

**STIRLING ÇEVİRİMİ KULLANAN ÇANAK TİPİ
YOĞUNLAŞTIRICI GÜÇ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ
VE MODEL BİR SİSTEMİN TASARLANMASI**

**ANALYZING DISH-TYPE CONCENTRATING SOLAR
POWER SYSTEMS, USING STIRLING CYCLE AND
MODELING A PROTOTYPE**

GÜLİN ACAROL ZİLANLI

PROF. DR. AYNUR ERAY

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak hazırlanmıştır.

2013

GÜLİN ACAROL ZİLANLI'nın hazırladığı “Stirling Çevrimi Kullanan Çanak Tipi Yoğunlaştırıcı Güç Sistemlerinin İncelenmesi ve Model Bir Sistemin Tasarlanması” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan

(Dr. Tolga PIRASACI)

.....

Danışman

(Prof. Dr. Aynur ERAY)

.....

Üye

(Yrd. Doç. Dr. Şule ERGÜN)

.....

Üye

(Yrd. Doç. Dr. Akın BACIOĞLU)

.....

Üye

(Dr. Özgür EKİCİ)

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28/08/2013

GÜLİN ACAROL ZİLANLI

ÖZET

STIRLING ÇEVİRİMİ KULLANAN ÇANAK TİPİ YOĞUNLAŞTIRICI GÜÇ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE MODEL BİR SİSTEMİN TASARLANMASI

Gülin ACAROL ZİLANLI

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aynur ERAY

Ağustos 2013, 140 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, iki farklı ticari parabolik çanak-Stirling sistemi olan SES (Stirling Energy Systems) ve WGA (WGAssociates) sistemleri için belirlenen yerleşim bölgelerinde, SAM (System Advisor Model) modelleme programı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Modellemeler, her iki sistemin de kuruldukları yer olan Amerika'da bulunan Albuquerque yerleşimi, Türkiye'de bulunan Van ve Ankara yerleşimleri için gerçekleştirilmiştir. Öncelikle enerji çıktısı değerleri ve sistem kayıpları göz önüne alınarak parabolik çanak-Stirling sisteminin parametrelerinin optimizasyonu yapılmış, daha sonra 600 kW kurulu güçte SES ve WGA sistemlerinden oluşacak güneş tarlası yerleşim seçenekleri incelenmiştir. En uygun yerleşim seçeneği elde edildikten sonra, parametrik analizden çıkan optimum değerler kullanılarak seçilen yerleşim bölgeleri için sistem modellemesi yapılmış ve modellemeler sonucunda, çıkış enerjileri ve verimlere bakılarak, bu teknolojinin Türkiye için uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Parabolik Çanak Stirling, modelleme, System Advisor Model

ABSTRACT

ANALYZING DISH-TYPE CONCENTRATING SOLAR POWER SYSTEMS, USING STIRLING CYCLE AND MODELING A PROTOTYPE

Gülin ACAROL ZİLANLI

Master of Science, Renewable Energies

Supervisor: Prof. Dr. Aynur ERAY

August 2013, 140 pages

As part of this study, solar energy systems equipped with parabolic dishes and utilizing a Stirling engine are analyzed. Two different commercial systems, SES (Stirling Energy Systems) and WGA (WGAssociates), are modeled using the SAM (System Advisor Model) modeling software in designated settlement areas. Both systems are modeled for the US state of Albuquerque, where they were designed, and Turkish provinces of Ankara and Van. First, the dish/Stirling system is optimized in light of the power output values and the system loss parameters. Then, running with an installed capacity of 600kW and comprising of SES and WGA systems, the layout of the solar fields is designed. Upon securing the most suitable layout, the system is modeled for the aforementioned settlements using the optimum output values gathered from the parametric analysis. As a result of the modelings performed, the applicability of this model is discussed in the light of the power output and efficiency data.

Keywords: Dish/Stirling Systems, Modelling, System Advisor Model

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince hem mesleğine hem de hayata yaklaşımı ile bana her zaman örnek olan, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Aynur ERAY'a,

Benden yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sermet ERAY'a,

Sevgisi ve sabrı ile tüm kalbiyle yanımda olan, verdiğim tüm kararlarda her zaman arkamda duran, benden hiçbir zaman ilgisini ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Harun Öcal ZİLANLI'ya,

Hayatım boyunca her durumda beni sonuna kadar destekleyen ve yanımda olan, uzakta olsalar da her zaman sevgi ve ilgilerini çok yakından hissettiren annem Gülgün ÇANDAR ACAROL ve babam Hüseyin ACAROL'a,

İlgisi ve manevi desteği sayesinde kendimi iyi hissetmemi sağlayan, aynı zamanda üniversite hayatıma başlarken tanıştığım ilk kişi olan sevgili arkadaşım, dostum Melis BİLGİÇ AKSARI'ya,

Çalışmalarım boyunca bana manevi destek veren ailem ve arkadaşlarıma,

Bana sıcak bir çalışma ortamı sağlayan ve akademik hayata başlangıcında desteklerini esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Murat TUNCER'e,

Ankara ve Van illeri için meteorolojik verilerinin sağlandığı METEONORM firmasına,

tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. PARABOLİK ÇANAKLI YOĞUNLAŞTIRMALI GÜNEŞ GÜÇ SİSTEMLERİ	18
2.1. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırmalı Güneş Güç Sistemi Bileşenleri	20
2.1.1. Yoğunlaştırıcı Parabolik Çanak	20
2.1.2. Alıcı/Soğurucu	26
2.1.3. Güç Çevrim Ünitesi.....	28
2.2. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırmalı Güneş Güç Sistemlerinde Kayıplar ...	38
2.2.1. Parabolik Çanak Kayıpları	38
2.2.2. Alıcı Kayıpları	39
2.2.3. Stirling Motoru Kayıpları	46
2.3. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırmalı Güneş Güç Sistemlerinin Tasarımında Kullanılan Yazılımlar	47
3. SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL) PROGRAMI.....	49
3.1. SAM Programı ile Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırmalı Güç Sistemi Tasarımı ve Tasarım Aşamaları.....	54
4. SAM KULLANILARAK SİSTEM TASARIMI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	70
4.1. SES ve WGA Sistem bileşen parametrelerinin optimizasyonu	70
4.1.1. Parabolik Çanak	71
4.1.2. Alıcı.....	73
4.1.3. Parasitics	92
4.2. SES Ve WGA Sistemlerini Kullanarak Farklı Yerleşim Düzenlenimleri İçin Sistem Tasarımı	104
4.2.1. Güneş Tarlası Yerleşim Planlaması.....	104
4.2.2. Sistem Çıktılarının İncelenmesi	107

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR.....	128
EK 1.....	131
EK-2.....	136
ÖZGEÇMİŞ.....	140

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. 2000-2012 yılları arasında dünya çapında fotovoltaik sistem kurulu güç gelişimi	3
Şekil 1.2. 1984-2012 yılları arasında kurulan yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemlerinin kurulu güç gelişimi	3
Şekil 1.3. Yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi sistemlerinin şematik gösterimi	4
Şekil 1.4. (a) Parabolik oluklu güneş güç sistemi şematik gösterimi (b) Merkezi alıcılı güneş güç sistemi şematik gösterimi (c) Doğrusal Fresnel yansıtıcılı güneş güç sistemi şematik gösterimi (d) Parabolik çanaklı güneş güç sistemi şematik gösterimi.....	6
Şekil 1.5. En eski parabolik çanaklı motorlu elektrik üretim sistemi.....	8
Şekil 1.6 (a) SES sistemi (b) Kockums 4-95 güç çevrim ünitesi	11
Şekil 1.7. (a) WGA ADDS Mod 1 Parabolik Çanak Stirling sistemi (b) SOLO 161 Güç Çevrim Ünitesi	12
Şekil 1.8. PowerDish parabolik çanak-stirling sistemi.....	14
Şekil 2.1. Örnek bir parabolik çanaklı yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemi	19
Şekil 2.2. Parabolik çanak kesiti /parabol	21
Şekil 2.3. Ortak bir odak noktası için kenar açısı değişimleri.....	22
Şekil 2.4. Yoğunlaştırıcı yüzey vasıtasıyla, güneşten alıcıya yapılan ışınım transferinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.5. Dış ve kovuklu alıcılar	27
Şekil 2.6. (a) DIR tipi alıcı (b) IIR tipi alıcı	28
Şekil 2.7. Stirling Çevrimi (a) P-V ve (b) T-S diyagramları.....	29
Şekil 2.8. Stirling Çevrimi şematik gösterimi.....	31
Şekil 2.9. Stirling – çanak sistemi için soğutma sistemi diyagramı	35
Şekil 2.10 Kovuklu alıcıda enerji dengesi	39
Şekil 2.11. Gölgeleyen kısımların çıkartılması.....	41
Şekil 2.12. Alıcı açıklığının yönelimine göre alıcı eğim açıları	43

Şekil 3.1. Modellenen parabolik çanaklı yoğunlaştırılmalı güç sistemi için sonuçlar kısmındaki grafikler kesimi	51
Şekil 3.2. SAM programı ile tasarlanabilecek sistemler	52
Şekil 3.3. SAM programı başlatıldığında karşılaşılan ara yüz	54
Şekil 3.4. Tasarımı yapılabilecek sistem/teknoloji seçenekleri	55
Şekil 3.5. Parabolik çanaklı sistem ve finansal model seçimi	56
Şekil 3.6. Meteorolojik verilerin girişinin yapıldığı ve gözlenebildiği ekran görüntüsü	57
Şekil 3.7. Parabolik çanaklı güneş güç sistemi tasarımı için sistem seçimi	59
Şekil 3.8. Sistemin üzerinde bulunacağı alan ile ilgili özelliklerin bulunduğu ekran görüntüsü	59
Şekil 3.9. Parabolik çanak ile ilgili verilerin bulunduğu ekran görüntüsü.....	60
Şekil 3.10. Alıcı ile ilgili verilerin bulunduğu ekran görüntüsü	61
Şekil 3.11. Stirling motoru ile ilgili parametrelerin bulunduğu ekran görüntüsü	61
Şekil 3.12. “Parasitics” ile ilgili parametrelerin bulunduğu ekran görüntüsü.....	62
Şekil 3.13. Sistem parametrelerinin referans verilerinin bulunduğu ekran görüntüsü	63
Şekil 3.14. Performans ayarlamalarının yapılacağı ekran görüntüsü	64
Şekil 3.15. Soldan sağa doğru simülasyonları yap, simülasyonları yapılandır ve sonuçlar butonları	64
Şekil 3.16. Simülasyon sonuçlarının tablo olarak verilmesi	65
Şekil 3.17. Simülasyon sonuçlarının grafiklerinin çizilebileceği ekran görüntüsü .	66
Şekil 3.18. Simülasyon sonuçlarının time-series olarak görülebileceği ekran görüntüsü	67
Şekil 3.19. Simülasyon sonucunda ortaya çıkan kayıp diyagramı	67
Şekil 3.20. Parametrik simülasyonların yapılabileceği ekran görüntüsü	68
Şekil 3.21. Parametrelerin seçilebileceği ekran görüntüsü	69
Şekil 4.1. Albuquerque, Van ve Ankara için (a) SES (b) WGA yansıtıcı ayna alanının değişimi ile yıllık parabolik çanak çıkış enerjisi değişimi	72

Şekil 4.2. Albuquerque, Van ve Ankara için (a) SES (b) WGA yansıtıcı yansıtma oranı değişimi ile yıllık parabolik çanak çıkış enerjisi miktarındaki değişim	74
Şekil 4.3. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı açıklık çapı değerlerine göre değişimi	75
Şekil 4.4. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının alıcı açıklık çapı değerlerine göre değişimi	76
Şekil 4.5. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı yalıtım kalınlığı değerlerine göre değişimi.....	78
Şekil 4.6. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kaybının alıcı yalıtım kalınlığı değerlerine göre değişimi.....	79
Şekil 4.7. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği ile değişimi	81
Şekil 4.8. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının alıcı yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği ile değişimi	82
Şekil 4.9. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin soğurucu soğurma oranı ile değişimi	83
Şekil 4.10. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının soğurucu soğurma oranı ile değişimi	84
Şekil 4.11. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin soğurucu yüzey alanı ile değişimi	86
Şekil 4.12. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının soğurucu yüzey alanı ile değişimi	87
Şekil 4.13. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk soğurma oranı ile değişimi	88
Şekil 4.14. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk soğurma oranı ile değişimi	89
Şekil 4.15. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk iç yüzey alanı ile değişimi	90
Şekil 4.16. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk iç yüzey alanı ile değişimi	91
Şekil 4.17. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk çapı ile değişimi.....	93
Şekil 4.18. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk çapı ile değişimi.....	94

Şekil 4.19. (a) SES ve (b) WGA sistemleri için yakalama faktörünün alıcı açıklık çapı ile değişimi.....	100
Şekil 4.20. (a) SES ve (b) WGA sistemlerinde farklı yakalama faktörü değerleri için alıcıya giren yıllık enerji miktarının alıcı açıklık çapına göre değişimi	101
Şekil 4.21. (a) SES ve (b) WGA sistemlerinde farklı yakalama faktörü değerleri için alıcı kayıpları yüzdesinin alıcı açıklık çapına göre değişimi.	103
Şekil 4.22. Albuquerque için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	110
Şekil 4.23. Van için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi .	111
Şekil 4.24. Ankara için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	112
Şekil 4.25. SES sistemi kullanıldığında Albuquerque için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	113
Şekil 4.26. SES sistemi kullanıldığında Van için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	114
Şekil 4.27. SES sistemi kullanıldığında Ankara için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	115
Şekil 4.28. SES sistemi kullanıldığında Albuquerque için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	116
Şekil 4.29. SES sistemi kullanıldığında Van için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	117
Şekil 4.30. SES sistemi kullanıldığında Ankara için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	118
Şekil 4.31. WGA sistemi kullanıldığında Albuquerque için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	119
Şekil 4.32. WGA sistemi kullanıldığında Van için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	120
Şekil 4.33. WGA sistemi kullanıldığında Ankara için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi	121
Şekil 4.34. WGA sistemi kullanıldığında Albuquerque için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	122
Şekil 4.35. WGA sistemi kullanıldığında Van için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	123

Şekil 4.36. WGA sistemi kullanıldığında Ankara için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi.....	124
Şekil EK-1.1. İdeal Stirling Çevriminin (a) P-V ve (b) T-S diyagramları.....	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Yoğunlaştırılmalı güneş güç üretim teknolojileri karşılaştırması	9
Çizelge 1.2. Çanak-Stirling sistemlerinin bazı özellikleri ve performans parametreleri	15
Çizelge 2.1.Yoğunlaştırılmalı sistemlerin modellenebileceği yazılımlar.....	48
Çizelge 4.1 SES sistemi için yerleşime bölgesine bağlı optimum pompa hızları ve varsayılan pompa hızlarına göre yüzde değişimler.....	95
Çizelge 4.2 WGA sistemi için yerleşime bölgesine bağlı optimum pompa hızları ve varsayılan pompa hızlarına göre yüzde değişimler.....	95
Çizelge 4.3. SES sistemi için yerleşime bölgesine bağlı farklı soğutma sistemi akışkan türlerine göre sistem enerji çıktıları ve %50EG baz alınarak yüzde değişimler	97
Çizelge 4.4 WGA sistemi için yerleşime bölgesine bağlı farklı soğutma sistemi akışkan türlerine göre sistem enerji çıktıları ve %50EG baz alınarak yüzde değişimler	97
Çizelge 4.5 SES sistemi için yerleşim bölgesine bağlı olarak soğutma sistemi fan hızlarına göre sistem enerji çıktıları ve yüzde değişimler	98
Çizelge 4.6 WGA sistemi için yerleşim bölgesine bağlı olarak soğutma sistemi fan hızlarına göre sistem enerji çıktıları ve yüzde değişimler	98
Çizelge 4.7. SES ve WGA sistemleri için belirlenen parametrelerin yazılımda varsayılan değerleri ve modelleme ile bulunan değerlerinin karşılaştırılması	99
Çizelge 4.8. SES Sistemleri ile oluşturulacak 600 kW'lık güç sisteminin kuzey-güney ve doğu-batı yerleşim seçenekleri	105
Çizelge 4.9. WGA Sistemleri ile oluşturulacak 600 kW'lık güç sisteminin kuzey-güney ve doğu-batı yerleşim seçenekleri	105
Çizelge 4.10. WGA sistemi için farklı yerleşim bölgelerinde çanak merkezleri arası uzaklığın etkisi.....	107
Çizelge EK-2.1. SAM yazılımında kullanılan parametrelerin tanımları ve yazılımda varsayılan değerleri.....	135

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

SES	Stirling Energy Systems
WGA	WGAssociates
SAM	System Advisor Model
NREL	National Renewable Energy Laboratories
IEA	International Energy Agency
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ADDS	Advanced Dish Development System
DIR	Direct Illumination Receiver
IIR	Indirect Illumination Receiver
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
YO	Yoğunlaştırma Oranı
CSP	Concentrating Solar Power

