uzun süreli olup, bakım gerektirmeden çalışmaktadırlar [57]. Şekil 4.36’da çift eksen 24 V<sub>DC</sub> hareket aktüatörleri görölmektedir.



Şekil 4.36. Çift eksen 24 V<sub>DC</sub> hareket aktüatörleri [57]

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen verilere göre Güneş enerji sistemlerinin 1 m<sup>2</sup>'lik alana göre günlük toplam güç üretimi Tablo 5.1'de ve Güneş enerji sistemlerinin günlük % verimi Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Güneş enerji sisteminin günlük toplam güç üretimi

Diyarbakır Merkez Tarih	Günlük Sıcaklık Ort. (°C)	Stirling Motor için Verimli Sıcaklık Saatleri (°C) (10:00-14:00)	Rüzgar Şiddeti (m/sn)	Bağıl Nem (%)	Günlük Toplam Güneş Işınım Gücü (Wh/m <sup>2</sup> -Gün)	Sabit FV Panel Günlük Üretim P <sub>gün</sub> (Wh)	Hareketli FV Panel Günlük Üretim P <sub>gün</sub> (Wh)	Stirling Motor Günlük Üretim P <sub>gün</sub> (Wh)
1.11.2015	13,8	18,3	0,4	47,3	3809	321	415	448
2.11.2015	12,5	17,3	0,4	45,1	3685	320	414	445
3.11.2015	11,4	16,6	0,5	49,2	3930	347	439	476
4.11.2015	11,4	17,7	0,3	58,3	3947	331	432	447
5.11.2015	12,1	17	0,7	63,5	1931	169	214	216
6.11.2015	13,7	18,6	0,5	61,8	2505	216	285	297
7.11.2015	13	18,6	0,4	65,1	3846	343	435	476
8.11.2015	13,1	18,6	0,8	65,7	2277	214	260	276
9.11.2015	12,1	15,6	0,9	54,6	1632	142	178	181
10.11.2015	11,1	14,3	0,8	53	1604	144	175	180
11.11.2015	11,2	14,9	0,8	46,5	2476	227	270	291
12.11.2015	12,9	18,7	0,7	51,8	2380	226	262	286
13.11.2015	13,2	17,2	0,4	50,5	3944	343	436	476
14.11.2015	12,6	16	0,4	42,6	3881	345	435	479
15.11.2015	9,1	15,1	0,6	47,5	3963	342	433	469
16.11.2015	9,9	13,5	0,7	69,5	2374	202	255	260
17.11.2015	10	13,5	0,6	90,1	2189	199	245	258
18.11.2015	9	10	0,3	46,8	3496	300	378	384
19.11.2015	8,4	10,8	0,8	50,7	2465	219	270	279
20.11.2015	8,8	12,3	0,2	57	3402	289	365	366
21.11.2015	7,5	11,5	0,3	64,8	3101	272	344	354
22.11.2015	8	11	0,3	58,1	3203	283	356	361
23.11.2015	8,3	13	0,4	53,2	3204	275	348	360
24.11.2015	8,1	12,1	0,3	47,8	3201	271	343	345
25.11.2015	7,9	9,6	0,6	55,6	2072	174	219	221
26.11.2015	10	12,3	0,7	63,3	1992	179	212	228
27.11.2015	11	13,2	0,5	69,7	821	69	87	88
28.11.2015	9,1	12	0,3	71,6	2303	197	248	253
29.11.2015	8,4	8,9	0,6	89,8	1722	147	182	186
30.11.2015	9	9,3	0,5	94	1661	142	178	182
					<b>Toplam</b>	<b>7.248</b>	<b>9.113</b>	<b>9.568</b>

Tablo 5.2. Güneş enerji sistemlerinin günlük % verimi

Gün	Stirling Motor için Verimli Saatler (°C) (10:00-14:00)	Rüzgar Şiddeti (m/s)	Bağıl Nem (%)	Sabit FV panele göre Hareketli FV panelin %verimi	Sabit FV panele göre Stirling Motorlu sistemin %verimi
1.	18,3	0,4	47,3	29,3	39,6
2.	17,3	0,4	45,1	29,4	39,1
3.	16,6	0,5	49,2	26,5	37,2
4.	17,7	0,3	58,3	30,5	35
5.	17	0,7	63,5	26,6	27,8
6.	18,6	0,5	61,8	31,9	37,5
7.	18,6	0,4	65,1	26,8	38,8
8.	18,6	0,8	65,7	21,5	29
9.	15,6	0,9	54,6	25,4	27,5
10.	14,3	0,8	53	21,5	25
11.	14,9	0,8	46,5	18,9	28,2
12.	18,7	0,7	51,8	15,9	26,5
13.	17,2	0,4	50,5	27,1	38,8
14.	16	0,4	42,6	26,1	38,8
15.	15,1	0,6	47,5	26,6	37,1
16.	13,5	0,7	69,5	26,2	28,7
17.	13,5	0,6	90,1	23,1	29,6
18.	10	0,3	46,8	26	28
19.	10,8	0,8	50,7	23,3	27,4
20.	12,3	0,2	57	26,3	26,6
21.	11,5	0,3	64,8	26,5	30,1
22.	11	0,3	58,1	25,8	27,6
23.	13	0,4	53,2	26,5	30,9
24.	12,1	0,3	47,8	26,6	27,3
25.	9,6	0,6	55,6	25,9	27
26.	12,3	0,7	63,3	18,4	27,4
27.	13,2	0,5	69,7	26,1	27,5
28.	12	0,3	71,6	25,9	28,4
29.	8,9	0,6	89,8	23,8	26,5
30.	9,3	0,5	94	25,4	28,2
% Ortalama				25,7	32

SMGTS, FV panelli güneş takip sistemi ve sabit FV panel sisteminin başarımlarını incelemek için örnek tasarım ve elektriksel üretim açısından verim analizi ve karşılaştırma yapılmıştır. 1 aylık süre boyunca aynı

ortamda bulunan tüm dış ortam meteorolojik etkilerine maruz kalan bu sistemlerden alınan veriler Tablo 5.1’de verilmiştir. Söz konusu güneşten elektrik üretim sistemlerinin bulunduğu yerde pyranometre aracılığıyla noktasal olarak güneşten elektrik üretim potansiyeli ölçülmüştür.