1. GİRİŞ

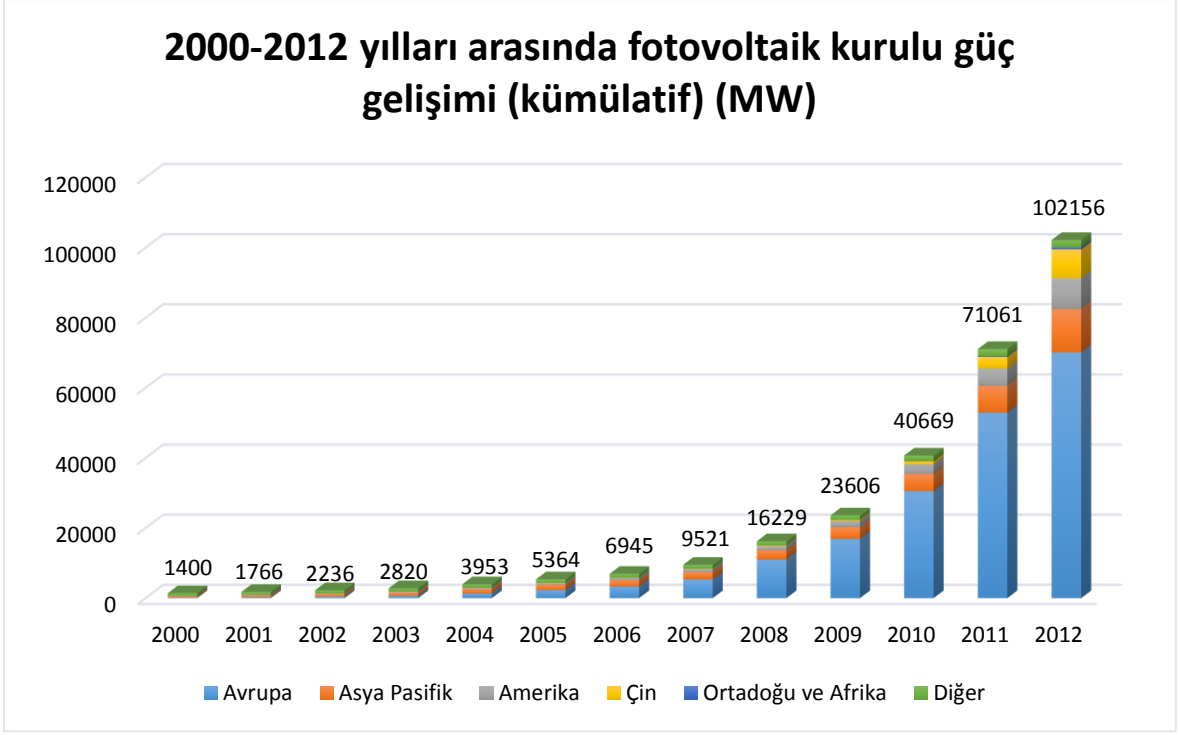
Tüm dünyada artan enerji ihtiyacına paralel olarak, fosil kökenli enerji kaynaklarının da hızla azalmakta olduğu bir gerçektir. Enerji isteminin hızlı artışı, fosil kökenli kaynakların kullanımına bağlı olarak CO₂ emisyon miktarlarındaki artış, tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir [1-2].

Güneş enerjisi tüm enerji kaynaklarının temelini oluşturan, yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır. Bir yılda Güneş'ten Dünya'nın yüzeyine gelen enerji miktarı 885 milyon TWh'tir ve bu enerji miktarı 2008 yılında dünyada tüketilen enerjinin 6200 katı, Uluslar Arası Enerji Ajansının (IEA-International Energy Agency) öngörülerine göre 2035'te tüketilecek olan enerjinin 4200 katıdır. Diğer bir deyişle toplam kara parçaları üzerine güneşten 270 dakika boyunca gelen enerji, tüm dünyada bir yılda tüketilen enerjiye eşittir [3]. Güneş enerjisi, farklı teknolojiler kullanılarak ısı enerjisi ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu istatistiksel veriler güneş enerjisi kullanımının ve güneş enerji teknolojilerinin gelişmesi için yapılan ar-ge çalışmalarının önemini vurgulamaktadır.

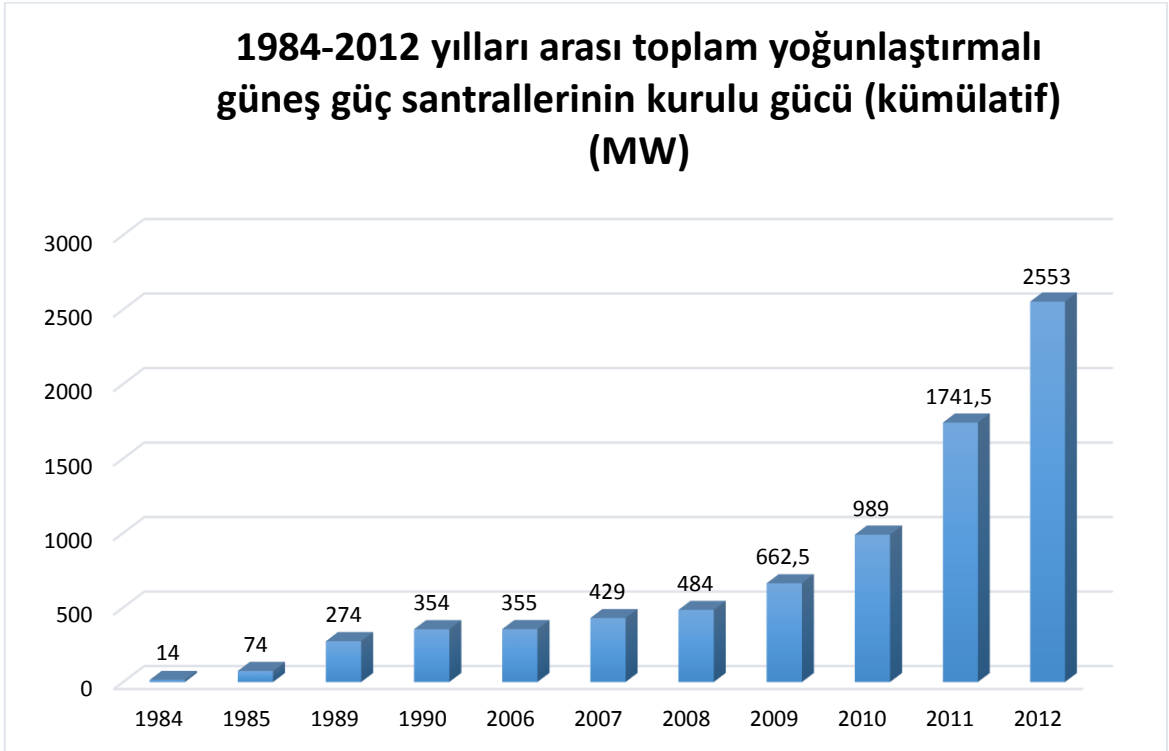
Güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi temelde iki yöntemle gerçekleştirilebilir: Yöntemlerden ilki, üzerine gelen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş gözelerinin kullanıldığı fotovoltaiklerden yararlanmaktır. Bir diğer yöntem ise, güneş enerjisini önce ısı enerjisine daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren ve yoğunlaştırmalı güneş güç sistemleri adı verilen sistemleri kullanmaktır [4]. EPIA (European Photovoltaic Industry Association) 2013 raporuna göre, 2000-2012 yılları arasında, dünya çapında kurulan fotovoltaik sistemler için kurulu güç gelişimi Şekil 1.1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, son 5 yılda hızlı artış göstererek 2012 yılı itibariyle fotovoltaik sistem olarak 102 GW'lık kurulu güç ulaşılmıştır. Avrupa'da, 2011 yılında 22 GW'lık, 2012 yılında ise 17 GW'lık fotovoltaik sistem kurulmasına karşın Çin'de gözlenen büyük büyüme hızıyla 2011 yılında 2,5 GW, 2012 yılında ise 5 GW'lık sistemler kurulmuştur. Rakamlara bakıldığında, Avrupa'nın fotovoltaik açısından gerileme dönemine girdiği, Çin'de ise pazarın hızlı büyüme eğiliminde olduğu görülmekte ve bu hızlı büyümenin pazarın geleceği için bazı endişeleri de beraberinde getirdiği bilinmektedir [5].

1980'li yıllardan beri kurulan yoğunlaştırmalı güneş güç santrallerinin kümülatif kurulu güç gelişimi Şekil 1.2'de verilmiştir ve 2012 yılı itibariyle 2.6 GW'lık kurulu güce ulaşılmıştır [6]. 2012 yılı yoğunlaştırmalı güneş güç sistem piyasası için hareketli bir yıl olmuştur. Bazı büyük üreticiler iflas etmiş ve yenileri piyasaya girmiştir. Fakat piyasa hareketliliği artmıştır ve artarak devam edeceği de öngörülmektedir. Yapılan araştırma geliştirme çalışmaları ile sistem maliyetlerinin düşeceği belirtilmiştir [7]. Yoğunlaştırmalı güneş güç santrallerinin kurulu güç gelişiminin, fotovoltaik sistemlere göre daha yavaş olması, bu sistemlerin 2005 yılına kadar ticarileşememesi, araştırma, geliştirme ve gösteri amaçlı sistemler ile sınırlı kalması nedeniyledir. Şekil 1.2'den de görüldüğü gibi 2010 yılından sonra hızlandırılan araştırma geliştirme eğilimleri ve ticarileştirme girişimleri ile kurulu güç artış göstermiştir. 2011 yılında 752 MW, 2012 yılında ise 812 MW'lık ilave sistemler kurulmuştur. 2013 yılı sonlarında çalışmaya başlayacak ve planlama aşamasında olan sistemler ile kurulu gücün artması beklenilmektedir [6-7].

Yoğunlaştırmalı güneş enerjisi sistemleri elektrik üretiminde güneş ışınımının direkt bileşenini kullanır. Fotovoltaik sistemlerde olduğu gibi yayınlık (difüz) bileşeni kullanamadığından, direkt ışınım miktarının yüksek olduğu, bulutsuz gün sayısının fazla olduğu, sis veya tozun olmadığı yerlere kurulmalıdırlar. Dünyaya bakıldığında direkt ışınım miktarının yüksek olduğu, 15°- 40° enlemleri arasında kalan ve güneş kuşağı (sunbelt) olarak adlandırılan bir bölge vardır. Bu bölgede bulutluluk, nem daha az olduğundan yoğunlaştırmalı güneş enerjisi güç sistemleri için uygundur. Bu nedenle bu tür sistemler için Kuzey ve Güney Afrika, Ortadoğu, Hindistan'ın kuzeybatısı, Amerika'nın güneybatısı, Meksika, Peru, Şili, Çin'in bazı bölgeleri ve Avusturya uygun iklim şartlarına sahiptir. Avrupa'nın en güneyi, Türkiye, Brezilya ve Arjantin de sistem kurulumları için uygun olabilmektedir [6, 8-9].

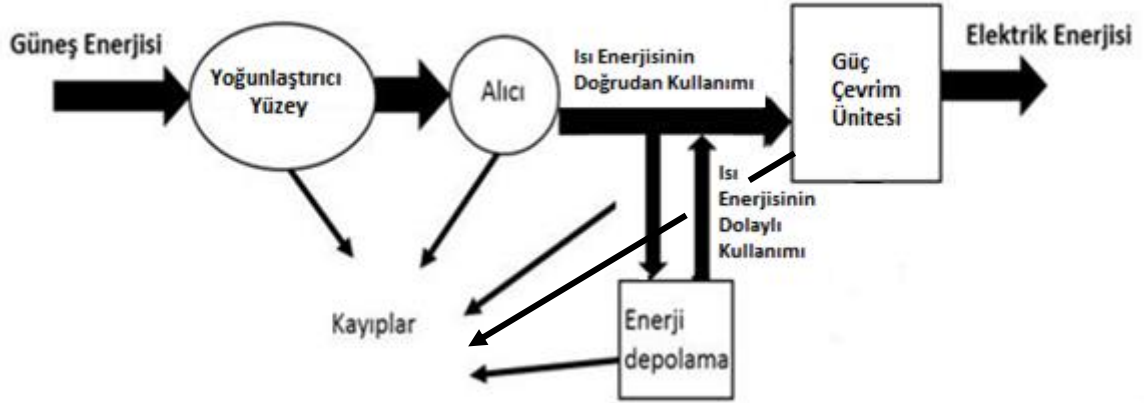


Şekil 1.1. 2000-2012 yılları arasında dünya çapında fotovoltaik sistem kurulu güç gelişimi



Şekil 1.2. 1984-2012 yılları arasında kurulan yoğunlaştırılmış güneş güç sistemlerinin kurulu güç gelişimi

Yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi teknolojilerini kullanan sistemler için şematik gösterim Şekil 1.3'te verilmiştir. Yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemleri **yoğunlaştırıcı yüzey**, **alıcı** ve **güç çevrim ünitesi** olmak üzere temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Eğer sistemde ısı enerjisi depolanıyorsa, depolama sistemi güç çevrim ünitesine dahil edilir ve dördüncü temel bileşen olarak hesaba katılabilir [8].



Şekil 1.3. Yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi sistemlerinin şematik gösterimi

Yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi teknolojilerini kullanan sistemler, güneş ışınımını yansıtma ve yoğunlaştırmak için farklı yapı ve dizilimdeki **yoğunlaştırıcı/yansıtıcı yüzeyler** kullanırlar. Yoğunlaştırıcı yüzey üzerine gelen güneş ışınımı, yoğunlaştırıcı yüzey alanından daha küçük yüzey alanına sahip olan ve **alıcı** adı verilen mekanizmaya yansıtılır. Alıcıya gelen yoğunlaştırılmış güneş ışınımı, soğularak ısı enerjisine dönüştürülür ve çalışma akışkanına iletilir. Ortaya çıkan ısı enerjisi doğrudan enerji çevriminde kullanılabilir gibi, daha sonra çevrimde kullanılmak üzere depolanarak dolaylı olarak da kullanılabilir. Böylelikle çalışma akışkanı doğrudan veya dolaylı olarak **güç çevrim ünitesinde** ısı kaynağı olarak kullanılır. Ortaya çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede; buharlı güç çevrimleri, buhar-gaz birleştirilmiş güç çevrimleri veya Stirling çevrimi kullanılabilir [8]. Bu sistemlerde, yoğunlaştırıcı yüzey, alıcı, güç çevrim ünitesi ve depolama sisteminde oluşacak kayıplar, sistemden elde edilecek elektrik enerjisini azaltmakta

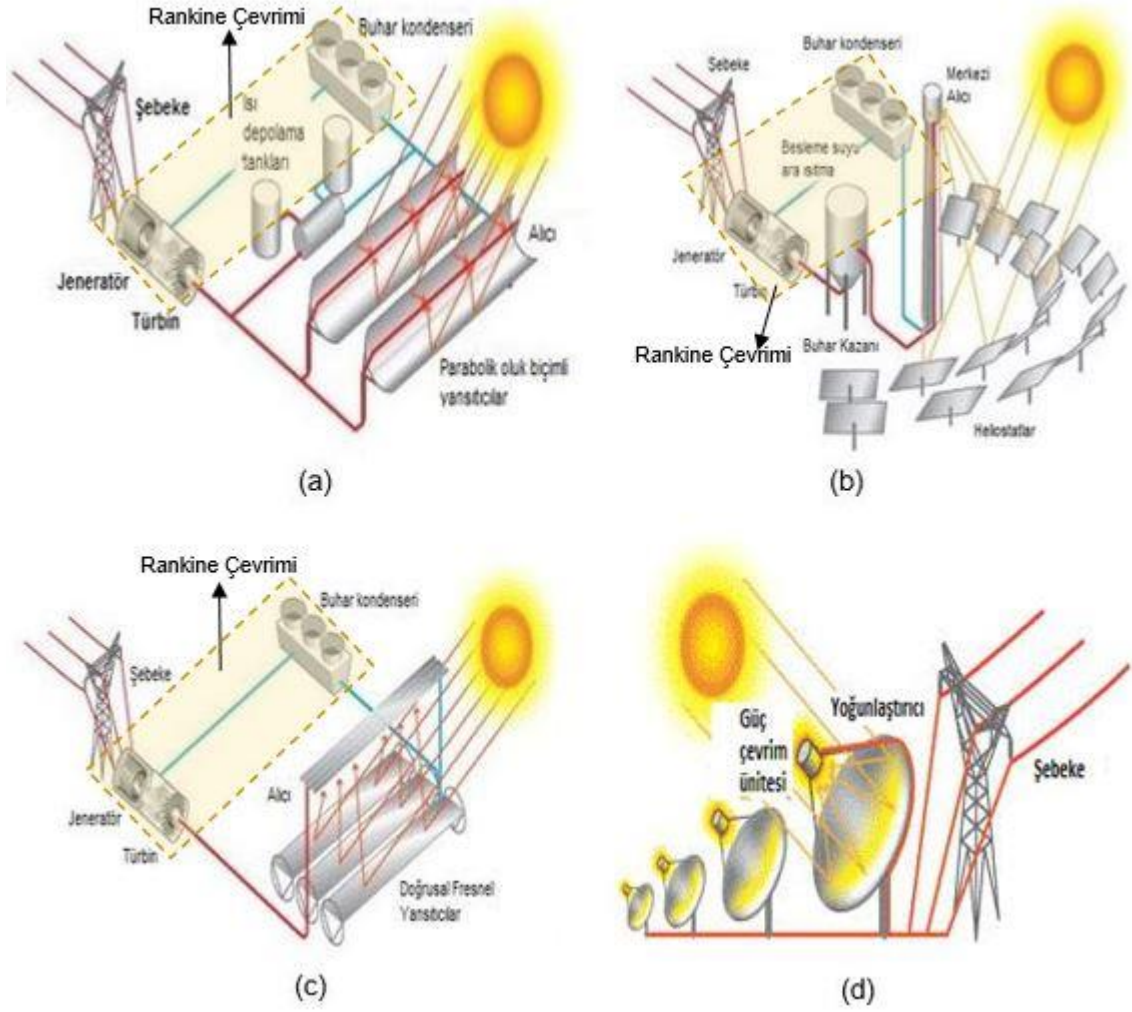
ve sistemin verimini etkilemektedir. Sistem tasarımı aşamasında, bu kayıpları en aza indirecek tasarımlar yapılmalıdır.

Temel olarak dört farklı çeşit yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemi teknolojisi bulunmaktadır [8]:

- Parabolik Oluklu Sistemler, (*Parabolic Trough*)
- Merkezi Alıcılı Sistemler, (*Central Receiver Tower*)
- Doğrusal Fresnel Yansıtıcı Sistemler, (*Linear Fresnel Reflectors*)
- Parabolik Çanaklı Sistemler, (*Parabolic Dishes*).

Bu teknolojiler Şekil 1.4'te basitçe gösterilmiş ve Çizelge 1.1'de de karşılaştırmaları verilmiştir [7]. Stirling çevrimi kullanılan sistem hariç, tüm sistemler fosil kökenli yakıt kullanan santrallere benzer şekilde elektrik üretirler. Fark olarak, enerji girdisi yoğunlaştırılmış güneş enerjisidir [4, 8, 10].

Parabolik oluklu güneş güç sistemleri tüm yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemleri arasında en olgunlaşmış teknolojiye sahip olan ve en çok kullanılanıdır. Parabolik oluk biçimli yansıtıcılar aracılığı ile gelen güneş ışınımını parabolün odak çizgisi üzerinde bulunan bir alıcıya odaklanır (Şekil 1.4.a). Yansıtıcı ve alıcı, güneşin günlük hareketini bir ekseninde (doğu-batı) takip eden bir yapı üzerinde bulunur. En yaygın kullanılan yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemi, alıcı olarak vakum tüplerin kullanıldığı parabolik oluklu güneş güç sistemidir. Bu tip sistemlerde, alıcı içinde genellikle ısı transferi akışkanı olarak yağ kullanılır. Isı transferi akışkanı, alıcı tüpteki ısı enerjisini alır ve merkezi bir güç çevrim ünitesine iletir. Genellikle kullanılan güç çevrimi bir buhar çevrimi olan **Rankine Çevrimi**dir. Bugünün teknolojisi ile parabolik oluklu sistemlerde sıcaklık 350 -550 °C aralığında olabilir [7]. Parabolik oluklu güneş güç sistemlerinde ısıl depolama yapılabilir. Böylece ısıl depolama işlemi ile güneş ışınımının az olduğu ve enerji ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda veya güneş battıktan sonra, bir süre daha enerji üretimi yapılabilir. Parabolik oluklu güneş güç sistemlerinin yıllık verimleri %11-16 aralığındadır [7]. Bu tip sistemlerin en büyüğü ve en bilineni, toplam elektrik çıktısı 354 MW ve parabolik oluklu yansıtıcı alanı iki milyon metre kare olan **SEGS (Solar Energy Generating Systems)** santralleridir [8].



Şekil 1.4. (a) Parabolik oluklu güneş güç sistemi şematik gösterimi (b) Merkezi alıcılı güneş güç sistemi şematik gösterimi (c) Doğrusal Fresnel yansıtıcılı güneş güç sistemi şematik gösterimi (d) Parabolik çanaklı güneş güç sistemi şematik gösterimi

Merkezi alıcılı güneş güç sistemlerinde güneşi iki ekseninde takip eden ve heliostat adı verilen aynalar üzerine gelen güneş ışınımını, bir kule üzerine yerleştirilmiş bir merkezi alıcıya yansıtır. Kule üzerinde bulunan merkezi alıcı, üzerine gelen ışınımını soğurarak yüksek sıcaklıkta ısı enerjisine dönüştürür. Daha sonra bu ısı enerjisi çalışma akışkanına aktarılır ve ısı enerjisi olarak depolanır (Şekil 1.4.b). Parabolik oluklu sistemlerde olduğu gibi, merkezi alıcılı sistemlerde de elektrik üretimi için buhar çevrimi kullanılır. Sistemde kullanılan alıcı eğer **dış alıcı** (external receiver) ise; heliostatlar, alıcının üzerinde bulunduğu kulenin etrafına birbirlerine gölge etkisi

yapmayacak şekilde dizilir. Fakat **kovuklu alıcı** (cavity receiver) kullanılıyorsa; heliostatlar kovuk açıklığına bakacak şekilde kulenin kuzeyine dizilir. Merkezi alıcılı sistemlerde ısı enerjisi depolaması için eriyik tuz kullanılır. Eriyik tuz vasıtası ile depolanan ısı enerjisi sayesinde güneşin olmadığı akşam saatlerinde de güç üretilir. Merkezi alıcılı sistemler genellikle 10 MW ve üzeri değerlerde güç üretirler. Sistemin ekonomik açıdan uygulanabilir olması için ise optimum güç üretim değerleri kurulacağı yere göre 50 ile 400 MW aralığında değişir [4, 10-11]. Merkezi alıcılı sistemler 250-565 °C arası sıcaklıklarda çalışırlar ve yıllık verimleri %7-20 aralığındadır [7-8].

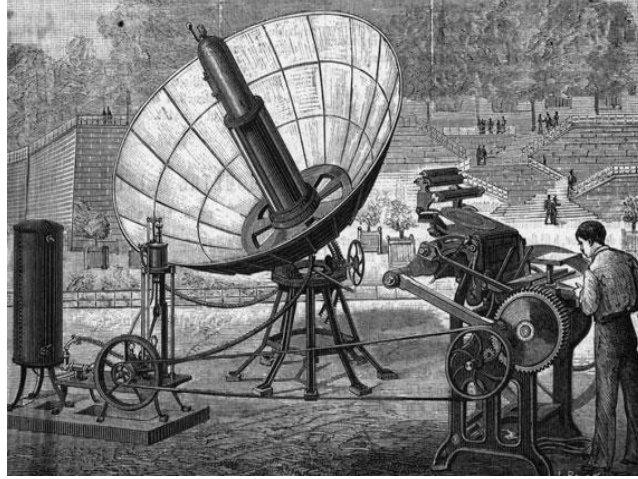
Doğrusal Fresnel yansıtıcı sistemlerde, güneş ışığı parabolik aynalarla yansıtılmak yerine çok sayıda ince ayna dizileri kullanılarak içinde çevrim akışkanı dolaşan ve aşağıya doğru bakan sabit bir alıcıya yansıtılır. Yansıtıcılar güneşi tek veya iki eksenle takip edebilen aynalardır (Şekil 1.4.c). Doğrusal Fresnel yansıtıcı sistemlerin temel avantajı basit tasarımlarından dolayı yatırım maliyetlerinin düşük olması ve doğrudan buhar üretimi yapılabilmesinden dolayı ısı değiştiricileri ve ısı transfer akışkanı kullanılmasına gerek kalmamasıdır. 390°C civarı sıcaklıklarda çalışırlar ve verimleri %13 civarındadır [4, 7-8].

Parabolik çanak yansıtıcı sistemler, parabolik çanaklar, her bir çanağın odak noktasına yerleştirilmiş bir alıcı ve bir güç çevrim ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 1.4.d). Gelen güneş ışınları parabolik yoğunlaştırıcı tarafından, odak noktası civarında bulunan alıcı üzerine odaklanır. Alıcı yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisini sistemin durumuna göre; alıcı arkasına monte edilmiş Stirling motorunun çalışma akışkanına iletir. Böylece söz edilen güç çevrim ünitesinin çalışma prensiplerine göre gelen güneş enerjisi, ısı ve /veya elektrik enerjisine çevrilmiş olur. Tüm yoğunlaştırıcı sistemlerde olduğu gibi bu tip sistemlerde de iki eksenli güneş takip sistemi bulunmaktadır. Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi parabolik çanak sistemleri tüm yoğunlaştırıcı güneş güç sistemleri içinde çevrim verimi açısından en yüksek potansiyele sahip sistemlerdir [7]. Bu yüksek potansiyele rağmen, henüz ticari olarak gelişmemiştir. Eğer çanak-stirling sistemleri kümeler halinde yerleştirilirse 10 MW'a kadar güç üretim sistemleri oluşturulabilir. Çünkü bu değer üzerinde, diğer teknolojiler daha ekonomik veya verimli olacaktır [4, 8, 10].

Yoğunlaştırılmalı güneş güç üretim sistemleri arasında parabolik çanaklı sistem; en yüksek optik verime, en yüksek yoğunlaştırma oranına ve en yüksek tüm çevrim verimine sahip teknolojidir. Kayıplar çıkartıldıktan sonra direkt normal ışınımı elektriğe çevirmede en yüksek verim olan %30 değerine, tüm güneş güç üretim sistemleri içinde, parabolik çanak/stirling sistemleri ulaşmıştır. [7-8].

Literatürde parabolik çanaklı güneş enerji güç sistemlerinin tarihsel gelişmesi incelendiğinde;

- En eski parabolik çanaklı motorlu elektrik üretim sistemi 1864 yılı başlarında Fransız Augustin Mouchot tarafından tasarlanmış ve çalıştırılmıştır. Şekil 1.5'te Augustin Mouchot tarafından tasarlanan sistem görülmektedir. 1970 yılındaki petrol krizini takiben 1980'lerin başında yoğunlaştırılmalı güç sistemlerindeki ilk gelişmeler Amerika'da başlamıştır [8].



Şekil 1.5. En eski parabolik çanaklı motorlu elektrik üretim sistemi

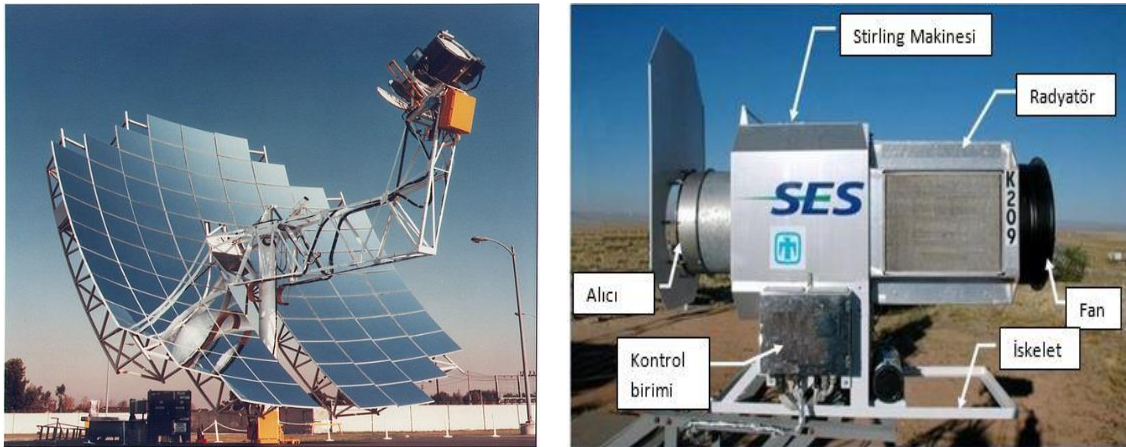
- Güç çıktısı 25 kW olan **Vanguard** parabolik çanak-stirling sistemi, Advanco şirketi tarafından 1984 yılında California'da kurulmuştur. Sistemde 10,5 m çapa sahip parabolik çanak, DIR (Işınımı doğrudan alan alıcı- **D**irect **I**llumination **R**eceiver) tipi alıcı ve verimi %41 olan United Stirling 4-95 tipi Stirling motor kullanılmış ve bu haliyle sistem %29,4'lük güneş-elektrik çevrim verimi ile zamanının rekoruna sahip olmuştur [8, 13-14].

Çizelge 1.1. Yoğunlaştırılmalı güneş güç üretim teknolojileri karşılaştırması [7]

	Parabolik Oluklu Sistem	Merkezi Alıcılı Sistem	Doğrusal Fresnel Yansıtıcı Sistem	Parabolik Çanak-Stirling Sistemi
Kapasite (MW)	10-300	10-200	10-200	0,01-0,025
Teknolojinin olgunluk durumu	Ticari olarak kanıtlanmış	Ticari pilot projeler aşamasında	Pilot projeler aşamasında	Demonstrasyon aşamasında
Teknoloji geliştirme riski	Düşük	Orta	Orta	Orta
Çalışma Sıcaklığı (°C)	350-550	250-565	390	550-750
Yıllık güneş-elektrik dönüşümü net verimi (%)	11-16	7-20	13	12-25
Yıllık kapasite faktörü (%)	25-28 (Enerji Depolama yok) 29-43 (7 saatlik Enerji Depolama)	55 (10 saatlik Enerji Depolama)	22-24	25-28
Yoğunlaştırma Oranı (güneş)	70-80	>1000	>60	>1300
Güç Çevrimi	Kızdırmalı Rankine buhar çevrimi	Kızdırmalı Rankine buhar çevrimi	Doymuş Rankine buhar çevrimi	Stirling çevrimi
Sistemin kurulacağı alanın maksimum eğimi (%)	<1-2	<2-4	<4	>10
Su gereksinimi (m³/MWh)	3 (ıslak soğutma) 0,3 (kuru soğutma)	2-3 (ıslak soğutma) 0,25 (kuru soğutma)	3 (ıslak soğutma) 0,2 (kuru soğutma)	0,05-0,1 (Aynaların yıkanması için)
Uygulama türü	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı	Şebeke bağlantılı veya Şebeke bağlantısız

- 1984 yılında, Schlaich Bergermann und Partner (SBP) şirketi tarafından Suudi Arabistan'da her biri 50 kW gücünde iki adet parabolik çanak Stirling sistemi kurulmuştur. Verimi %23 olan sistemde 17 metre çapında gerdirilmiş zar tipi parabolik çanak, DIR tipi alıcı ve verimi %42 olan United Stirling 4-275 tipi Stirling motoru kullanılmıştır [8, 13-14].1985-1988 yılları arasında McDonell Douglas Aerospace Corporation (MDAC) şirketi tarafından Vanguard sistemi ile yapısı aynı olan 6 adet sistem, 4 tanesi California'da, 1 tanesi Georgia'da diğeri de Nevada'da kurulmuştur [8, 13-14].
- SBP şirketi tarafından 1989 yılında ilk küçük çaplı 10 kW'lık, 7,5 m çapında gerdirilmiş zar tipi çanak, SOLO V-160 tipi Stirling motoru kullanılan 6 adet sistem, güney İspanya'da kurulmuştur. SOLO V-160 Stirling motorunun verimi %30, sistem verimi ise %20,3'tür [8, 13-14].
- 1991 yılında Cummins Power Generation şirketi tarafından, 7 kW'lık 7,3 m çapında gerdirilmiş membran tipi çanak, %28 verimli Sunpower serbest piston (free piston) Stirling motoru kullanılan 3 adet sistem Amerika'nın üç farklı eyaletine kurulmuştur. 1996 yılında şirket kapatıldıktan sonra sistemlerin, Türkiye Alanya'da bulunan Kombassan firmasına satıldığı belirtilmektedir [8, 13-14]. 1992 yılında Aisin Seiki şirketi tarafından Japonya Kariya City'de Cummins Sisteminde kullanılan çanaklar ve Aisin Seiki'nin %25 verimli NS30A tipi 30 kW'lık Stirling motorları bu uygulama için 8,5 kW güç üretecek şekilde yeniden düzenlenmiştir [13].
- Science Applications International kuruluşunun ve STM Power şirketinin 1993 yılında geliştirdiği **SAIC/STM sistemi**, 1995 yılında prototip olarak yapılmış ve Colorado'ya kurulmuştur. Sistemde her biri 3,2 m çapa sahip gerdirilmiş zardan oluşan 16 adet yuvarlak çanak, %40 verimli STM 4-120 Stirling motoru kullanılmıştır. Verimi %20 olan olarak sistem ile ilgili parametreler Çizelge 1.2'de verilmiştir [14].

- **Stirling Energy Systems (SES) sisteminde**, parabolik çanak teknolojisini McDonnell Douglas (MDA) adlı üreticiden, Stirling motoru (Kockums 4-95) teknolojisi ise Kockums adlı üreticiden sağlanmıştır. 1998 yılında ticari bir çanak-stirling sisteminin geliştirilmesi için “Dish Engine Critical Components” (DECC) projesi başlatılmıştır. Projenin birinci evresi 1999 yılında tamamlanmış ve bu evrede en önemli sistem bileşeni olan Stirling motorunun performans ve güvenilirlik değerlendirmesi konusunda çalışılmıştır. Projenin 2000 yılında başlayıp 2002 yılına kadar devam eden ikinci evresinde, iki sistemin inşası ve testleri üzerine yoğunlaşmıştır. Şekil 1.6’da Kaliforniya Huntington Sahilindeki SES/Boeing Solar test bölgesinde çalışmakta olan SES sistemi ve Kockums 4-95 güç çevrim ünitesi görülmektedir [14]. SES çanak Stirling sistemi 1000 W/m^2 güneş ışınımında 25 kW elektriksel güç çıktısı verecek şekilde tasarlanmıştır [8, 14-15].