Buna göre gün içi 10:00 ile 14:00 arasındaki zaman diliminde sıcaklığının 15°C ve üstü olduğu günlerde, SMGTS’nin FV panelli güneş takip sistemi ve sabit FV panel sisteminden daha fazla enerji ürettiği görülmüştür. SMGTS’nin sabit FV panel sisteminden ortalama yaklaşık %38 oranında daha fazla enerji ürettiği görülmektedir. Gün içi 10:00 ile 14:00 arasında sıcaklığının 15°C’nin altında olduğu günlerde ise SMGTS’nin sabit FV panel sistemine göre ortalama yaklaşık %28 oranında enerji üretildiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 10:00-14:00 saatleri arasındaki sıcaklığın 15°C’nin altında ve üstünde olması durumuna göre elektriksel verim açısından yaklaşık %10 oranında değiştiği görülmüştür.

SMGTS’lerde gün içi 10:00-14:00 arası sıcaklık 15°C’den yüksek olsa dahi rüzgar şiddetinin nisbeten yüksek olduğu günlerde (0,7 m/s ve üstü) verim ortalama %38’lerden %27’lere kadar gerilemektedir. Ayın 5., 8., 9., 10., 11., 12., 16. ve 19. günlerinde rüzgar şiddetinin 0,7 m/s ve üstü olduğu günlerde verimdeki düşüş Wh olarak Tablo 5.1’den ve yüzdelik değişim olarak Tablo 5.2’den görülebilmektedir. Ayın 1., 2., 3., 4., 6., 7. vb. günlerde ise rüzgar hızı 0,7 m/s den düşük iken elektriksel verimin ortalama %38 civarında olduğu Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’den görülmektedir. Buna göre SMGTS’ler rüzgârın çok olduğu yerlerde verim düşüklüğü sorunu yaşamaktadırlar. Çünkü rüzgâr sistemin kendi içinde ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla bir yörede SMGTS vb. yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinin kurulması için yapılacak fizibilite çalışmasında rüzgârlı noktalardan sakınılmalıdır. Sadece sıcaklık değerlerine bakılarak ısı kaynaklı güneşten elektrik üretim yerine karar verilmemelidir. Sıcaklıkla birlikte rüzgâr şiddetine bakılarak karar verilmelidir. Çünkü rüzgâr şiddeti enerji üretim kapasitesini olumsuz etkilemektedir.

Tablo 5.1’den görüleceği gibi bağıl nemin enerji üretimine etkisi olumsuzdur. Bağıl nemin %65’in üzerinde olduğu günlerde yani havada

yağış eğilimi varken rüzgâr şiddetine bakılmaksızın SMGTS'nin enerji üretimi azalmaktadır. Ayın 16., 17., 27., 28., 29. ve 30. günlerinde bağıl nemin enerji üretimine olumsuz etkisi görülmektedir.

Aynı koşullara maruz kalan üretim sistemlerinden 1 aylık süre boyunca alınan verilerin ortalaması hesaplanınca 1 günlük ortalama için sabit FV panel sisteminden elde edilen yaklaşık enerji 241 Wh, FV panelli güneş takip sisteminden 1 günlük ortalama için elde edilen yaklaşık enerji 303 Wh ve SMGTS'den 1 günlük ortalama için elde edilen yaklaşık enerji 318 Wh'dır. Bu ortalamalara göre en verimli üretim kaynağı SMGTS iken en düşük verime sahip sistem ise sabit FV panelli sistemdir.

### **5.1. FV Panellerde Üretimi Etkileyen Çevresel Koşullar**

FV panellerin enerji üretimini etkileyen başlıca çevresel koşullar ortamın sıcaklık etkisi, panelin ekonomik ömrüne ilişkin geçmişi (panelin yeni veya eski oluşu), konuma bağlı olarak gölge etkisi, imalat-montaj sırasında diyot-kablolama kusurları, FV panele güneş geliş açısı ve FV panelin tozlanma-kirlilik etkisi gösterilebilir.

FV panel verimliliğini üretilen enerjideki kayıplar belirler. Kayıplar çevresel koşullardan kaynaklanabildiği gibi tasarımdan, kullanılan malzeme kalitesinden, işçilikten veya panel yüzey kirliliğinden kaynaklanabilir. FV paneller, ortam koşullarının elverişli ve panel yüzeyinin temiz olması durumunda maksimum güçte üretim yapabilir. Bu verimlilik, zamanla panellerin üzerinde oluşan toz, kir, polen, kuş dışkısı ve çeşitli partiküllerin yapışmasıyla azalmaktadır. Kirli ve tozlu bir ortamda kurulan ve sürekli açık alanda kalan güneş panellerinde dış etkiler nedeniyle verim kaybı yaşanmaktadır. Panel kirliliğinin en temel sebepleri;

- Meteorolojik toz taşınımı, kuru ve yağ toz çökmesi,
- Endüstriyel veya ısıtma amaçlı atık, is ve kurum çökmeleri,
- Polen ve çiçek tozlarının panellere yapışması
- Stabilize yol tozları, egzoz gazları ve demiryolu hatlarının etkisi,
- Şebeke suyu ile yıkamada oluşan kireç kalıntıları,
- Yakın ağaçlardan dökülen yaprak, tohum, reçine etkileri,

- Tarımsal ilaçlama toz taşınımları,
- Yüksek nem ve yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan kirler,
- Böcek kalıntıları ve kuş pislikleri

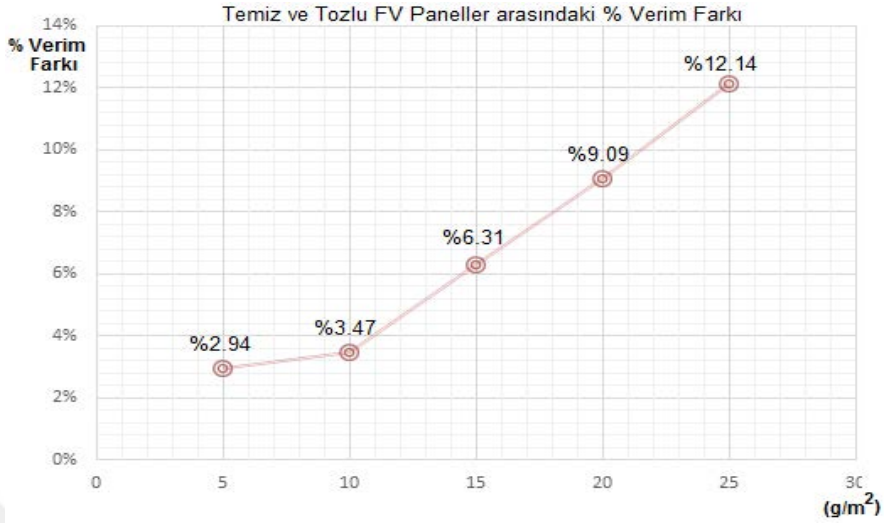
şeklinde sıralanabilir.