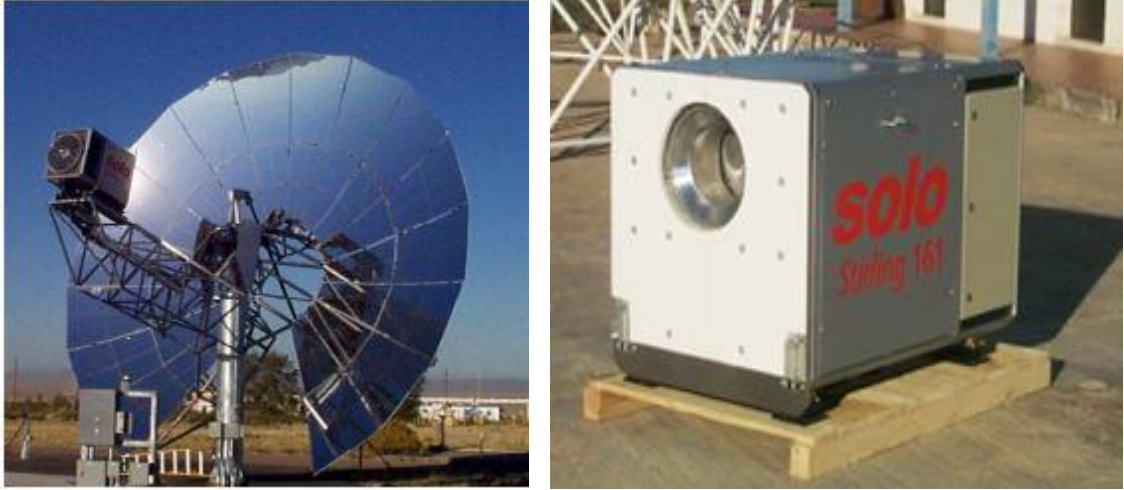


Şekil 1.6. (a) SES sistemi (b) Kockums 4-95 güç çevrim ünitesi

Şekil 1.6.b’de görülen Kockums 4-95 güç çevrim ünitesi; yoğunlaştırıcıdan gelen yoğunlaştırılmış güneş enerjisini çalışma akışkanına ileten alıcı, ısı enerjisini dönüsel hareket enerjisine çeviren Stirling motoru, elektrik üretici, atık ısıyı ortama transfer eden bir soğutucu ünite ve sistemin çalışmasını kontrol eden ve görüntüleyen bir kontrol sisteminden oluşmaktadır. Kockums 4-95 güç çevrim ünitesinin özellikleri ve parametreler Çizelge 1.2’de verilmiştir. Sistemde yoğunlaştırıcı üzerindeki aynaların ağırlığı ile güç çevrim ünitesinin ağırlığı odak noktasında dengelenerek yoğunlaştırıcının tasarımı özel olarak yapılmıştır.

DECC projesi için tamamlanmış ilk SES çanak-stirling modülü Haziran 1998'de, ikincisi ise Şubat 2000'de çalışmaya başlamıştır [13-15].

- **WGA (WGAssociates)** sisteminin çalışmaları, The Advanced Dish Development System (ADDS) projesi kapsamında 1998 yılında başlatılmış ve sistem seviyesinde testler yapılmıştır. Geliştirme çalışmaları çanak Stirling sistemlerinin su pompalama işleminde kullanılması, sistemlerin güvenilirliğinin artırılması ve sistem bileşenlerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır. 1999 yılında şebeke bağlantılı birinci nesil (Mod 1) (Şekil 1.7.a) sistem Albuquerque'de bulunan National Solar Thermal Test Facility'de kurulmuştur. 2000 yılında ise geliştirilmiş şekli olan ikinci nesil (Mod 2) sistemi şebekeden bağımsız ve su pompalama sistemine entegre edilebilme özelliğine sahiptir [14, 16].



Şekil 1.7. (a) WGA ADDS Mod 1 Parabolik Çanak Stirling sistemi (b) SOLO 161 Güç Çevrim Ünitesi

ADDS tasarımı WGA-500 tipi parabolit yoğunlaştırıcı, SOLO 161 Stirling güç çevrim ünitesi (Şekil 1.7.b) ve kontrol birimlerini içerir. ADDS sistem ve performans özellikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir. DIR tipi alıcı kullanılan SOLO 161 öncelikli olarak kojenerasyon uygulamaları için SOLO Kleinmotoren tarafından üretilmiştir. Çıkış gücünün değişimi çalışma akışkanı basınç kontrolü ile sağlanmaktadır. Test aşamasında önce yansıtıcı testi ve ardından performans ve güvenilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. SOLO 161, ilk olarak iç ortam kojenerasyon sistemlerinde kullanma amacıyla üretildiğinden çalışma gazı olarak Helyum

kullanılmıştır. Daha sonra performansı arttırmak için çalışma akışkanı Hidrojen olarak değiştirilmiş ve bu işlem sonucunda, parabolik çanak alanının Stirling motorunun giriş enerjisinin belirlenen değerini aşmasını önlemek amacıyla %11 azaltılmasına karşın, 1000 W/m² ışınım altında, sistem güç çıktısında 0,5 kW'lık bir artış gözlenmiştir [8, 13, 16].

- 1998 yılında SBP şirketi, Avrupalı ortaklar ile **EuroDish** sisteminin geliştirilmesi için çalışmalara başlamıştır. 8,5 m çapında parabolik çanak ve 10 kW kapasiteli SOLO 161 Stirling motoru kullanan sistem prototipleri İspanya'da test için kurulmuştur. Test aşamasından sonra farklı iklim koşullarındaki durumu görmek ve sistemi ticarileştirebilmek amacıyla İspanya dışında, Almanya, Fransa, İtalya ve Hindistan'a kurulmuştur [8].
- Infinia şirketi 2006 yılında 4,7 m çapında **PowerDish** isimli parabolik çanaklı güç sistemini SBP şirketi ile birlikte ve bakım gerektirmeyen 3,2 kW'lık serbest piston Stirling motorunu kendisi geliştirmiştir. İlk prototip 2007 yılında dünyanın farklı ülkelerinde kurulmuştur. 2010 yılında ise Arizona'da 30 sistemlik ticari büyük çaplı bir kurulum gerçekleştirilmiştir [8].
- 2010 yılının mart ayında Amerika Arizona'da Tessera Solar şirketi tarafından kurulan ve 60 adet 25 kW'lık **SES SunCather** parabolik çanak-stirling sistemi kullanılan ticari sistem, toplam 1,5 MW kapasiteye sahiptir. Yıllık sistem verimi %26 olarak kaydedilmiştir. Fakat SES firması 2011 yılında iflas ettikten sonra faaliyetine son verilmiştir [6, 17-18].
- **Casa Del Angel Termasolar** isimli 1 MW'lık santral, Renovalia şirketi tarafından İspanya'da kurulmuş ve 2011 yılının Mart ayında ticari olarak çalışmaya başlamıştır. Fakat daha sonra iptal edilmiştir [6, 17].
- E Cube Energy şirketi tarafından Çin'de gösteri amaçlı kurulmuş 1 MW'lık santral halihazırda çalışmasını sürdürmektedir [6, 17].

- Hindistan Rajasthan'da kurulan 1 MW'lık **India Solar Thermal Power Plant** isimli santral World Renewal Spiritual Trust (WRST) isimli aynı zamanda güneş enerjisi araştırma merkezi olan kuruluşça kurulmuş ve Mayıs 2013'te çalışmaya başlamıştır [6, 17].
- Şubat 2013'te Amerika Toole'de inşası başlayan **Toole Army Depot Dish Stirling CSP Plant** isimli 1,5 MW'lık ticari amaçlı santral, Infinia şirketinin ürettiği PowerDish marka, çanak çapı 6,7 m olan, 3 kW'lık 430 adet parabolik çanak-stirling sisteminden oluşmaktadır. Eylül 2013'te çalışmaya başlaması öngörülmektedir [6, 17]. PowerDish (Şekil 1.8) marka parabolik çanak-stirling sistemlerinin kullanılacağı biri Güney Kıbrıs'ta diğeri ise Yunanistan'da olmak üzere iki adet ticari amaçlı santral geliştirilme aşamasındadır. Güney Kıbrıs'ta kurulacak Helios Power Adlı santral 50,76 MW'lık, Yunanistan'da kurulacak Maximus Dish Project adlı santral ise 75 MW'lıktır. [6, 17-18].



Şekil 1.8. PowerDish parabolik çanak-stirling sistemi

Çizelge 1.2. Çanak-Stirling sistemlerinin bazı özellikleri ve performans parametreleri [14]

		SAIC/STM Sistemi	SBP Sistemi	SES Sistemi	WGA (Mod 1) ADDS Sistemi	WGA (Mod 2) Remote Sistemi
Yoğunlaştırıcı	Tip	Yaklaşık Paraboloid	Paraboloid	Yaklaşık Paraboloid	Paraboloid	Paraboloid
	Aynaların Sayısı	16	12	82	32	24
	Toplam Alan (m ²)	117,2	60,0	91,0	42,9	42,9
	Yansıtıcı alan (m ²)	133,5	56,7	87,7	41,2	41,2
	Yansıtma Oranı	0,95	0,94	0,91	0,94	0,94
	Yükseklik (m)	15,0	10,1	11,9	8,8	8,8
	Genişlik (m)	14,8	10,4	11,3	8,8	8,8
	Kütle (kg)	8172	3980	6760	2864	2481
	Odak Uzaklığı (m)	12,0	4,5	7,45	5,45	5,45
	Yakalama Faktörü	0,90	0,93	0,97	0,99+	0,99+
	Pik Yoğunlaştırma Oranı (güneş)	2500	12730	7500	>11000	>13000
Güç Çevrim Ünitesi	Alıcı Açıklık Çapı (m)	38	15	20	14	14
	Stirling Motoru Marka ve Tipi	STM 4-120 Kinematik	SOLO 161 Kinematik	Kockums/SES Kinematik	SOLO 161 Kinematik	SOLO 161 Kinematik
	Motor Silindir Sayısı	4	2	4	2	2
	Yer değiştirme Hacmi (cm ³)	480	160	380	160	160
	Çalışma Hızı (dev/dak)	2200	1500	1800	1800	800-1890
	Çalışma Akışkanı	Hidrojen	Helyum	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen
	Güç Kontrolü	Değişken Hacim	Değişken Basınç	Değişken Basınç	Değişken Basınç	Değişken Basınç
	Jeneratör	3 faz/480v	3 faz/480v	3 faz/480v	3 faz/480v	3 faz/480v
Sistem Bilgileri	Kurulan Sistem Sayısı	5	11	5	1	1
	Güneş Altında Çalışma (saat)	6360	40000	25050	4000	400
	Hesaplanmış Güç Çıktısı (kW)	22,0	10,0	25,0	9,5	8,0 ¹
	Güç Çıktısı (kW)	22,9	8,5	25,3	11,0	8,0
	Net Verim (tepe değeri)	%20,0	%19,0 ²	%29,4	%24,5	%22,5
	Yıllık Net Verim (tepe değeri)	%14,5	%15,7	%24,6	%18,9	-
	Yıllık Enerji (kWh)	36609	20252	48129	17353	-

Çanak-Stirling Sistemleri için literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında tüm bir sistem ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir. Daha çok sistem bileşenleri ile ilgili güç ve verim optimizasyonu çalışmaları, kayıpların tanımlanması ve azaltılmasına yönelik çalışmalar, ısıl, optik ve termodinamik incelemeler yapılmıştır. [2, 12, 14-16, 18-25]

Lovegrove v.d. [23], 500 m² alana sahip bir parabolik çanağın tasarımı ve kurulumu ile ilgili çalışmışlardır. Odak noktasında yoğunlaşan güneş ışınımının akısını ve bulunduğu konumu kaydederek, çanak yüzeyindeki hatalardan kaynaklı kayıpları inceleyerek, çanağın optik performansını, optik ve geometrik yoğunlaştırma oranlarını ve çanağın odak noktasına yerleştirilecek alıcı için optimum açıklık çapı değerini saptamışlardır ve kayıpları önlemek için tasarım aşamasında ışın takip yönteminin öneminden bahsetmişlerdir.

Zhigang v.d. [25] Parabolik çanak sistemlerinde “Monte Carlo ray tracing” yaparak, alıcı konumunun ve şeklinin alıcıda sıcaklık ve ışınım dağılımına etkisini incelemişlerdir.

Parabolik Çanak-Stirling sistemlerinin kilit bileşeni olan alıcı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; Reddy ve Kumar [26], çanak-stirling sistemlerinde kullanılan kovuklu alıcılarda meydana gelen taşınım ve ışınım süreçlerini iki boyutlu nümerik analiz ile incelemişlerdir. Yaptıkları analiz sonucunda, taşınım yolu ile ısı aktarımının, önemli ölçüde alıcı yönelimine bağlı olduğunu, alıcı eğim açısının 45°’den büyük değerleri için ışınım ile ısı aktarımının baskın süreç olduğunu belirtmişlerdir.

Nepveu v.d. [27], Eurodish çanak-stirling sisteminin ısıl modelini oluşturmuşlardır. Bir çanak-stirling sisteminde meydana gelebilecek kayıpları kendi modelleri için tanımlamış ve model çıktısı sonucunda kayıpları incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda parabolik çanak kayıpların oluşmasının bir göstergesi olan alıcı dışına saçılan ışınımın önemli olduğunu, sistem oluşturulmadan önce ışınım modellemesi yapılarak bu kayıpların azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Parkash v.d. [28] tarafından açıklık koruması olmayan kovuklu alıcılardan taşınım yolu ile meydana gelen kayıplar nümerik bir çalışma olarak sunulmuştur. Küresel, yarı küresel ve kübik şekilli alıcıların açıklık çapları değiştirilerek taşınım ile ısı transfer alanlarını belirleme üzerine çalışılmıştır. Alıcılar için tüm yönelim ve

sıcaklıklarda taşınım yolu ile ısı kaybının en az olduğu durumun açıklık çapının en küçük seçildiği durum olduğu belirtilmiştir.

Jilte v.d.[29] yaptığı çalışmada, farklı geometrilere, açıklık çaplarına sahip ve farklı yönelimlerdeki kovuklu alıcıların, FLUENT yazılımı kullanarak alıcı kovuğu üç boyutlu olarak simüle edilmiş, kovuk içindeki taşınım kayıplarının meydana geldiği bölgeler belirlenerek; taşınım ve ışıma yolu ile ısı kayıpları incelenmiştir. Bu simülasyon sonucunda, küçük alıcı çapları için taşınım ile kaybın azaldığını, ışıma yolu ile oluşacak kayıpların alıcı boyutu ve yöneliminden bağımsız, alıcı açıklık çapı ile doğrudan ilişkili olduğu ileri sürülmüştür.

Wu v.d.[30] ve Reddy v.d.[31] parabolik çanak sistemlerde kovuklu alıcılarda taşınım ısı kayıplarının incelenmesi üzerine çalışmışlardır.

Stirling motoru tasarımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, Kongtragool vd. [32], John Ericsson'un 1872'de Stirling motorunun parabolik çanak kullanılarak güneş enerjisi ile çalışabileceğini gösterdiğini ve tasarlanan Stirling motorunun New York'ta bulutsuz bir günde öğle saati 420 dev/dak hız ile çalıştırıldığını bildirmiştir.

Kongtragool ve Wongwises [33], dört pistonlu bir Stirling motoru ve her biri 1000 W gücünde 4 adet lambası olan bir güneş simülatörü kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dört farklı ışık şiddetinde motor çalışmasını ve performansını izlemişlerdir. Yaptıkları deneyin sonucunda artan ışınım şiddeti ile, genişleme bölgesi sıcaklığının arttığını ve buna bağlı olarak da motor performansının arttığını belirtmişlerdir.

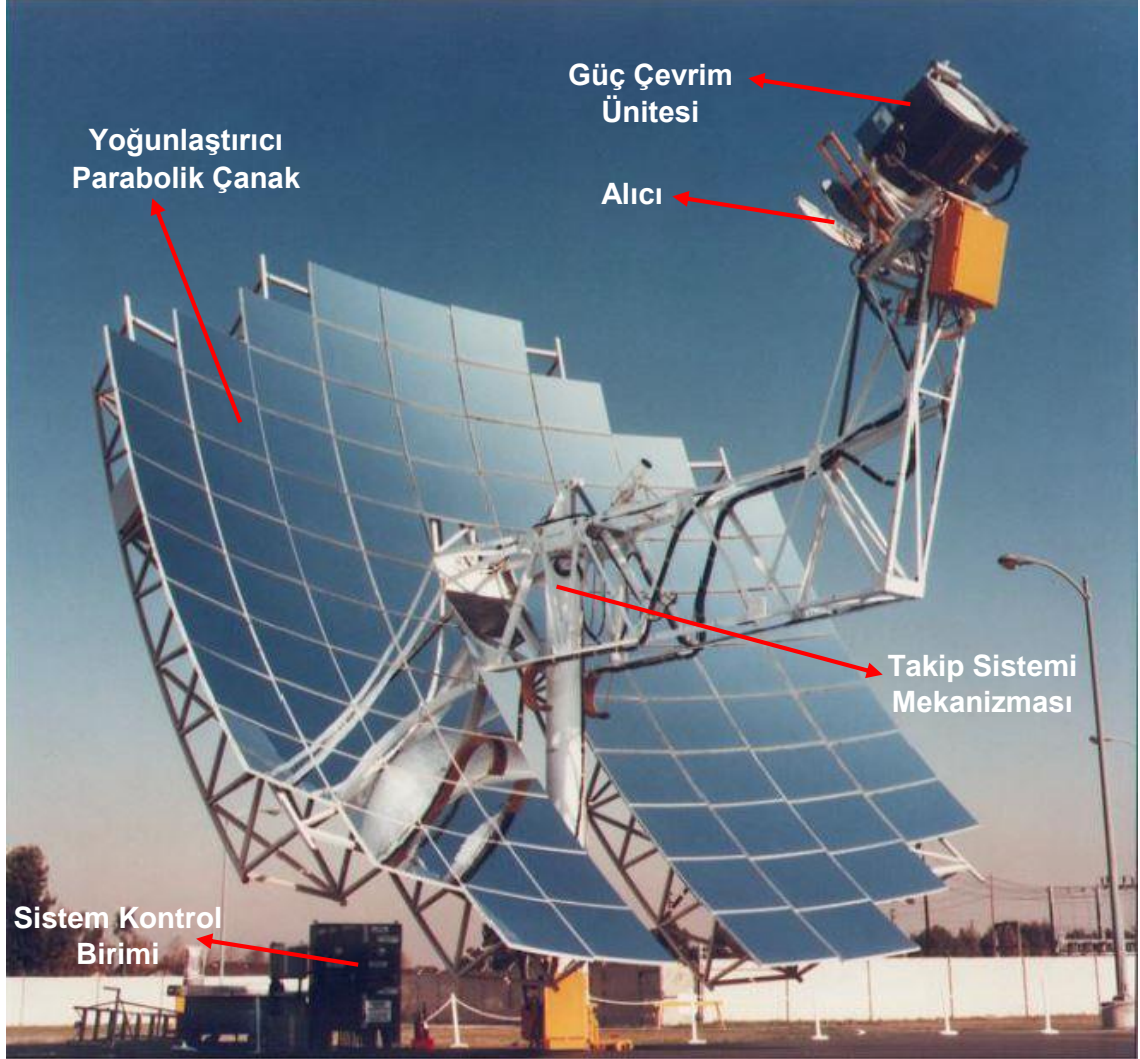
Güneş kuşağında bulunan ülkemizde, güneş enerjisi üzerine yapılan çalışmalar ve sistem kurulumları hız kazanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin yanı sıra, yoğunlaştırılmalı güç sistemlerine artan bir ilgi görülmektedir. Ancak kurulu bir sistem mevcut değildir ve bu konuda yapılmış ayrıntılı bir çalışma bulunmadığından, bu tez çalışmasında çanak-Stirling sistemlerinin ayrıntılı incelenmesi yapılarak bu konuda yol gösterici bir kaynak olması ve ülkemizdeki uygulanabilirliğinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ancak sadece iki ilin meteorolojik bilgisine ulaşılabildiğinden, bu illerdeki uygulanabilirlik ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

2. PARABOLİK ÇANAKLI YOĞUNLAŞTIRMALI GÜNEŞ GÜÇ SİSTEMLERİ

Parabolik çanaklı güneş güç üretim sisteminde; parabolik şekilli bir yoğunlaştırıcı, güneş takip sistemi, ısı değiştiricisi (alıcı/soğurucu), güç çevrim ünitesi ve sistem kontrol birimi bulunur. Şekil 2.1’de örnek bir parabolik çanaklı yoğunlaştırmalı güneş güç sistemi verilmiştir [14-15]. **Parabolik çanak yoğunlaştırıcı/yansıtıcılar**, noktasal odaklamalı kolektörlerdir. Çok yüksek (>13000 güneş) yoğunlaştırma oranlarına ulaşabilirler ve yüksek enerjili çevrimler ile verimli güç üretebilirler. Güneş ışınlarının parabolik çanak şekilli yansıtıcıya her zaman dik gelmesinin sağlanması ve gelen güneş ışınımını odak noktası civarında yoğunlaştırılabilmesi için, güneş iki ekseninde takip ettirilmelidir. Odak noktasında, gelen ışınımı ısı enerjisine dönüştürmek için kullanılan bir **alıcı** bulunmaktadır. Alıcıya gelen yoğunlaştırılmış güneş ışınımı, soğularak ısı enerjisine dönüştürülür ve çalışma akışkanına iletilir ve böylelikle çalışma akışkanı **güç çevrim ünitesinde** ısı kaynak olarak kullanılır. Güç çevrimi için genelde iki teknik kullanılmaktadır: İlki ve daha az kullanılanı, birçok çanağın alıcılarının bağlanmış olduğu, ısı transferi akışkanı kullanılarak merkezi bir elektrik üretim sistemine toplanan ısı enerjisi ileterek yapılandır. Bu tasarım, yüksek sıcaklıklarda çalışacak borulama ve pompalama sistemleri gerektirdiğinden ve ısı transferi akışkanının ısı enerjisini taşıması sırasında oluşabilecek kayıplar söz konusu olduğundan çok kullanışlı değildir. Isıl depolama işlemi bu sistemde kullanılabilir. Daha yaygın olan ikinci yöntemde, her bir çanağın odak noktasına veya yakınına monte edilmiş Stirling motoru kullanılmaktadır. Stirling motoru alıcıdan ısı enerjisini soğurur, bu enerjisi mekanik iş üretmek için kullanır. Motora bağlı olan alternatör ise mekanik işi elektrik enerjisine çevirir. Bu tür tasarımın bir avantajı, yansıtıcı ve motorun ayrı parçalar şeklinde değerlendirilebilmesidir. Bunun sayesinde fosil yakıtlar kullanılarak hibrit sistemler kolaylıkla oluşturulabilir. Fakat bu tasarımdaki önemli bir kısıtlama da ısı depolama işleminin yapılamaması dolayısı ile sistemin sadece güneş oluşu saatlerinde çalışabilmesidir [19].

Parabolik çanaklı yoğunlaştırmalı güneş güç sistemlerinin büyük bir çoğunluğunda, doğrudan elektrik üretimi için Stirling motoru tercih edilmesine karşın, farklı olarak Brayton, Rankine veya Rankine/Brayton kombine yapılı çevrimleri de kullanılabilir. 950°C'nin altındaki sıcaklıklarda Stirling motorları iyi performans gösterirken, daha yüksek sıcaklıklarda kombine yapılı çevrimlerde

kullanılan gaz türbinleri daha yüksek verimlere ulaşabilmektedirler [19]. Çanak-stirling sistemleri, büyük veya küçük şebeke bağlantılı uygulamalarda, su pompalama veya damıtmada kullanılacak şebeke bağlantısız bağımsız uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 2.1. Örnek bir parabolik çanaklı yoğunlaştırımalı güneş güç sistemi

2.1. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırımlı Güneş Güç Sistemi Bileşenleri

Bu kesimde, Şekil 2.1'de gösterilen parabolik çanaklı yoğunlaştırımlı güneş güç sistemi bileşenleri ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.1.1. Yoğunlaştırıcı Çanak

Yoğunlaştırıcı çanak, çanak sistemlerinde kullanılan yoğunlaştırıcı, parabolik çanak şekilli ve yansıtıcı bir yüzeydir. Parabolik çanak yüzeyi, metal ile kaplanmış cam veya plastik malzemeden oluşur. Yüzeye gelen güneş ışınımı odak adı verilen daha küçük bir alana yansıtılır. Odağın boyutu yoğunlaştırıcı şeklinin hassasiyetine, yansıtıcılığına ve odak uzaklığına bağlıdır. Kullanılan parabolik çanak yansıtıcıların yoğunlaştırıcı açıklık alanının, alıcı alanına oranı olan geometrik yoğunlaştırma oranı 1500-4000 aralığındadır. Yoğunlaştırıcı çapları ise 1-25 m aralığında değişir [21]. %25 civarındaki ortalama sistem verimi göz önüne alınarak parabolik yoğunlaştırıcının boyutlandırması yapılmak istendiğinde, sisteme giren ısı enerjisi, çıkan elektriksel enerjinin dört katı olacak şekilde planlanmalıdır. Giriş kesiminde açıklandığı ve Çizelge 1.2'de görüldüğü gibi, **SES** ve **WGA** çanak stirling sistemleri sırası ile çıkış güçleri 25 kW ve 10 kW, çapları ise 11 m ve 7,5 m olacak şekilde tasarlanmıştır [21]. Yoğunlaştırıcı çanaklarda kullanılan arkası gümüş sırlı aynaların yansıtıcılığı, %91-95 arasındadır [14]. En dayanıklı aynalar arkası gümüş sırlı cam aynalardır. Maliyeti düşürmek için yansıtıcı polimer filmler de kullanılmıştır. En yaratıcı parabolik ayna çeşidi gerdirilmiş zar kullanılan tiplerdir. Bu tip aynalarda, iki zar bir kasnak üzerinde gerilmekte ve ilk gerilen zar vakum ile çekilerek parabolik bir şekil oluşturulmaktadır [21].

Güneş enerjisini yoğunlaştırmada kullanılan parabolik yapının temel görevi, üzerine dik gelen güneş ışınımını parabolik çanağın tepe noktasından (vertex) odak uzaklığı (f) kadar uzaklıkta noktasal olarak odaklamaktır.

Ekseni z ekseni ile kesişen bir parabolik çanağın kartezyen koordinatlarda ifadesi,

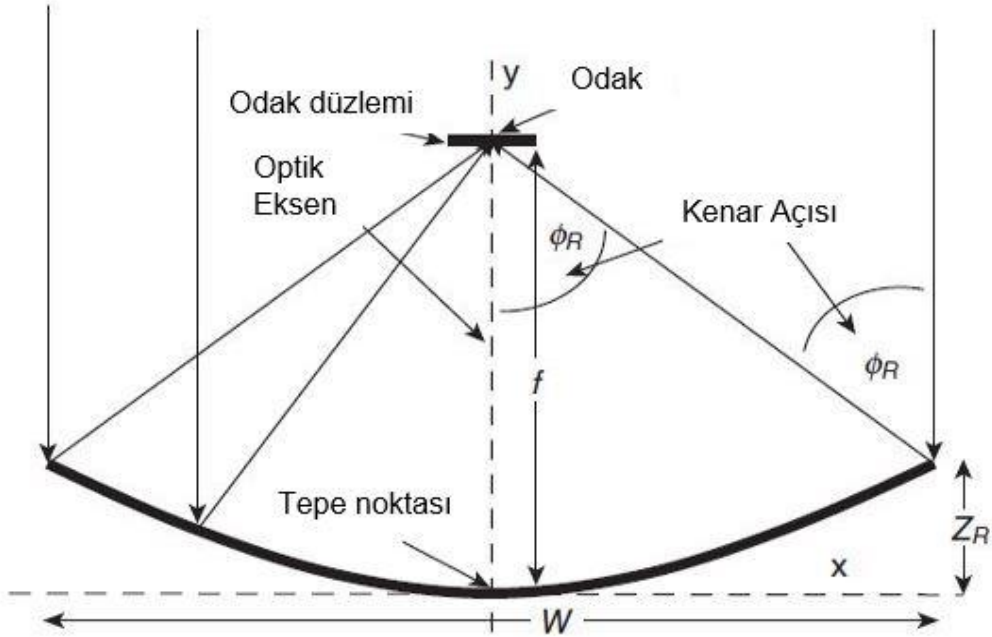
$$z = \frac{r^2}{4f} = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (2.1.)$$

eşitliği ile verilir. Şekil 2.2'de bir parabolik çanak kesiti görülmektedir [8]. Şekilden de görüldüğü gibi, kenar açısı (rim angle), Φ_R , optik eksen ve parabolün fiziksel kenarından odak noktasına doğru çizilecek doğru arasında kalan açıdır. Odak

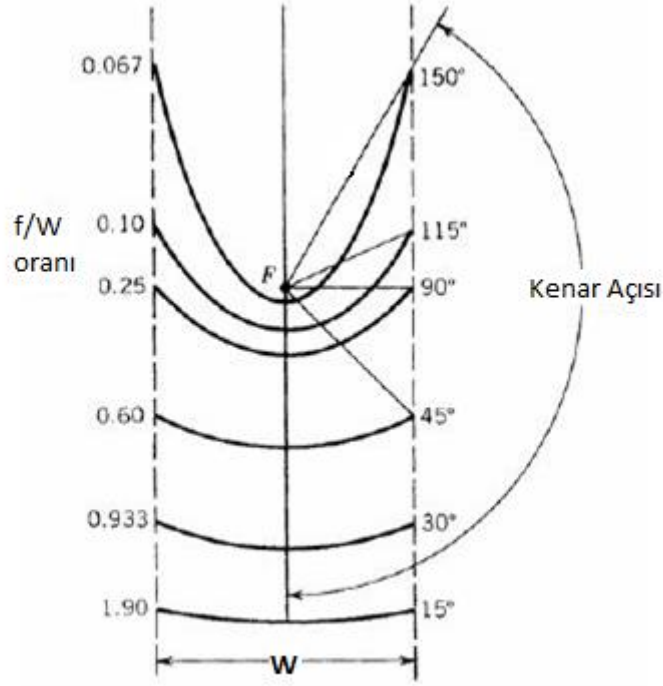
uzaklığı ve kenar açısı kullanılarak parabolik çanağın kesit geometrisi hakkında tam bilgi sahibi olunabilir. W genişlik/çap, Z_R ise derinlik olmak üzere, parabolik çanağın kenar açısı,

$$\tan \phi_R = \frac{W/2}{f - Z_R} = \frac{4fW/2}{4f^2 - (W/2)^2} \quad (2.2.)$$

eşitliği ile verilir [4, 8, 10]. Şekil 2.3'te aynı odak noktası için farklı kenar açı değerlerine sahip parabolik çanak kesitleri görülmektedir. Kenar açısı değiştikçe, çanağın eğriliği de değişmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, kenar açısı küçüldükçe, yüzey düzleşmekte ve odak noktası uzaklığının çanak çapına oranı artmaktadır. Kenar açısının, maksimum yoğunlaştırma oranı, yakalama faktörü, kolektör eğim hatası ve ısı kayıplar üzerinde etkisi olduğundan, alıcı açıklık alanı boyutlandırmasından önce, kenar açısının ne olacağına karar verilmelidir.



Şekil 2.2. Parabolik çanak kesiti /parabol



Şekil 2.3. Ortak bir odak noktası için kenar açısı değişimleri

Güneş ışınımının yoğunlaştırılması, yoğunlaştırıcı açıklık alanına (A_a) gelen güneş ışınımının daha küçük alana sahip bir alıcı/soğurucu (A_r) üzerine, ışığı kırarak veya yansıtılarak düşürülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Optik yoğunlaştırma oranı (YO_{optik}); alıcıdaki güneş akısının (I_r), açıklık alanına gelen akıya (I_a) oranı olarak tanımlanır ve

$$YO_{optik} = \frac{I_r}{I_a} \quad (2.3.)$$

eşitliği ile ifade edilir [4, 8, 10]. Geometrik yoğunlaştırma oranı ise,

$$YO_{geometrik} = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.4.)$$

bağıntısı ile verilir [4, 8, 10]. Yansıma ve kırılmalar ile meydana gelen optik kayıplar da burada hesaba katılmış olacağından, optik yoğunlaştırma oranı gerçek yoğunlaştırma oranını verir. Buna karşın, alıcı alanı ile bir ilişkisi olmadığından alıcı alanı ile orantılı olan ısı kayıpları hakkında bir öngörü oluşturulmasında yardımcı olamaz. Genellikle analizlerde geometrik yoğunlaştırma oranı kullanılır [4].

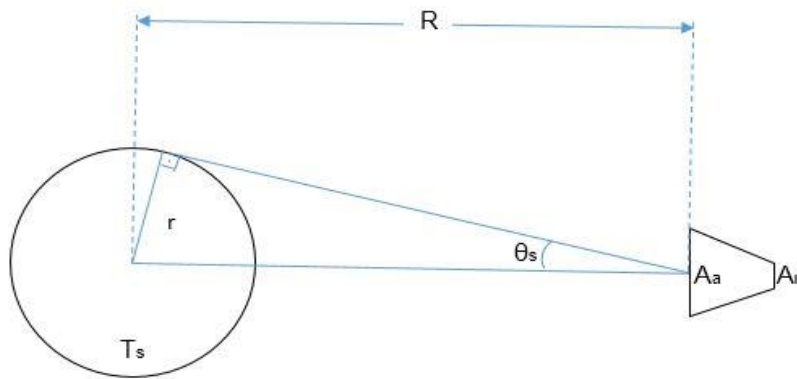
Yoğunlaştırıcı/yansıtıcı açıklık alanı, A_a , yoğunlaştırıcının performansının tahmini için önemli bir parametre olduğundan, tasarım sırasında ele alınacak en önemli kriterlerden biridir. Basit olarak açıklık, çapı W olan dairesel bir alan olarak düşünüldüğünde, açıklık alanı

$$A_a = \frac{\pi W^2}{4} \quad (2.5.)$$

olarak hesaplanır. Parabolik çanağın açıklık alanı, aynı zamanda odak uzaklığı ve kenar açısı terimleri cinsinden de ifade edilebilir [4, 8, 10].