FV panel kirlenmesinden kaynaklanan güç kaybı kirlenmenin cinsine, en son yağış itibariyle geçen zamana ve rutin temizlik periyoduna bağlıdır. Yatay düzlemde FV panel eğim açısı 15°'den büyükse yağmurun tozu temizlemede etkili olduğu görülmüş olup, bu açıda tozlanmadan kaynaklanan verim kaybı %0,5 düzeyindedir [58,59]. FV panel açısı 15°'den küçük ise, ya da yağış az-seyrek ise buna ek olarak bulunulan bölge özel bir tozluluk ve endüstriyel kirliliğe maruz kalan bir bölge ise verimlilik kaybı artmaktadır. Ancak özel deneysel çalışmalar dışında, yapılan araştırmalar da FV panel kirlilik düzeyinden kaynaklanan kayıpların nadiren %4'ü aştığı görülmektedir [58].

Kirlilik düzeyinin FV panel üzerindeki olumsuz etkisini gözlemleyebilmek amacıyla yapılan deneyde 1 adet 80 W'lık FV panel yatay düzlemde 15° açıda toz altında bırakılmıştır. Yakılmış kömürden oluşan atık kül ve baca kurumu kullanılarak toz karışımı hazırlanmıştır. 5, 10, 15, 20 ve 25 gr toza maruz bırakılmış FV panelin güç değişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Buna göre tozluluk oranı arttıkça verim %2.94'ten %12.14 oranına kadar düşmektedir.

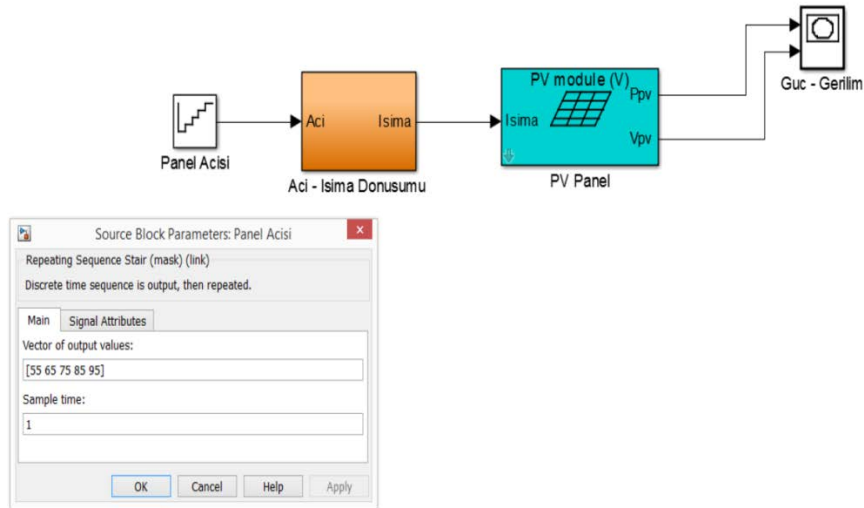
FV paneller tozlandıkça temiz FV panel ile tozlanan FV panel arasındaki enerji üretim farkı artmaktadır. Çünkü eşit koşullar altında yan yana bulunan FV paneller tozlanma düzeyine göre güneş radyasyonundan faydalanarak enerji üretmektedirler. Kirlenen FV panel 5 g/m<sup>2</sup> toza maruz bırakıldığında Temiz FV panel 5.1 W enerji üretirken az tozlu FV panel 4,95 W enerji üreterek, %2.94 oranında daha az enerji üretmiştir. Aynı şekilde 10 g/m<sup>2</sup> toza maruz bırakılan FV panel %3.47 oranında, 15 g/m<sup>2</sup> toza maruz bırakılan FV panel %6.31, 20 g/m<sup>2</sup> toza maruz bırakılan FV panel %9.09 ve 25 g/m<sup>2</sup> toza maruz bırakılan FV panel %12.14 oranında daha az enerji üretmiştir. Buna göre tozlanma arttıkça FV paneller verimi

düşmektedir. Şekil 5.1’de FV panelde tozlanma ve üretilen gücün oransal değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.1. FV panelde tozlanma ve üretilen gücün oransal değişimi

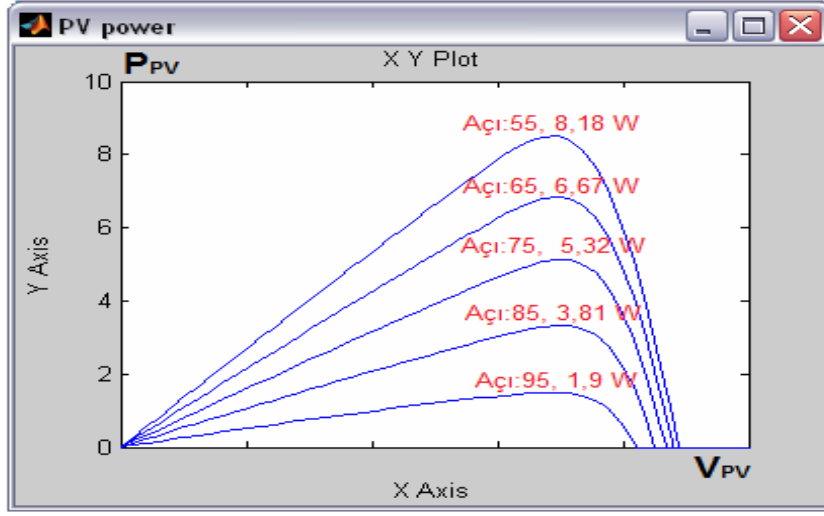
FV panellerin verimini etkileyen önemli bir diğer parametre ise panel eğim açılarıdır. Bu amaçla simülasyon ve gerçek ortamda FV panelin farklı açıları için verim analizi yapılmıştır. Bu çalışmada öncelikle FV panelin eğim açısı matlab simulinkte oluşturulan simülasyon ile simüle edilmiştir. Daha sonra bir FV panelin fiziksel ortamda farklı açılardaki güç üretimi gözlenerek simülasyon ve gerçek güç üretimi karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2’de Simulinkte oluşturulan FV panel modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Simulinkte oluşturulan FV panel modeli