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \phi_R}{(1 + \cos \phi_R)^2} \quad (2.6.)$$

Literatürde, çanak üzerine gelen güneş ışınımının yoğunlaştırmasının üst limitinin belirlenmesinde basit bir kriter geliştirilmiştir. Rabl tarafından açıklanan bu maksimum yoğunlaştırma oranı, termodinamiğin 2. yasasının, güneş ve alıcı arasındaki ışıma değişimine uygulanmış halini temel almaktadır. Şekil 2.4'te güneşten açıklık alanı A_a olan yoğunlaştırıcı yüzey aracılığıyla açıklık alanı A_r olan alıcıya yapılan ışıma transferi gösterilmiştir [4, 10]. Şekilde, yüzey sıcaklığı T_s olan bir siyah cisim benzeri ışıma yapan ve yarıçapı r olan küresel bir kaynak olarak kabul edilen Güneş, kendisinden R kadar uzaklıktaki yoğunlaştırıcı yüzey ve yoğunlaştırıcı



Şekil 2.4. Yoğunlaştırıcı yüzey vasıtasıyla, güneşten alıcıya yapılan ışıma transferinin şematik gösterimi

tarafından yoğunlaştırılan ışımanın düştüğü daha küçük yüzey olan alıcı ele alınmıştır. Burada görsel sadelik açısından alıcı yüzeyi yoğunlaştırıcı yüzeyin

arkasında gösterilmiştir. Alıcı, yoğunlaştırıcının önünde bulunduğu da aynı işlemler geçerlidir. Eğer yoğunlaştırıcı mükemmel ise ve kayıpları yoksa, açıklığa kaynaktan gelen ışınım, kaynağın yaydığı ışınımın açıklık tarafından tutulan kesri kadar olacaktır. Güneş bir siyah cisim olmamasına karşın, yaklaşık analiz söz konusu olduğunda T_s sıcaklığında bir siyah cisim olduğu kabulü yapılarak, Güneş'ten alıcıya ulaşan enerji miktarı Q_{s-r} ,

$$Q_{s-r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (2.7.)$$

eşitliği ile ifade edilir [4, 10]. Burada σ , Stefan Boltzmann sabitidir.

Siyah cisim gibi mükemmel bir alıcı, $\sigma A_r T_r^4$ 'e eşit enerji yayacağından ve bu enerjinin E_{r-s} kesri güneşe ulaşacağından, yüzey sıcaklığı T_r olan alıcının yaydığı enerji miktarı Q_{r-s} ,

$$Q_{r-s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r-s} \quad (2.8.)$$

bağıntısı ile verilir [4-10].

Alıcıda kayıpların olmadığı düşünülüğünde, alıcı, kaynak sıcaklığına eşit oluncaya kadar ısınacaktır. T_r ve T_s sıcaklıkları eşit olduğunda, termodinamiğin 2. yasasına göre Q_{r-s} ve Q_{s-r} eşit olmalıdır.

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r-s} \quad (2.9.)$$

E_{r-s} 'nin maksimum değeri 1 olduğundan, Şekil 2.4 ve Eş. 2.9 yardımıyla, yoğunlaştırma oranı,

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (2.10.)$$

$$YO_{max,3D} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (2.11.)$$

olarak bulunur [4-10].

Termodinamiğin ikinci yasası, yalnız yoğunlaştırmanın geometrik limitlerini değil, aynı zamanda yoğunlaştırıcının çalışma sıcaklığını da belirlemede önemlidir. T_s Güneş'in etkin yüzey sıcaklığı, τ alıcının geçirgenliği ve α_s alıcının soğurma

katsayısı olmak üzere; Güneş'in yaydığı ve yoğunlaştırıcının alıcısı tarafından soğrulan ışınım,

$$q_{soğrulan} = \tau \alpha_s A_a \sin^2 \theta_s \sigma T_s^4 \quad (2.12.)$$

eşitliği ile verilir [4-10].

Taşınım ve iletim ile kayıplar göz ardı edilebilirse, ϵ_{ir} alıcının kızılötesi yayıcılığı olmak üzere, ışıma ile ısı kaybı,

$$q_{ışıma} = \epsilon_{ir} A_r \sigma T_r^4 \quad (2.13.)$$

olarak yazılır [4-10]. Alıcıdaki enerji dengesi Eş. 2.14 ile verilmektedir. Burada η_c alıcı tarafından soğrulan ve çalışma akışkanına iletilen enerji kesridir.

$$q_{soğrulan} = q_{ışıma} + \eta_c q_{soğrulan} \quad (2.14.)$$

Enerji dengesinde, Eş. 2.4 ve Eş. 2.13 kullanılarak alıcı sıcaklığı,

$$T_r = T_s \left[(1 - \eta_c) \tau \frac{\alpha_s Y O_{geometrik}}{\epsilon_{ir} Y O_{max}} \right]^{1/4} \quad (2.15.)$$

bağıntısı ile bulunabilir [4-10].

İzleme sistemleri çalışma prensiplerine göre pasif, algıçlı, astronomik veriler ile izleme olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Pasif izleme sistemleri aynı zamanda akışkanlı sistemler olarak da adlandırılmaktadır. Bu sistemlerde hiç bir elektronik eleman veya motor kullanılmamaktadır. Genellikle akışkan olarak Freon gazı kullanılan pasif izleme sistemlerinde borular içindeki akışkan güneş ışınları ile ısınarak genleşir, genleşen akışkan pistonları hareket ettirir ve güneş izlemesi yapılır. Algıç olarak ışığa duyarlı direnç (LDR), LED ve fotodiyot kullanılabilen algıçlı sistemlerde, uygun şekilde konumlandırılan ışığın şiddetine duyarlı algıçlar, birbirleri ile elektronik devreler yardımıyla karşılaştırılır ve motorlar yardımıyla ışık şiddetinin fazla olduğu yöne doğru yönelim sağlanır. Algıçlı sistemlerde ışık şiddetleri birbirleri ile kıyaslandığı için düşük ışık şiddetlerinde bile izleme işlemi devam ettiği için, gün doğumu, gün batımı, yağmur, kar, sis gibi durumlarda sistem doğrudan gelen ışınım ne olursa olsun, en çok ışınım gelen yöne dönme eğilimindedir. Bu da en yüksek enerji üretimini sağlasa da, en çok ışık gelen yönün bulunması için sistemin tarama

durumunda kalması ve izleme için motorun daha çok enerji harcaması anlamına gelebilir. Uzun süreli yağışlarda, çok bulutlu günlerde sistem ürettiğinden daha fazla enerjiyi kendisi için harcamak zorunda kalabilmektedir. Astronomik veriler ile izleme sistemleri algıçlı sistemler ile aynı prensipte çalışır ancak, motorların hareketi için gereken sinyal algıçların kıyaslanması sonucu değil, bir bilgisayar programı tarafından üretilir. En büyük artısı, doğrudan güneş ışınımının soğurulması için istenilen hassasiyette izleme yapılabilmesidir. En büyük eksisi ise, dolaylı ışınımı algılamak mümkün olmadığı için bilinçli olarak bu ışınımı değerlendirmek olası değildir [34-35].

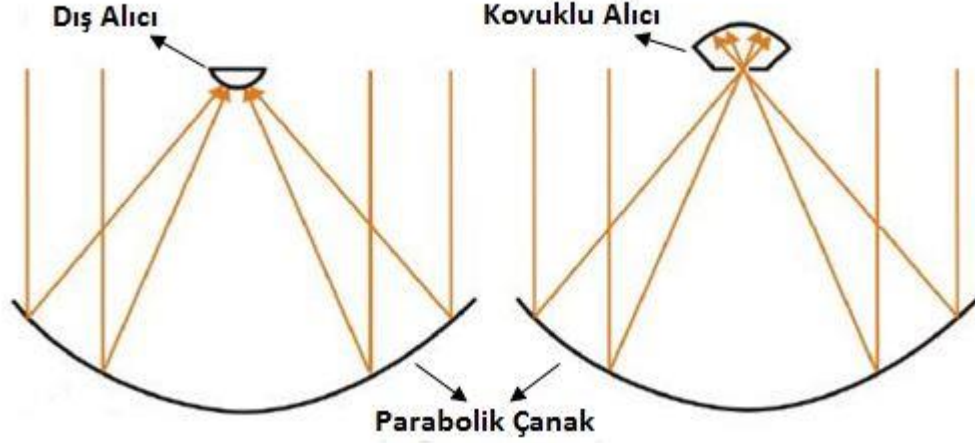
2.1.2. Alıcı/Soğurucu

Parabolik çanak sisteminin alıcı ve hemen arkasındaki soğurucudan oluşan birimi, çanak ile güç çevrim ünitesi arasında bulunan ve sistemin anahtar bileşeni olan bir ara mekanizmadır. Alıcı önce parabolik çanaktan yansıtılan ışınımın büyük bir miktarını soğurur ve ısı enerjisine çevirir ve daha sonra, bu ısı enerjisini çalışma akışkanına iletir. Bir alıcıda olması istenilen özellikler, yüksek soğurma oranı ve iyi ısı transfer karakteristikleri göstermesidir.

Stirling motoru ile bütünleşik çalışan alıcılar, parabolik çanaktan gelen ışınımın gireceği bir **açıklık** ve çalışma akışkanına aktarılacak ısı enerjisinin soğurulacağı **soğurucu**dan oluşmaktadır. SES ve WGA sistemleri için alıcı açıklık çapı, ($d_{açıklık}$) 14-20 cm aralığındadır (Çizelge 1.2) [21].

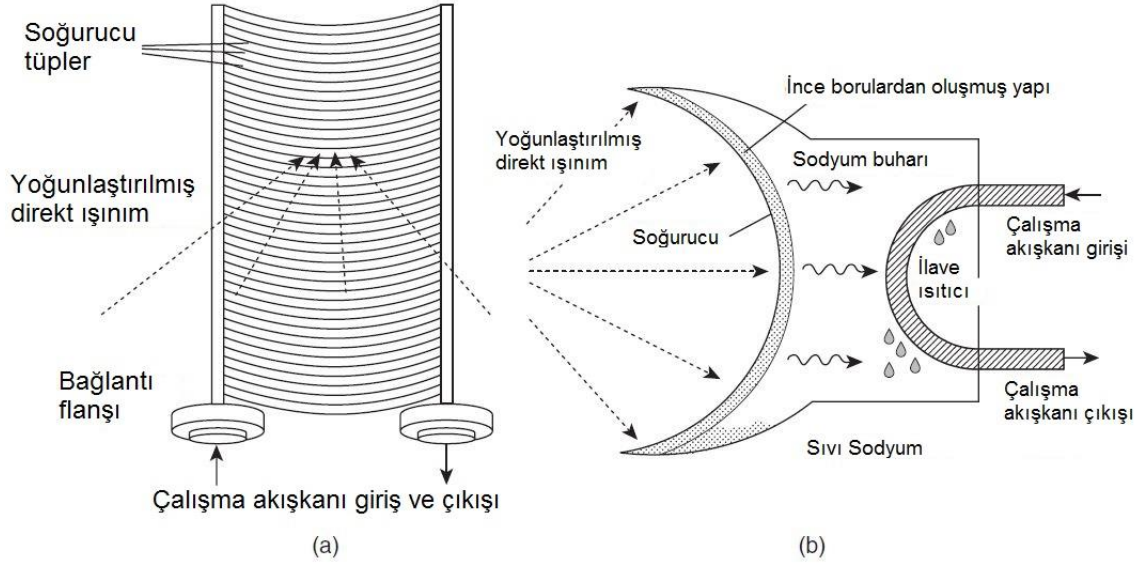
Stirling motoru kullanan parabolik çanaklı (çanak-stirling) sistem için **dış** (external) veya **kovuklu** (cavity) **alıcılar** kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te dış alıcı ve kovuklu alıcının şematik gösterimi verilmiştir [8]. Farklı yönlerden gelen ışınımı soğurabilen dış alıcılar genellikle yarı küresel yüzeye sahiptir. Kovuklu alıcılarda ise ışınımın kovuğa girebilmesi için bir açıklık bulunur. Kovuklu alıcıda, çanak tarafından yansıtılan ışınımın büyük bir kısmı kovuk içinde kalır ve tekrar soğurulabilir, dolayısı ile toplam ışınım kaynağı ısı kaybı azaltılmış olur. Kovuklu alıcılarda taşınım ile ısı kaybı, koruması olmayan dış alıcılara göre daha azdır. Soğurucu boyutlarının açıklık boyutundan daha büyük seçilebileceği tasarımlarda ısı kayıplarının azaltılması, kovuklu alıcıların önemli bir avantajıdır. Parabolik çanaktan gelen ışınım, açıklık alanından daha büyük olan soğurucu alanına

gelmeden önce kovuk içinde dağılır ve ışınımın yoğunluğu azalır. Böylece kullanılan malzemeler fazla ısıl gerilim altında kalmamış olur. Açıklık alanı, soğurucu yüzey alanından çok daha küçük olduğundan, ısıl kayıplar da azalmış olur.



Şekil 2.5. Dış ve kovuklu alıcılar

Kovuklu alıcılar, ışınımı doğrudan alan DIR (Direct Illumination Receiver) tipi alıcılar ve dolaylı alan IIR (Indirect Illumination Receiver) tipi alıcılar olmak üzere iki çeşittir (Şekil 2.6) [8]. Şekilden görüldüğü gibi DIR tipi alıcılarda, stirling motorunun içinde bulunan soğurucu tüpler aracılığı ile çalışma akışkanı doğrudan ısıtılırken, IIR tipi alıcıda çalışma akışkanı dolaylı olarak, aracı bir ısı transfer akışkanı kullanılarak ısıtılır. Sodyum gibi sıvı bir metal olan bu aracı ısı transfer akışkanı soğurucuda ısıtılır ve buharlaşır. Stirling motoru çalışma akışkanının bulunduğu ısıtıcı tüplerde yoğunlaşır ve sahip olduğu ısı enerjisi çalışma akışkanına iletilir. Daha sonra yer çekimi etkisi ile tekrar soğurucuya geri döner [4, 8, 10].



Şekil 2.6. (a) DIR tipi alıcı (b) IIR tipi alıcı

2.1.3. Güç Çevrim Ünitesi

Stirling Motoru

Yoğunlaştırılmış güneş ışınımından elde edilen ısı enerjisi, Stirling çevrimi kullanan Stirling motoru ve ona bağlı bir jeneratör tarafından elektrik enerjisine çevrilebilir. Stirling motoru, sıcak-gaz motorları grubuna dahildir ve aynı çalışma akışkanının motor içinde sürekli kullanıldığı kapalı termodinamik süreçleri kullanır. Otto çevrimi ve Diesel çevrimi kullanan içten yanmalı motorların tersine, Stirling motorunda ısı enerjisi bir dış kaynaktan sağlandığından, dış ortama egzoz gazı salımı yapmaz ve güneş enerjili uygulamalar için uygundur.

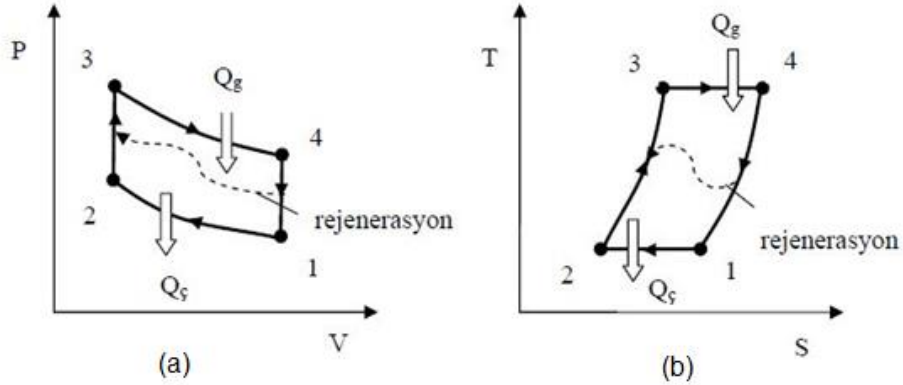
Stirling motorunun temel prensibi çalışma akışkanının farklı sıcaklıklarda çevrimsel olarak sıkışması ve genişlemesi ilkesine dayanır. Bu sıkışma ve genişlemeler sonucunda ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür [8, 10, 36]. İdeal süreç, soğuk ortamdaki eşsıcaklık (izotermal) sıkışmaların, sıcak ortamdaki eşsıcaklık genişlemelerin, sabit hacimde ısıtma ve soğutma işlemlerinin çevrimi şeklindedir. Periyodik sıcaklık değişimi, çalışma akışkanının biri sürekli yüksek sıcaklıkta diğeri ise sürekli düşük sıcaklıkta tutulan iki farklı hacim arasında hareket etmesi ile sağlanır.