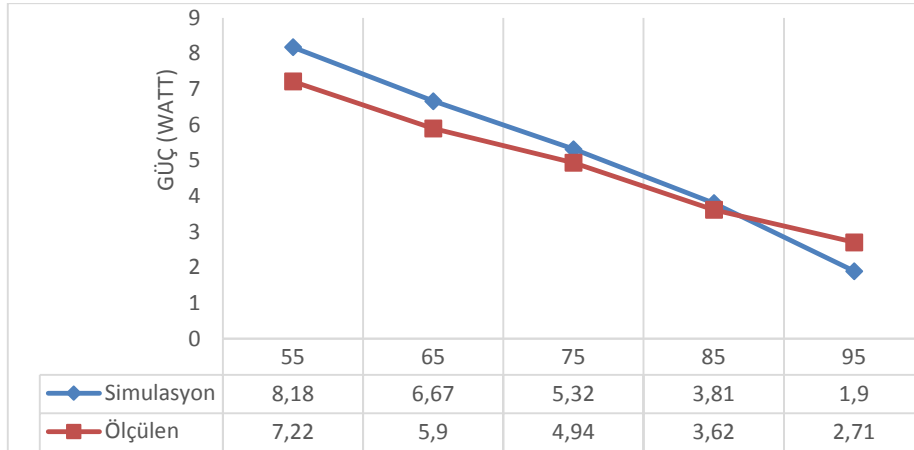
55°, 65°, 75°, 85° ve 95° eğime sahip FV panellerden simülasyon ortamında alınan güç çıkışları sırasıyla 8.18 W, 6.67 W, 5.32 W, 3.81 ve 1.9

W değerlerindedir. Şekil 5.3'te Simulasyona göre farklı açılar için çıkış güçleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Simulasyona göre farklı açılar için çıkış güçleri

Buna göre Şekil 5.3'te Simulasyon ve gerçek panelin farklı açılarda çıkış güçleri gösterilmiş olup, çıkış güçleri incelendiğinde Simülasyon ortamındaki çıkış güçlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi simülasyonda şartların ideal olmasından dolayı verimi düşürücü herhangi bir olumsuz parametre bulunmamaktadır. Şekil 5.4'te de görüldüğü gibi 95° açıda gerçek FV panelin Simülasyondan daha fazla güç ürettiği görülmektedir. Bunun sebebi ise yüzeyden yansıyan güneş ışınlarının FV panele sağladığı ek güçtür. Yansımaya sebep olan yüzey ışığı emen siyah renkli bir pürüzlü kumaş ile örtüldüğünde ise güç çıkışı 1.86 W değerine düşmüştür.



Şekil 5.4. Simulasyon ve gerçek FV panelin farklı açılarda çıkış güçleri

## 5.2. Maliyet Analizi

FV sistemlerin, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmeleri, çevreyi kirletmemeleri, yapılarının basit ve uygulamalarının kolay olmaları en önemli tercih sebebidir. FV sistemler şebekeye bağlı (on grid) ve şebekeden bağımsız (off grid) olarak iki farklı şekilde kullanılmakta olup, sabit ve takip sistemli olarak tasarlanmaktadır.

Uygulama şebekeden bağımsız ve güneş takip eden (tracking) sistemler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Hareketli mekanizma üzerine ayrıca çanak-Stirling motorlu sistem ilavesi yapılarak sistem kurulum maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Şebekeden bağımsız sistemler genellikle şebekeden uzak yerlerde enerji gereksinimini karşılamak için kullanılırlar. Bu tür sistemler genellikle FV panel, şarj düzenleyici (regülatör), akü grubu ve inverter'den oluşmaktadır. Kullanılacak üretim sisteminin maliyet hesabı yapılırken öncelikle şebekeye bağlı olup olmayacağına ve daha sonra hareketli sistem olup olmayacağına karar verilmelidir. Şebeke bağlantılı sistemlerde akü grubu ve sabit FV panelli sistemlerde de takip mekanizması kullanılmaz. Takip mekanizmalı sistemlerde FV paneller hareketli sistemin üzerine yerleştirileceğinden yere montajlanacak sabit konstrüksiyon kullanılmaz. Bu çalışmada şebeke bağlantısız 3 farklı sistem ile üretim yapılarak kurulan sistemlerin maliyet açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Kurulan bu 3 sistem Sabit FV panelli sistem, Güneş takip sistemli FV panel ve SMGTS şeklindedir. Güneş kaynaklı üretim için çeşitli sistemlerin kurulum maliyetleri Tablo 5.6'da görülmektedir.

Tablo 5.6 Güneş kaynaklı üretim için çeşitli sistemlerin kurulum maliyetleri

Üretim Sistemi	Malzeme Cinsi	Özellik	Sayı	Maliyet
Sabit FV Panel	FV Panel	24 V <sub>DC</sub> , 100 W, Mono kristal	1 Ad.	2.420 TL
	Akü Grubu	12 V <sub>DC</sub> , 45 A,	1 Ad.	
	Akü Şarj Cihazı	24 V <sub>DC</sub> , 10 A,	2 Ad.	
	İnverter	24 V <sub>DC</sub> -220 V	1 Ad.	
	Pano		1 Ad	
	Solar Kablo	Solar	20 m	
	Diğer Montaj Elemanları	Konnektörler ve cıvatalar	1 tk.	
	Sabit Konstürüksiyon	Galvanizli köşebent	1 tk.	
Güneş Takip Sistemli FV Panel	FV Panel	24 V <sub>DC</sub> , 100 W, Mono kristal	1 Ad.	3.270 TL
	Akü Grubu	12 V <sub>DC</sub> , 45 A,	1 Ad.	
	Akü Şarj Cihazı	24 V <sub>DC</sub> , 10 A,	2 Ad.	
	İnverter	24 V <sub>DC</sub> -220 V	1 Ad.	
	Pano		1 Ad.	
	Solar Kablo	Solar	20 m	
	Diğer Montaj Elemanları	Konnektörler ve cıvatalar	1 tk.	
	Güneş Takip Mekanizması		1 Ad.	
Güneş Takip Sistemli Stirling Motor	Stirling Motor	İmalat ve malzeme dahil,100 W	1 Ad.	3.320 TL
	Çanak Yansıtıcı	Yansıtıcı folyo ile kaplanmış	1 Ad.	
	Akü Grubu	12 V <sub>DC</sub> , 45 A,	1 Ad.	
	Akü Şarj Cihazı	24 V <sub>DC</sub> , 10 A,	2 Ad.	
	İnverter	24 V <sub>DC</sub> -220 V	1 Ad.	
	Pano		1 Ad	
	Solar Kablo	Solar	10 m	
	Güneş Takip Mekanizması		1 Ad.	

Kurulumu yapılan 3 ayrı sistemde günlük, ortalama üretim Sabit FV panel için 241 Wh, Güneş Takip sistemli FV panel için günlük ortalama 303 Wh ve SMGTS'de ise günlük ortalama 319 Wh kadar gerçekleşmiştir. 2016 yılı güncel fiyatlarıyla yapılan maliyet araştırmasına göre oluşturulan bu sistemlerden Sabit FV Panel 2.420 TL'ye, Güneş Takip Sistemli FV Panel 3.270 TL'ye ve SMGTS ise 3.320 TL'ye mal olmuştur (Seri üretim yapılması durumunda Stirling motorlu sistemin maliyeti yaklaşık %33 düşürülebilir).

Güncel fiyatlarla elektriğin kwh başına maliyeti 2016 yılı itibariyle 0.411 TL iken Sabit FV Panel sistem 5.888 kwh, Güneş Takip Sistemli FV Panel 7.956 kwh ve SMGTS ise 8.077 kwh enerji bedeline karşılık gelen bir maliyetle kurulmuştur. Aylık 400 kwh harcayan yani 164.40 TL elektrik faturası ödeyen bir tüketici bu maliyeti Sabit FV panelde 15 ayda, Güneş Takip Sistemli FV panel de ve SMGTS'de için 20 ayda ödeyebilmektedir. Dolayısıyla her 3 sistemde de kısa vade de sistem kurulum maliyetleri karşılanabilmektedir.

Kurulum maliyeti açısından ise Sabit FV panele göre Güneş Takip sistemli FV panel %35 daha pahalı ve SMGTS'de ise Sabit FV panele göre %37 daha pahalıdır. Ancak Elektriksel verim açısından bakıldığında ise 1 aylık süre boyunca sabit FV panel 7.248 Wh enerji üretirken, Güneş takip sistemli FV panel 9.113 Wh enerji üretmiş ve SMGTS ise 9.568 Wh enerji üretmiştir. Buna göre Güneş takip sistemli FV panel, sabit FV panele göre üretim açısından %25 daha verimliyken, SMGTS ise sabit FV panele göre üretim açısından %32 daha verimlidir.

Her 3 üretim sistemi elde edilen sonuçlara göre değerlendirildiğinde SMGTS'nin kısmen pahalı olmasına karşın en verimli üretim yöntemi olduğu görülmüştür. Sistem dengesi açısından yani maliyet-verim performansı açısından SMGTS'nin ortalama sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu yerlerde kullanılabilceği görülmüştür.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Aylık bazda her üç sistem için üretilen tüm enerjinin karşılaştırması yapıldığında sabit FV panelden 7.248 Wh, FV panelli güneş takip sisteminden 9.113 Wh ve SMGTS'den 9.568 Wh enerji üretilmiştir. Yüzdelerim verim açısından bakıldığında ise FV panelli güneş takip sistemi sabit FV panel sistemine göre yaklaşık %25.7 oranında daha verimliyken, SMGTS ise sabit FV panel sistemine göre yaklaşık %32 oranında daha fazla enerji üretmiştir. SMGTS ise FV panelli güneş takip sistemine göre %6.3 oranında daha fazla enerji üretmiştir.

Sıcaklık etkisinin FV paneller üzerinde yarattığı etki gözlenmemiştir. Çünkü sıcaklık değerleri FV panellerin verimini düşürecek kadar yükselmemiştir. Ancak literatürde yüksek sıcaklık değerlerinin FV panellerde %20'ye kadar verimi düşürdüğü bilinmektedir.

Stirling motorlar literatürde ısı motoru olarak da anılmaktadırlar. Yani ısı farkıyla çalışan bir yapıda olduklarından Stirling motorun ısınan ucu ile soğutmayı sağlayan ucu arasındaki ısı farkının yüksekliği oranında verim artışı görülmektedir. Stirling motorun ısınan ve soğutma yapan uçları arasındaki ısı farkını artırabilmek için farklı hammaddeler kullanılarak ANSYS 13.5 programında hazırlanan simülasyonla elektriksel verimin arttığı görülmüştür. Bu konuda Patent/Faydalı model başvurusu yapılmıştır. Patent/Faydalı model başvurusu 2015 yılı Aralık ayı itibariyle araştırma aşamasındadır.

Stirling motorlarda displacer borusu üzerindeki ısıyı arttırarak elektriksel üretimin arttırmaya çalışılması bazı tip displacer boruları üzerinde fiziksel deformasyonlara, ek maliyetlere ve kontrol edilemeyen sıcaklık değerleri nedeniyle iş kazalarına sebep olmaktadır. Stirling motorlarda giriş kaynak sıcaklığını arttırmak yerine displacer borusunda uçlar arası sıcaklık farkının arttırılması yöntemi, elektriksel güç üretimini arttırarak kazanç miktarını yükseltmektedir.

Nihai sonuç olarak Türkiyede ısı kaynaklı yoğunlaştırılmış güneş enerji üretim sistemlerinin kullanımına geçilmelidir. Türkiye'ye benzer iklimdeki İspanya yoğunlaştırılmış sistemlerle güneşten elektrik üretiminde 2000 yılı sonrası 10 yıllık zaman diliminde dünyada 4. sıraya yükselmiştir. Bu nedenle rüzgâr şiddeti düşük olan noktalara kurulmak üzere Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu, Ege ve Akdeniz Bölgelerinde ısı kaynaklı yoğunlaştırılmış güneş enerji üretimi benimsenmelidir. Doğu Anadolu bölgesinde ise FV panelli sistemlere devam edilmelidir. Zaten doğu anadolunun meteorolojik ve fiziksel koşulları panel sistemlerini çokça kullanan Almanya gibi ülkelere uygundur. Bu durumun doğruluğu dünya haritası üzerinde Türkiye ve İspanya'nın aynı enlem üzerinde oluşuyla Şekil 4.17'den teyit edilebilir.

Bu sonuçlar dışında dolaylı olarak ulaşılan sonuçlar;

1. Ülkemiz sınırları içinde ısı kaynaklı güneş enerji potansiyelinin FV panel sistemlerinden daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca sabit FV panel sistemlerinde olumsuz etkiye neden olan ısı faktörünün SMGTS'lerde verimliliğe katkısı oransal olarak tespit edilmiştir.
2. Stirling motorun fiziksel olarak uygulaması yapılmıştır. Yani herhangi bir simülasyona gerek duyulmadan ülkemiz koşullarında sıcaklık, nem, rüzgâr, toz vb. tüm meteorolojik dış etkilere maruz kalan bir uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle uygulama esnasında karşılaşılan problemlere anında müdahale edilerek, verim artırıcı ıslah çalışmaları yürütülmüştür. Uygulamanın gerçekleştirildiği yerdeki reel yapıya uygun, özgün ve yüksek verimli bir tasarım geliştirilmeye çalışılmıştır.
3. Söz konusu SMGTS, FV panelli güneş takip sistemi ve sabit FV panel sisteminin uygulaması esnasında oluşabilecek kusur ve eksikliklerin giderilmesinde çalışmayı yapan akademik personele tecrübe açısından katkı sağlamıştır.
4. Sistem çalışma sıcaklığı artırılarak elektriksel verim yükseltilmiştir.
5. Doğrudan güneşten elektrik üretilmesine dair sistemlerin geliştirilmesine uygulanabilirlik açısından katkı sağlanmıştır.