Stirling çevrimi sıcak hava motorları için ideal bir çevrimdir. İdeal Stirling çevrimi, ikisi sabit sıcaklık süreci, ikisi sabit hacim süreci olmak üzere dört tersinir süreçten oluşur. Bu süreçler basınç-hacim (P-V) ve dağıntı (entropi)-sıcaklık (T-S) grafikleri olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde;

1→2 sistemden dış ortama ısı çıkışının olduğu sabit sıcaklıktaki sıkıştırılma sürecini, 2→3 rejeneratörden çalışma akışkanına sistem içi ısı transferinin gerçekleştiği sabit hacimdeki yer değiştirme sürecini,

3→4 sisteme dış kaynaktan ısı girişinin olduğu sabit sıcaklıktaki genişleme sürecini, 4→1 çalışma akışkanından rejeneratöre sistem içi ısı geçişinin gerçekleştiği sabit hacimdeki yer değiştirme sürecini

göstermektedir. Yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı gazın genişlemesi sırasında yapılan iş, düşük basınçlı ve düşük sıcaklıklı gazın sıkıştırılması sırasında yapılan işten daha fazla olduğundan, Stirling motoru net iş üretir ve elektrik üretimi için kullanılan jeneratör çalıştırılmış olur.



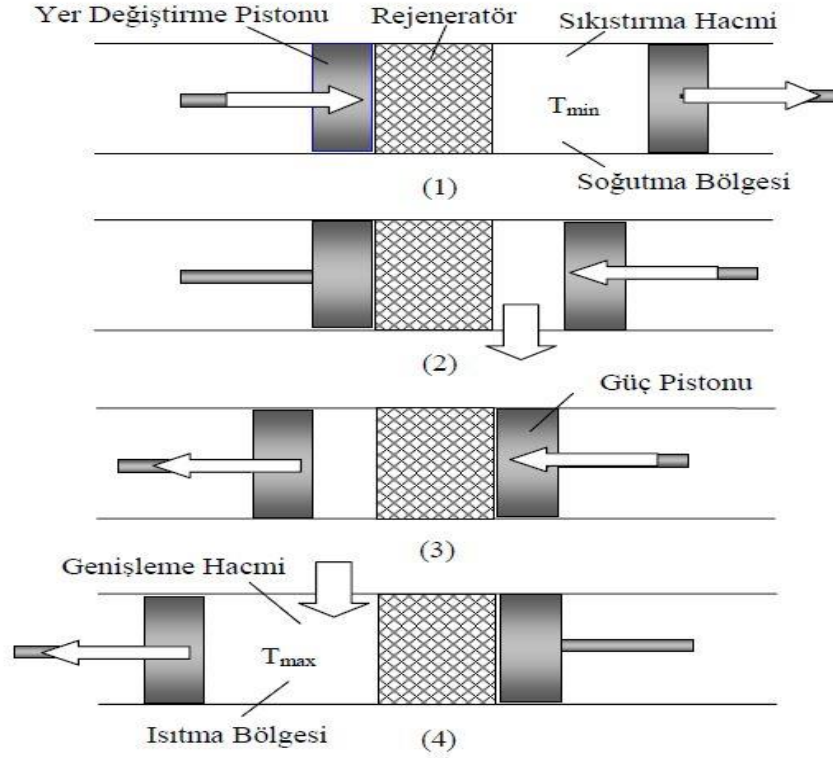
Şekil 2.7. Stirling Çevrimi (a) P-V ve (b) T-S diyagramları

Stirling çevrimi kullanan bir sıcak hava motorunda Stirling çevrimini anlatmak için Şekil 2.8’de görüldüğü gibi ikili piston sistemi kullanılır. Bu sistemde, pistonlardan bir tanesi yer değiştirme pistonudur ve çalışma akışkanının sıcak ve soğuk bölge arasında taşınmasını sağlar. Diğer piston ise motordaki gücü üretmektedir. Sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki sıcaklık farkını arttırmak için Stirling çevriminde rejeneratör kullanılır. Rejeneratör, ısı kapasitesi yüksek, gözenekli metal bir yapıdır. Çalışma akışkanının ısı enerjisi geçici olarak burada depolanır. Stirling motorunda

rejeneratör %98'den fazla verim sağlayabilir [36]. Stirling motoruna rejeneratör eklendiğinde, çalışma akışkanının genişleme alanından sıkıştırılma alanına geçerken ön soğutma, sıkıştırılma alanından genişleme alanına giderken de ön ısıtma yapılacağından motorun verimi artar. Carnot çevriminden de bilindiği gibi sıcak ve soğuk ısı kaynaklarının sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça ısı verim artmaktadır. Rejeneratör kullanımı motor çıkış gücünü artırmaz, aksine içindeki basınç kayıpları nedeni ile çıkış gücünde küçük bir azalmaya neden olur. Fakat motor veriminde sağlayacağı artışın yanında bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir [8, 36].

Rejeneratör ve pistonlar arasında kalan bölgelerden biri en yüksek sıcaklığa ulaşılan genişleme bölgesi, diğeri en düşük sıcaklık değerinin elde edildiği sıkıştırma bölgesidir. Genleşme hacmi dış kaynak tarafından ısıtılırken, sıkıştırma hacmi de başka bir çevrim kullanılarak soğutulmaktadır. Genellikle bu soğutma bir radyatör ve fan tarafından zorlanmış hava soğutması ile gerçekleştirilir [21].

Stirling Çevrimi şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Stirling çevrimi başladığında çalışma akışkanının tamamının sıkıştırma hacminde olduğu varsayılır. **1-2 durum değişiminde**, (Sıkıştırma süreci) sıkıştırma pistonu rejeneratöre doğru hareket ederken, genişleme hacmi tarafındaki piston konumu değişmez, sabit kalır. Çalışma akışkanı sıkıştırma bölgesinde sıkıştırıldığında, basınç artar. Basınç arttıkça sıcaklık da artma eğilimi göstereceğinden, bu süreçte soğutma yapıldığında sıcaklık sabit kalacaktır. **2-3 durum değişiminde**, sıkıştırma pistonu rejeneratöre doğru ilerlerken, genişleme pistonu da rejeneratörden uzaklaşır. Bu işlem sırasında çalışma akışkanı rejeneratörden geçerek, sıkıştırma hacminden genişleme hacmine doğru ilerler ve bu geçiş sırasında rejeneratörde depolanan ısı enerjisi, çalışma akışkanına transfer edilir, akışkanın sıcaklığı artar. Sabit hacimde sıcaklık artınca, dolaylı olarak basınç da artacaktır.



Şekil 2.8. Stirling Çevrimi şematik gösterimi

3-4 durum değişiminde, genişleme pistonu rejeneratörden uzaklaşmaya ve en uzak noktaya doğru hareketine devam etmektedir. Bu sırada sıkıştırma pistonu rejeneratöre en yakın konumda yer almaktadır. Genişleme işleminde, hacim arttığından basınç düşer, dolaylı olarak sıcaklık düşer. Bir dış kaynaktan sisteme ısı enerjisi transferi olacağından akışkan sıcaklığı sabit kalır. **4-1 durum değişiminde** ise, sabit hacimde çalışma akışkanının rejeneratörden geçerek, genişleme hacminden sıkıştırma hacmine dolması için iki piston eş zamanlı olarak hareket eder. Çalışma akışkanının rejeneratörden geçişi sırasında ısı enerjisi, çalışma akışkandan rejeneratöre aktarılır. Böylece çalışma akışkanının sıcaklığı düşer ve minimum sıcaklık değerine sahip olan çalışma akışkanı sıkıştırma hacmine dolar. Bu süreçte rejeneratörde depolanan ısı, izleyen çevrimin 2-3 durum değişiminde çalışma akışkanına transfer edilir. İdeal Stirling Çevriminin termodinamiğin 1. ve 2. yasaları kapsamında incelemesi EK-1'de verilmiştir.

Stirling motoru performans analizi için geliştirilmiş, birçok yöntem bulunmaktadır. Analiz yöntemleri arasında, **İzotermal Analiz**, **Schmidt Analizi**, **Adyabatik Analiz** gibi en ideal durumları inceleyen yöntemler, daha gerçekçi bir model olan **sözde-**

kararlı (quasi-steady) **akış yöntemi** ve deneysel verilere dayanarak ortaya çıkmış **pratik performans tahmin yöntemleri** bulunmaktadır [21, 36-37]. Bu yöntemler arasında teorik analiz olanlar, Stirling motorunda meydana gelebilecek kayıpları doğru bir şekilde hesaba katmamaktadır. Dolayısı ile Stirling motorunun performans tahmininde daha pratik metotların kullanılması gerekir ve bu metotlar deneysel verilere dayanarak çıkartılmış metotlardır. Böylece performans ile ilgili daha doğru sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bu tez çalışmasında söz edilen yöntemlerden, sadece **Pratik performans tahmin yöntemlerinden** biri olan Beale eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. William Beale, farklı motorların deneysel verilerini kullanarak Stirling motoru çıkış gücünün

$$P_{SM} = Be p_{ort} V_{süpürme} f \quad (2.18)$$

bağıntısı ile verileceğini ileri sürmektedir [21, 36-37]. Burada;

Be, Beale sayısı,

p_{ort} , ortalama motor basıncı,

$V_{süpürme}$, motorun süpürme hacmi,

f, motor frekansdır.

Stirling motor verimi genişleme ve sıkıştırma bölgeleri sıcaklıklarına bağlı olduğundan, Eş. 2.18'de bulunan ifadeye sıcaklık düzeltme katsayısı eklenerek, motor çıkış gücü hesabının daha doğru yapılabilmesi sağlanır. Deneysel veriler de, genişleme bölgesi sıcaklığı çoğunlukla sabit kalırken, sıkıştırma bölgesi sıcaklığı gün içinde ortam sıcaklığı ve güneş ışınımına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [21, 36]. Böylece Eşitlik 2.18'e sıcaklık düzeltmesi eklenerek

$$P_{SM} = Be_{düzeltilmiş} p_{ort} V_{süpürme} f \left(1 - \sqrt{\frac{T_{sıkıştırma}}{T_{genişleme}}} \right) \quad (2.19.)$$

ifadesi elde edilir [21].

Stirling motorunda çalışma akışkanı olarak genellikle hava, Helyum veya Hidrojen kullanılır. Çalışma akışkanının seçiminde, akışkanın ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve akıcılık (viskozite) gibi özellikler önemlidir. Yüksek ısı iletkenlik

katsayısına ve yoğunluğa sahip bir akışkan ısı transfer kapasitesini ve ısı değiştiricilerin verimini arttırır. Havanın yoğunluğu Hidrojen ve Helyumdan daha yüksek olduğu için çalışma akışkanı olarak kullanılabilir. Hava kullanılması durumunda contalarda meydana gelecek sızıntılar önlenemesine karşın, havanın içerdiği oksijene bağlı olarak sıcaklık arttıka malzemelerde bozulmalar olacak ve zaman geçtikçe motor verimi dūřecektir. Ayrıca havanın ısıl iletkenliği de dūřük olduğundan yüksek motor hızlarında motor veriminde artış sağlanamayacaktır. Bu nedenle yüksek verimli Stirling motorlarında hava kullanılmamakta, Hidrojen veya Helyum tercih edilmektedir [21, 36-37].

Çalışma akışkanının bulunduğu bōlgeler ve rejeneratōrde meydana gelebilecek basınç kayıpları çalışma akışkanın akıcılığı ve yoğunluğuna bağlıdır. Akıcılığı ve yoğunluğu dūřük bir akışkanın kullanılması ile basınç dūřūřleri azalır, bu da motor verimini arttırıcı bir etkindir. Helyum veya Hidrojen kullanımının, contalarda meydana gelebilecek sızıntıları kontrol etmek zorluğu ve Hidrojenin bazı malzemelerce soğurulup oksijen ile karşılaştığında yanıcı ve tehlikeli olması gibi dezavantajları bulunmaktadır [21, 36-37]. Çizelge 2.1'de özellikleri verilen sistemlere bakıldığında SAIC/STM, SES ve WGA sistemlerinde çalışma akışkanı olarak Hidrojen, SBP sisteminde ise Helyum kullanılmaktadır.

Jeneratōr

Stirling motoru kullanılan parabolik anaklı gū sistemlerinde Stirling motorunun ürettiği mekanik enerjiyi elektrik enerjisine eviren ve jeneratōr denilen bir yapı bulunmaktadır. Elektrik şebekesine bağlanan kinematik Stirling motorlarında çoğunlukla indüksiyon jeneratōrleri kullanılır. İndüksiyon jeneratōrleri, şebeke ile eşzamanlanarak gücü, 230V veya 400V gerilimde ve tek veya üç fazlı olarak şebekeye sağlayabilir. İndüksiyon jeneratōrleri mekanik enerjiyi elektrik enerjisine %94 verimle çevirmektedir [8, 21].

Soğutma Sistemi

Stirling motorunda sıkıştırma bölgesi sıcaklığını düşürmek, dolayısı ile motor verimini yükseltmek amacıyla soğutma sistemi kullanılır. Parabolik çanak-stirling sistemlerinde kullanılan soğutma çevriminde, radyatör-fan sistemi, pompa oluşan ve ısı değiştiricisi olarak görev yapan bir soğutucu bulunmaktadır. Soğutma sistemi elemanı olan radyatör üzerinde bulunan fan, soğutma akışkanını soğutmak için kullanılır. Tipik bir soğutma sistemi Şekil 2.9'da verilmiştir [21]. Şekildeki sıcaklıklar;

$T_{soğ,akışkan,2}$ radyatöre giren soğutma akışkanının sıcaklığı,

$T_{hava,giriş}$ radyatöre fan tarafından verilen havanın sıcaklığı,

$T_{soğ,akışkan,1}$ soğutucuya giren soğutma çevrimi akışkanının sıcaklığı,

$T_{hava,çıkış}$ radyatör çıkışındaki hava sıcaklığı,

$T_{st,akışkan,giriş}$ Stirling motoru rejeneratöründen soğutucuya giren sıcak çalışma akışkanı sıcaklığı,

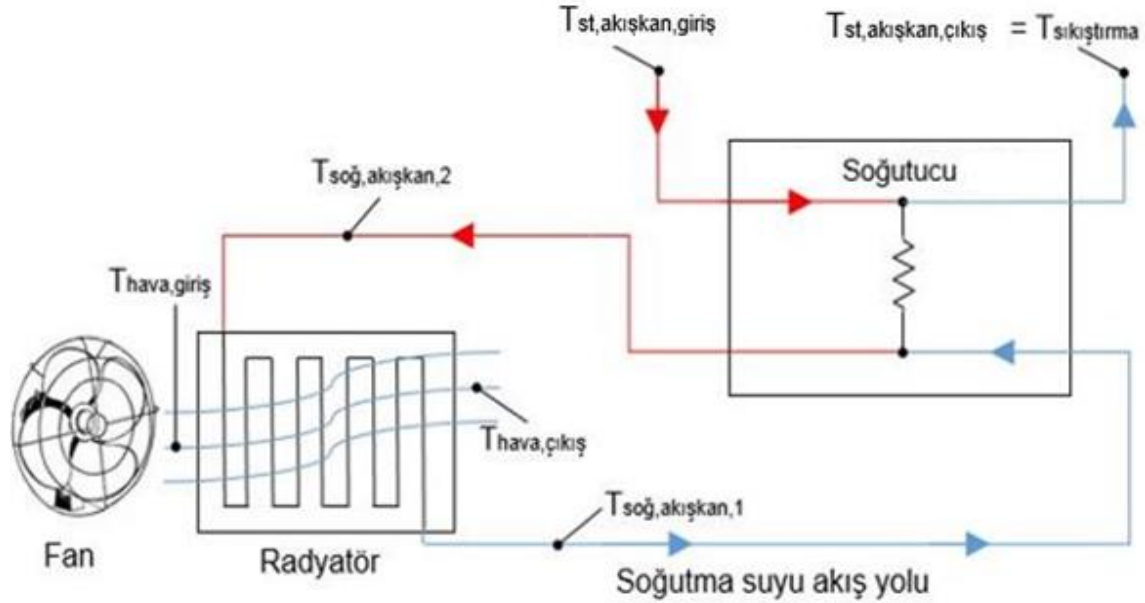
$T_{st,akışkan,çıkış}$ soğutucudan Stirling motoru sıkıştırma bölgesine giren motor çalışma akışkanı sıcaklığı,

olarak tanımlanmaktadır [21]. Şekil 2.9'da verilen sistemde bulunan soğutucunun görevi soğutma çevriminden yararlanarak Stirling motorundan gelen sıcak çalışma akışkanını soğutmak yani sıkıştırma bölgesi sıcaklığını düşürmektir. Aynı zamanda sıkıştırma bölgesi sıcaklığının düşürdüğü için dolaylı olarak verim de artacaktır. Genellikle Stirling motoru soğutucuları kabuk tüp (shell-and-tube) tipi ısı değiştiricilerdir. Tüplerin içinden Stirling motoru çalışma akışkanı geçerken, kabuk kısmından soğutma çevrimi akışkanı geçer. Stirling motorunda çalışma akışkanının bulunduğu her silindirde bir tane soğutucu bulunur.