6. Sistem ömrünün ve sistem güvenilirliğinin, verim ve mekanik dayanımı iyileştirilmiştir.
7. Şebeke bağlantısız (Off grid) sistemlerde kullanılacak az yer kaplayan SMGTS gibi yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinin kullanılması fikrine katkı sağlanmıştır.
8. Bu çalışma sayesinde FV panel sistemleri yerine ısı kaynaklı sistemlerin enerji üretim kapasitesi yönünden daha verimli olduğu ispatlanmıştır ve bu yönde gerek akademik gerekse endüstriyel alanda daha fazla çalışma yürütüleceği öngörülmektedir.
9. Yerli üretim tercih edilerek imalat ve kurulum maliyetlerinin düşürülebileceği düşünülmektedir.

## 6.2. Öneriler

Displacer borusunun iç yüzeyinde sürtünmeyi önleyecek, sürtünme katsayısının minimum seviyeye çekecek bir kaplama yapılması suretiyle displacer pistonunun çalışması esnasında sürtünmeden kaynaklanan verim düşüşünü önlemeye yönelik bir çalışma yapılabilir.

Stirling motorlarda soğuk uç tarafının imal edildiği malzemeyi ısı iletim katsayısı düşük kompozit maddelerden imal ederek düşük sıcaklıkta elektriksel verim artışının sağlanmasına yönelik bir uygulama çalışması yapılabilir. Yine Stirling motorlarda ısı girişinin olduğu displacer borusu ucunda ise ısıyı iyi ileten ancak ısı karşısında fiziksel deformasyona uğramayan kompozit malzemeden imal edilmiş hammaddeler kullanılabilir.

Stirling motorlu güneş takip sistemini yüksek rakımlı yerlerde kurarak, rüzgâr etkisiyle oluşan ısı kaybını önlemek amacıyla bu sistemin cam küre içine alınmasıyla Stirling motorlarda elektriksel üretim kapasitesi araştırılabilir.

SMGTS'nin bir sonraki basamağı olabilecek Güneş-Hibrid sistemlerin uygulanabilirliğini görmek amacıyla gündüz güneşten faydalanarak yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri ile elektrik üreten gece saatlerinde ise biyogaz veya diğer yakıtlar ile çalışan bir üretim sisteminin uygulaması yapılabilir.

Stirling motorlarının güneş enerjisi uygulamaları, evlerin iklimlendirilmesi ve eş zamanlı elektrik üretimi gibi uygulama alanlarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Güneş enerjisinin yaygın biçimde elektrik üretiminde kullanılabilmesi için, taşınabilir portatif boyutlarda düşük güçlü bireysel kullanıma uygun sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] S. Pizzini, *Towards solar grade silicon: Challenges and benefits for low cost photovoltaics*, **Sol. Ener. Mater. Sol. Cells**, 94: 9, (2010), 1528–1533.
- [2] A. Muller, M. Ghosh, R. Sonnenschein and P. Woditsch, *Silicon for photovoltaic applications*, **Mater. Sci. Eng. B**, 134:1 (2006) 257–262.
- [3] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, Heat Source Solar Energy Use in Turkey and in the World and Efficiency Evaluation of CSP Stirling Engine System. International Symposium Eurasia Energy Issues, İzmir, Turkey, May. 28-30, (2015), pp. 503-523.
- [4] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, *A Research On Determining The Panel Inclination Angle In Terms Of The Place And Seasons*, **J. Multidisciplinary Eng. Sci. Techn.**, 2:8 (2015) 2172-2177.
- [5] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, *Price-Efficiency Relationship for Photovoltaic Systems on a Global Basis*, **Int. J. Photoenergy**, 2015(2015), Article ID 506101, 12 pages.
- [6] J.F. Nijs, J. Szlufcik, J. Poortmans, S. Sivonthaman, and R.P. Mertens, *Advanced Manufacturing Concepts for Crystalline Silicon Solar Cells*, **IEEE Trans. Elec. Dev.** 46:10 (1999), 1948-1969.
- [7] C. Ballif, *Innovative Forschungsprojekte im Bereich Solar und Photovoltaik EPFL*, Institute of Microengineering, IMT, Photovoltaics and thin film electronics laboratory, **Neuchâtel, Energie-Cluster**. 5:1 (2011) 1-18.
- [8] M.L. Ghai, *Small solar power plants: Solar Energy Research*, London, 1955, p. 357-371.
- [9] F. Dinçer, F. *The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy*, **Renew. Sustain. En. Rev.**, 15:1, (2011) 713-720.
- [10] S. Mehta, *Production and Cost Outlook: 2010 –2015 PV Technology*. **GTM Res. Webinar**, 1:1 (2011) 1-27.
- [11] M.S. Cengiz, M.S. Mamiş M. Akdağ and Ç. Cengiz, A Review of Prices for Photovoltaic Systems: The 11th International Conference Technical Physical Problems of Engineering, Bucharest, Romania, Sep. 10-12, (2015), pp. 300-305.
- [12] M.S. Cengiz, M.S. Mamiş M. Akdağ and Ç. Cengiz, *A Review of Prices for Photovoltaic Systems*, **Int. J. Techn. Phy. Prob. Eng.**, 7:3 (2015) 8-13.
- [13] Güneş enerjisi ve teknolojileri. (2015). <http://yesilenerjimiz.blogspot.com.tr/> (on-line Access on 1 Aug, 2015).
- [14] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, Endüstriyel Tesislerde Verimlilik ve Güneş Enerjisi Kullanımı.VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi, Sakarya, Türkiye, Haz. 4-6, (2015), pp.21-25.
- [15] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, *Solution Offers for Efficiency and Savings in Industrial Plants*, **Bitlis Eren Univ. J. Sci & Technol.** 5:1 (2015) 24-28.

- [16] S. Rüstemli, F. Dinçer, M. Çelik and M.S. Cengiz, *Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri*, **Bitlis Eren Univ. Fen. Bil. Der.**, 2:2 (2013) 141-147.
- [17] S. Odeh and M. Behnia, *Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling*, **Heat Trans. Eng.**, 30:6 (2009) 499-505.
- [18] S. Rüstemli and Z. İlcihan, Güneş Takip Sistemi Uygulamasının Enerji Kazancına Etkisi: VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Programı, Adana, Türkiye, Ekim 15-16, (2015).
- [19] Güneş takip sistemleri. (2015). <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/gunes-takip-sistemleri-bolum-1/4281#ad-image-0> (on-line Access on 12 May, 2015).
- [20] Hacer Akhan. *Güneş enerjili sıcak hava motoru*, Master Thesis, Trakya University, Turkey, 2007.
- [21] M.S. Cengiz and M.S. Mamiş, *A Review of Past-to-Present Literature for Stirling Engines*, **Int. J. Sci. Techn. Res.** 1:6 (2015) 10-19.
- [22] Stirling engines. (1862). <http://www.google.com/patents/US3117414> (on-line Access on 1 Oct, 2015).
- [23] F. Wu, L. Chen, F. Sun and C.Wu, *Finite-time exergoeconomic performance bound for a quantum Stirling engine*, **Int. J. Eng. Sci.** 38:2 (2000) 239–247.
- [24] F. Daniels, *Direct use of the sun's energy*, Yale University Press, New Haven, 1964, 73-203.
- [25] J. Ericsson, *Sun power; the solar engine*, Contributions to the Centennial Exhibition, (1870), 571–577.
- [26] R.C. Jordan and W.E. Ibele, (1955), *Mechanical energy from solar energy*, **Appl. Sol. En.**, 1:1 (1955) 81–101.
- [27] L.C. Spencer, *A comprehensive review of small solar-powered heat engines: Part I. A history of solar-powered devices up to 1950*, **Sol. Energy** 43:4 (1989) 191–196.
- [28] B. Kongtragool and S. Wongwises, *Performance of low-temperature differential Stirling engines*, **Renew. Energy.** 32:4 (2007) 547-566.
- [29] G.T. Reader and C. Hooper, *Stirling engines*, Cambridge University Press, London, 1983, 15-75.
- [30] W.D Childs, A.E. Dabiri, H.A. and Al-Hinai and H.A. Abdullah, *VARI-RO solar-powered desalting technology*, **Desalination**, 125:1/3 (1999) 155-166.
- [31] Y.D. Goswami, Solar thermal power technology present status and ideas for the future, **Energy Sour. Part A**, 20:2 (1998) 137-145.
- [32] R.K. Gupta, A.M. Deshpande and K.M. Brave, *Development of 1 kW solar powered reciprocating engine for rural application*, **Int. Sol. Energy** 5:1 (1978) 2016-2020.

- [33] J.M. Pearce, B.A. Al Zahawi, D.W. Auckland, and F. Starr, *Electricity generation in the home: evaluation of single-house domestic combined heat and power*, **IEEE Proc-A**, 14:3, (1996) 345-350.
- [34] Walker G. *Stirling Engines*, Oxford, Clarendon Pres, 1980, 1-140.
- [35] Stirling Engine. 2014. [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) (on-line Access on 2 Oct, 2015).
- [36] Adiabatic Simulation of Stirling Engines v.1.x. 2014. <http://zigherzog.net/stirling/simulations/IdealAdiabatic/> (on-line Access on 2 May 2015).
- [37] Zirconium. 2012. <https://en.wikipedia.org/wiki/Zirconium> (on-line Access on 14 Jun, 2015).
- [38] Demir. 2012. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Demir> (on-line Access on 14 Jun, 2015).
- [39] ANSYS-Simulation Driven Product Development (ANSYS 13.5). 2014. [www.ansys.com](http://www.ansys.com) (on-line Access on 6 May 2015).
- [40] C.E. Andraka, R.B. Diver, and D.A. Wolf, Design, fabrication, and testing of a 30 kW screen-wick heat-pipe solar receiver. In "27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, CA, USA, Aug, 3-7, (1992).
- [41] D. Mills, *Advances in solar thermal electricity technology*, **Sol. Energy**, 76:1 (2004) 19-31.
- [42] M. Šúri, T.A. Huld, E.D. Dunlop, and H.A. Ossenbrink, 2007. *Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries*, **Sol. Energy**, 81:1 (2007) 1295–1305.
- [43] T. Huld, R. Müller, and A. Gambardella, *A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa*, **Sol. Energy**, 86:1 (2012) 1803-1815.
- [44] D.G. Thombare and S.K. Verma, *Technological development in the Stirling cycle engines*, **Ren. Sustain. Energy Rev.** 12:1 (2008) 1-38.
- [45] L. Scollo, P. Valdez and J. Baro'n, *Design and construction of a Stirling engine prototype*, **Int. J Hydrogen Energy**, 33:4 (2008) 3506 – 3510.
- [46] Akyol, Ş.M. and M. Kılıç, *Güneş enerjisi kaynaklı bir stirling motorun matlab simulink ile modellenmesi*, **Uludağ Ü. Müh-Mim. Fak. Der.**, 17:1, (2012) 51-62
- [47] H. Karabulut, F. Aksoy, and E. Öztürk, *Thermodynamic analysis of a Beta type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever*, **Ren. Energy**, 34 (2009) 202-208.
- [48] Y.Ö. Özgören, *Stirling motorunda termal bariyer kaplamanın motor performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi*, **Selçuk U. J. Techn.-Onl**, 4:3 (2005) 122-133.
- [49] F. Hoehn and A. McDaugal. Design of a prototype Stirling laboratory research engine, 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, CA, USA, Feb, 1-2, (1978).

- [50] C. Çınar, A. Koca and H. Karabulut, *Farklı çalışma gazlarının Stirling motorunun performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi*, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 20:2 (2005), 247-250.
- [51] H. Karabulut, S. Yücesu, A. Koca, *Manufacturing and testing of a V-type Stirling engine*, **Turkish J Eng. Env. Sci.**, 24:2 (2000) 71-76.
- [52] Mehmet Demiralp, *Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı*, PhD Thesis, Gazi University Turkey, 2000.
- [53] EPDK Rüzgar ve Güneş Ölçüm Standartı Tebliği. 2012. <http://gensed.org/CF/CD/13437f4ec43c83f0a3c65b0a602f29f6e6d41387895921.pdf> (on-line Access on 22 Nov, 2015).
- [54] Dokunmatik Ekranlı Hava İstasyonu PCE-FWS 20. 2015. <http://www.pce-cihazlari.com.tr/teknik-bilgiler/dokunmatik-ekranli-hava-istasyonu-pce-fws-20.htm> (on-line Access on 7 Dec, 2015).
- [55] 4'lü 5V Röle Kartı. 2015. <http://www.kartalotomasyon.com.tr/4lu-5V-Role-Karti,PR-55638.html> (on-line Access on 1 Oct, 2015).
- [56] MikroDEV Bilişim Teknolojileri, Uzaktan Kontrolde Yeni Bir Ürün PLC MP200. 2015. <http://www.otomasyondergisi.com.tr/arsiv/yazi/55-uzaktan-kontrolde-yeni-bir-urun-plc-mp200#sthash.qHWr8KZz.dpuf> (on-line Access on 2 Dec, 2015).
- [57] Lineer Aktuatör. 2015. <http://www.redomak.com.tr/lineeraktuator.html> (on-line Access on 2 Oct, 2015).
- [58] Kymakis, E., Kalykakis, S. and Papazoglou, T.M.. *Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Park on the Island of Crete*. **Ener. Conver. Manag.**, 50:3, (2009) 433-438.
- [59] Detrick, A., Kimber, A. and Mitchell, L. (2005). *Performance Evaluation Standards for Photovoltaic Modules and Systems*, Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference, pp. 1581-1586, ISBN 0-7803-8707-4, Lake Buena Vista, USA, January 2005.

## EKLER

### EK 1



Şekil 1. SMGTS kurulumuna hazırlık



Şekil 2. Yansıtıcı çanak ve aktüatörler



Şekil 3. Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlü hareket aktüatörleri



Şekil 4. SMGTS montaj çalışmaları



Şekil 5. SMGTS montaj çalışmaları



Şekil 6. SMGTS'ye ait kurulumu tamamlanmış sistem görünümü



Şekil 7. SMGTS elemanları görünümü



Şekil 8. SMGTS'nin odaklama yapmış hali

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad** : Mehmet Sait Cengiz

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Diyarbakır, 1976

**E-Posta** : msaitcengiz@gmail.com

**Yüksek Lisans** : Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüzüncü Yıl Üniversitesi

### Mesleki Deneyim:

- TEDAŞ Genel Müdürlüğü, AR-GE Proje Müdürlüğü (2000-2010)
- Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Öğr. Gör. (2010-2013)
- Bitlis Eren Üniversitesi, Öğr. Gör. (2013-...)

### Tezden Üretilen Projeler :

- Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından EEEAG-115E680 proje nosuyla “Stirling Motorlu Güneş Takip Sistemlerinin Tasarımı ve Fotovoltaik Panel Sistemiyle Verim Yönünden Karşılaştırılması” adlı projeye desteklenmektedir. (Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Mehmet Salih Mamiş, Bütçe: 29.138,00 TL).

### Tezden Üretilen Yayınlar / Sunumlar:

1. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Price-Efficiency Relationship for Photovoltaic Systems on a Global Basis, *International Journal of Photoenergy*, 2015 (2015), Article ID 256101, 12 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/256101>. (SCI-E)
2. Cengiz M.S., Mamiş M.S., (2015). Heat Source Solar Energy Use in Turkey and in the World and Efficiency Evaluation of CSP Stirling Engine System. *International Symposium On Eurasia Energy Issues*, pp. 225-236, 28-30 May 2015, İzmir.
3. Cengiz M.S., Mamiş M.S., (2015). Endüstriyel Tesislerde Verimlilik ve Güneş Enerjisi Kullanımı *VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, pp. 21-25, Sakarya, Türkiye
4. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Akdağ M., Cengiz Ç., (2015). A Review of Prices for Photovoltaic Systems, *The 11th International Conference Technical Physical Problems of Engineering*, pp. 300-305, 10-12 September 2015, Bucharest, Romania
5. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Solution Offers for Efficiency and Savings in Industrial Plants, *Bitlis Eren Universty Journal of Science & Technology*. 2015, 1, pp. 24-28.
6. Cengiz M.S., Mamiş M.S., A Research On Determining The Panel Inclination Angle In Terms Of The Place And Seasons, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 2015, 2(8), pp. 2172-2177.

7. Cengiz M.S., Mamiş M.S., A Review of Past-to-Present Literature for Stirling Engines, *International Journal of Scientific and Technological Research*. 2015, 1(6), pp. 10-19.
8. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Akdağ M., Cengiz Ç., A Review of Prices for Photovoltaic Systems, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2015, 7(3), pp. 8-13.
9. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Thermal Solar Energy Use and Turkey Analysis, *B.E. Univ Sci & Technol*. 2015, 5(2), pp. 88-91.
10. Cengiz M.S., Mamiş M.S., (2016). Analysis of Electrical Efficiency in Stirling Engine for Temperature Increase, *International Workshop on Special Topics on Polmeric Composites*, pp. 68-73, 24-26 February, Izmir, Turkey
11. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Yurci Y., (2016). Solar Energy and Stirling Engine, *International Conference on Natural Science and Engineering*, pp. 2301-2306, 19-20 March, Kilis, Turkey
12. Cengiz M.S., Mamiş M.S., (2016). The Determination of the Optimum Parameters for Maximum Efficiency in Solar Tracking systems with Stirling Engine, *International Conference on Natural Science and Engineering*, pp. 2291-2300, 19-20 March, Kilis, Turkey
13. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Thermal Solar Energy Use and Efficiency Analysis of CSP Systems, *BEU Fen Bilimleri Dergisi*, 2016, 5(1), (In press).
14. Cengiz M.S., Mamiş M.S., Cost Comparison of Constant and Tracking System Panels with Stirling Motor-Operated Systems, *Bitlis Eren Universty Journal of Science & Technology*, 2016, 6(1), (In press).

#### **Tezin Diğer Çıktıları :**

- 2015/10764 nolu, “Stirling Motorlarda Displacer Uçlarında Isı Farkıyla Elektriksel Verim Artışının Sağlanması” adlı patent başvurusu araştırma aşamasındadır.

#### **Yazarın Daha Önceki Yayınları:**

#### **SSCI, SCI, SCI-E kapsamındaki Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:**

- Cengiz M.S., Rustemli S., The Relationship Between Height and Efficiency and Solution Offerings in Tunnel and Sub-Sea Tunnels, *Light Engineering*, 2014, 22(2), pp. 76-83.
- Rustemli S., Cengiz M.S., Active filter solutions in energy systems, *Turkish Journal of Electical Engineering & Computer Sciences*, 2015, 23(6), pp. 1587-1607.