Soğutma sisteminde kullanılan radyatörün plakalı (plate-finned) bir yapısı vardır. Soğutma sistemi akışkanı radyatör içinde geçerken fanın gelen havanın akış yönü, soğutma sistemi akışkanının akış yönüne dik olur. Şekil 2.9'dan görüldüğü gibi Stirling motorunun akışkanı soğutulurken, soğutma çevrimi akışkanı ısınmakta ve sıcaklığı artmaktadır. Dolayısı ile radyatör ve soğutucu kararlı durumda iken soğutucudan transfer edilen atık ısı enerjisi miktarı,

$$Q_{atik,soğutucu} = \epsilon_{radyatör} C_{min} (T_{soğ,akışkan,2} - T_{hava,giriş}) \quad (2.26.)$$

eşitliği ile verilir [38]. Burada $\epsilon_{radyatör}$ radyatörün etkinlik kesri, C_{min} ise soğutma akışkanı veya havadan hangisinin ısı kapasitesi küçük ise o değeri göstermektedir [38].



Şekil 2.9. Stirling – çanak sistemi için soğutma sistemi diyagramı

— soğuk hat , — sıcak hat

Radyatörün etkinlik kesri, yapılabilecek en yüksek ısı transferi miktarına göre ne kadar ısı transferi gerçekleştiğinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır ve $C_{soğ,akışkan}$ soğutma çevrimindeki akışkanının ısı kapasitesi olmak üzere,

$$\epsilon_{radyatör} = \frac{C_{soğ,akışkan} (T_{soğ,akışkan,2} - T_{soğ,akışkan,1})}{C_{min} (T_{soğ,akışkan,2} - T_{hava,giriş})} \quad (2.27.)$$

eşitliği ile verilir [38].

Soğutucunun etkinlik kesri ve motor çalışma akışkanının ısı kapasitesi, sıkıştırma bölgesi sıcaklığını belirleyici rol oynar. $\epsilon_{soğutucu}$ soğutucunun etkinlik kesri, C_{min} motor çalışma akışkanı veya soğutma çevrimi akışkanının minimum ısı kapasitesi olmak üzere Stirling motorundan soğutucuya transfer edilen ısı miktarı,

$$Q_{atık,stirling} = \varepsilon_{soğutucu} C_{min}(T_{st,akışkan,giriş} - T_{soğ,akışkan,1}) \quad (2.31.)$$

bağıntısı ile verilmektedir [38].

$T_{st,akışkan,giriş}$ sıcaklığı ve soğurucunun etkinlik kesri belirlendikten sonra, $C_{st,akışkan}$ Stirling motoru çalışma akışkanı ısı kapasitesi olmak üzere, $T_{st,akışkan,çıkış}$ diğer bir deyişle sıkıştırma bölgesi sıcaklığı

$$\varepsilon_{soğutucu} = \frac{C_{st,akışkan}(T_{st,akışkan,giriş} - T_{st,akışkan,çıkış})}{C_{min}(T_{st,akışkan,giriş} - T_{soğ,akışkan,1})} \quad (2.32.)$$

eşitliği kullanılarak bulunabilir [38].

Soğutma sisteminin bir diğer elemanı olan pompa, soğutma akışkanının soğutucu ve radyatör arasında bulunan soğutma çevrimi içinde ilerleyebilmesini sağlar. Soğutma akışkanı çevrim içinde ilerlerken, boru duvarları, boruların içindeki çap değişimleri, vanalar ve bunun gibi sebepler ile sürtünme kayıpları meydana gelmektedir. Sistemde kullanılan pompa bu kayıpları azaltıcı etki yapmalıdır.

\dot{V} soğutma akışkanının hacimsel debisi, $\rho_{soğ,akışkan}$ soğutma akışkanının yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi, η_{pompa} pompa verimi ve $P_{yükseklik}$ basınç yüksekliği olmak üzere, pompa gücü

$$P_{pompa} = \rho_{soğ,akışkan} g \dot{V} P_{yükseklik} / \eta_{pompa} \quad (2.35.)$$

eşitliği ile verilir [21].

Basınç yüksekliği, uygulanan basınca göre akışkanın iç enerjisinin bir ölçütüdür. Pompaya uygulanacak güç, soğutma akışkanı akış hızı ve çevrimdeki basınç düşüşü ile orantılı olmalıdır.

Çanak-Stirling sisteminde çalışma sırasında pompa hızı sabit tutulur ve soğutma akışkanı yoğunluğu değişmezse, pompanın harcadığı güç sabit kalacaktır. Pompanın harcadığı güç, N_{pompa} pompa hızı, d_{pompa} kanat çapı, $C_{g,pompa}$ güç katsayısı olmak üzere

$$P_{pompa} = C_{g,pompa} N_{pompa}^3 d_{pompa}^5 \rho_{soğ,akışkan} \quad (2.36.)$$

eşitliği ile verilir [38].

Pompa hızı azaldığında pompa gücü düşecek, buna bağlı olarak da soğutucu ve radyatör etkinlik kesirleri ve motor performansı düşeceğinden, değişken hızlı bir pompa kullanmak çok da elverişli olmayacaktır.

Soğutma sisteminde en fazla güç harcayan bileşen fanıdır. Fanın çalışması Stirling motoru performansını etkilediğinden, motor çıkış gücünü arttırmak için fan hızı optimize edilmelidir. Fanın harcadığı güç,

$$P_{fan} = C_{g,fan} N_{fan}^3 d_{fan}^5 \rho_{hava} \quad (2.37)$$

eşitliği ile verilir. Burada N_{fan} fan hızı, d_{fan} fan kanat çapı, $C_{g,fan}$ güç katsayısı ve ρ_{hava} havanın yoğunluğudur. Eşitlikten görüldüğü gibi fan hızı arttığında, fanın harcadığı güç artacak, dolayısı ile sistem çıktısı azalacaktır [38].

2.2. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırılmalı Güneş Güç Sistemlerinde Kayıplar

Parabolik Çanaklı güneş güç sistemlerinde meydana gelebilecek kayıplar parabolik çanak kayıpları, alıcı kayıpları, Stirling motoru kayıpları olmak üzere 3 kısımda incelenebilir.

2.2.1. Parabolik Çanak Kayıpları

Parabolik çanak hata kaynakları, yansıtıcı eğriliği, takip sistemi algıcı ve mekanizması, alıcı yerleşimi, ayna yansıtıcılığı ve gölgeleme olarak sıralanabilir [10-11, 21].

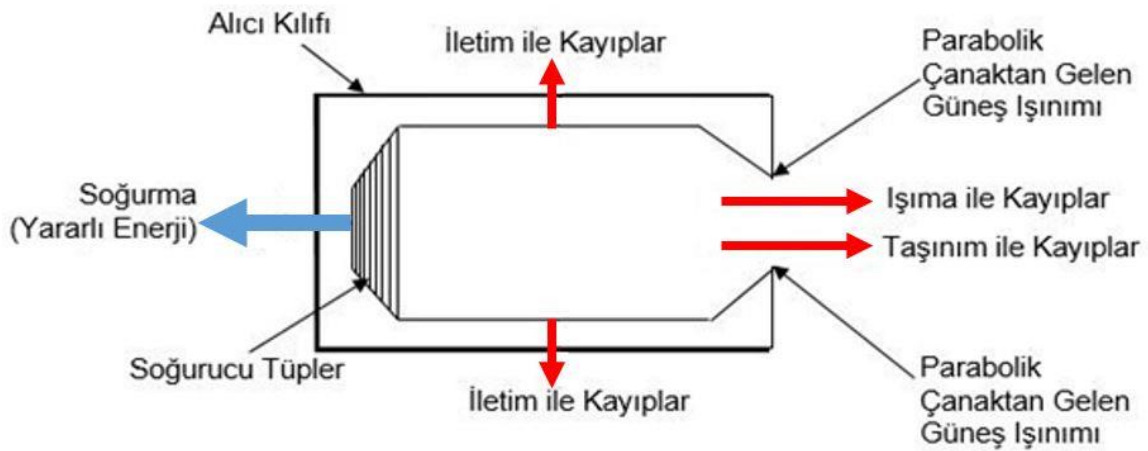
Hatalar arasında en sık rastlanılanı, yansıtıcı eğriliği, takip sistemi algıcı ve mekanizması, alıcı yerleşimi ve güneşin genişliği nedeni ile oluşan, yansıyan ışın demetindeki saçılma ve dağılmalardır. Bu nedenle, parabolik çanak sistemlerinde ışının çanak yüzeyinden yansdıktan sonra yayılma doğrultusuna dik doğrultuda saçıldığı uzaklığın ölçüsü olan **ışın demeti saçılması**ndan bahsedilir ve açisal genişlik cinsinden tanımlanır. Işın demeti saçılması sonucu, alıcının bulunduğu odak noktası dışına taşmalar, alıcıya girecek enerjiyi doğrudan etkileyeceğinden bir kayıp mekanizması olarak ortaya çıkacak ve tüm sistemi önemli derecede etkileyecektir. Işın demeti saçılmasının artması, sistem performansının azalmasına neden olacaktır [10-11, 21].

Parabolik çanak sistemlerindeki kayıpların bir diğer nedeni de, çanak üzerinde bulunan yansıtıcı malzemenin yansıtma oranındaki azalmadır. Yansıtma oranı düşük bir malzeme parabolik çanaktan alıcıya gidecek enerjiyi kısıtlayacak ve sonuç olarak sistem çıktısı etkilenecektir [8].

2.2.2. Alıcı Kayıpları

Parabolik çanakta alıcıya gelen ısı enerjisinde, sistemin bulunduğu yere ve günün saatlerine bağlı olarak, ışıma, iletim ve taşınım yolu ile kayıplar meydana gelir ve toplam sistem kayıplarının önemli bir bölümünü oluşturur. Uzun dönem enerji tahmini için de bu kayıpların doğru bir şekilde gösterilmesi ve hesaplanması önemlidir.

Alıcıda meydana gelen ısı kayıp mekanizmaları; alıcı kılıfından ısı iletimi, kovuktan ısı taşınımı ve alıcı açıklığından ışıma yolu ile kayıplar olarak sıralanabilir. Kayıplar ile birlikte alıcı enerji dengesi Şekil 2.10'da verilmiştir [13, 21, 24].



Şekil 2.10 Kovuklu alıcıda enerji dengesi

- Alıcı sıcaklığına, alıcı üzerinde bulunan yalıtım malzemesinin kalınlığına ve ısı iletkenlik katsayısına, çevre sıcaklığına bağlı olarak değişim gösteren, **iletim yolu ile meydana gelen kayıplar**, toplam kayıpların küçük bir kesrini oluşturur. Alıcı ve soğurucu yüzey sıcaklıkları yükseldikçe, alıcı kılıfından çevreye doğru gerçekleşecek ısı iletimi de hızla artar. Isı iletimi;

$$q_{iletim} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.40.)$$

eşitliği ile verilir [38]. k malzemenin ısı iletkenlik katsayısı, A ısı iletiminin gerçekleştiği kesit alan ve dT/dx ısı akış doğrultusuna paralel sıcaklık gradyentidir. Alıcı kılıfından dış ortama doğru gerçekleşen ısı iletimi, kılıfın dış kısmında meydana gelecek ısı taşınımına da bağlı olacağından, toplam iletim ile ısı kayıplarını

bulabilmek için seri direnç modeli kullanılır. Taşınım ile ısı aktarımı için, $q_{taşınım} = h A (T_{iç,yüzey} - T_{çevre})$ bağıntısı kullanıldığında, düzlemsel geometrilere iletim ve taşınım mekanizmaları için ısı dirençler,

$$R_{iletim} = \frac{L_{yalıtım}}{kA_{iletim}} \quad (2.41.)$$

$$R_{taşınım} = \frac{1}{hA_{taşınım}} \quad (2.42.)$$

eşitlikleri ile verilir [38]. Bu bağıntılarda,

$L_{yalıtım}$ alıcı yalıtım kalınlığı,

h taşınım yolu ile ısı transfer katsayısı,

$T_{iç,yüzey}$ ve $T_{çevre}$ alıcının iç yüzeyi ve ortam sıcaklığı

A_{iletim} ve $A_{taşınım}$ ısı iletimi ve taşınımı için kesit alanlardır.

İletimden kaynaklanan toplam ısı kayıpları ise,

$$q_{iletim} = \frac{T_{iç,yüzey} - T_{çevre}}{R_{iletim} + R_{taşınım}} \quad (2.43.)$$

eşitliği ile verilir [10, 38]. Alıcıya yalıtım malzemesi eklenerek, iletim yolu ile oluşan kayıplar kontrol edilebilir. Yalıtım kalınlığı arttıkça parabolik çanak merkezinde gölgelenme artacağı ve bu gölgeleme etkisi ile sistem kayıpları ve güç düşmeleri oluşacağından, yalıtım kalınlığı da belirli sınır değerler içinde olmalıdır. Alıcı, güç çevrim ünitesi ve bu mekanizmaları tutan aksamdan dolayı meydana gelen gölgelenme, çanak alanının verimli kullanılmasını engeller ve bu kısımlar Şekil 2.11'de gösterildiği gibi oluşacak kayıpların azaltılması amacıyla kesilerek çıkartılabilir. İletim yolu ile oluşan kayıpları en aza indirmek için alıcıya eklenecek olan en uygun yalıtım kalınlığı, alıcı kılıfındaki kayıpların ve çanak üzerinde meydana gelecek gölgelenmenin minimum seviyeye indirilmesi için, SES ve WGA sistemleri için 7,5 cm olarak önerilmiştir [21]. Literatürde, alıcılarda kullanılan ve yüksek sıcaklıklarda yapısı bozulmayan yalıtım malzemesi olarak, ısı iletkenlik katsayısı 0,061-0,094 W/mK aralığında olan seramik fiber malzemeler seçildiği belirtilmektedir [21].



Şekil 2.11. Gölgelenen kısımların çıkartılması

- Alıcıda **ışılma ile oluşan** iki farklı **kayıp** mekanizması vardır. Birincisi alıcı yüzeylerinin yüksek sıcaklığından kaynaklanan uzun dalgaboylu ışıma, ikincisi ise alıcı kovuğunun içi tam bir siyah cisim olmadığından, parabolik çanakta gelen ışınımın bir miktarının kovuk duvarları ve alıcı açıklığından yansmasıdır. Alıcı yüzeyine gelen ışınımın bir kısmı da yüzey tarafından yansıtılır [10, 13, 21]. Alıcı yüzeyinden yansıyan ışınım miktarı alıcı geometrisine bağlı olarak değişir. Kovuklu alıcılar için, alıcının herhangi bir yüzeyinden yayılan veya yansıtılan ışınım bir diğer yüzeyine çarpacağından, soğurulan net ışınımı hesaplayabilmek için anlık çözümler gereklidir. Alıcı gün içinde kararlı sıcaklığa ulaştığında, ışıma ile oluşan kayıplar fazla değişiklik göstermemektedir. Alıcı tarafından yapılan ışıma;

$$q_{ışıma,yayma} = \epsilon_{kovuk} \sigma A_{açıklık} (T_{kovuk}^4 - T_{çevre}^4) \quad (2.44.)$$

eşitliği ile verilir [10, 38]. Burada, ϵ_{kovuk} alıcı kovuğunun etkin yayıcılığı, σ Stefan Boltzmann sabiti ve $A_{açıklık}$ alıcı açıklık alanı, T_{kovuk} kovuğun ortalama iç sıcaklığıdır. Isıl enerji, kovuk yüzeylerinden soğurucudaki kadar aktif olarak soğurulmadığı için, kovuk yüzeyleri daha yüksek sıcaklıkta olacağından, T_{kovuk} kovuğun yüzey sıcaklığı değil, ortalama iç sıcaklığı olarak tanımlanır.

Kovuk duvarlarından ışınım yansımaya bağlı kayıpları belirleyebilmek için, kovuklu alıcının etkin soğurma oranı bilinmelidir. Alıcı açıklığı koruması (aperture cover) olmayan kovuklu alıcı için etkin soğurma oranı,

$$\alpha_{etkin} = \frac{\alpha_{kovuk}}{\alpha_{kovuk} + (1 - \alpha_{kovuk}) \left(\frac{A_{açıklık}}{A_{kovuk,toplam}} \right)} \quad (2.45.)$$

eşitliği ile verilir [10]. Bu eşitlikte α_{kovuk} kovuk yüzeyi soğurma oranı ve $A_{kovuk,toplam}$ kovuğun toplam iç yüzey alanı olarak tanımlanmıştır. Eşitlikten de görüldüğü gibi alıcı açıklık alanının kovuğun toplam alanına oranı küçüldükçe, kovuklu alıcının etkin soğurma oranı artar.

$q_{alıcı,giriş}$ alıcıya giren toplam enerji olmak üzere alıcı kovuğundan yansıyan ışınım,

$$q_{ışınma,yansım} = (1 - \alpha_{etkin})q_{alıcı,giriş} \quad (2.46.)$$

olarak yazılabilir [10]. Alıcı açıklık koruması olduğu durumda ek olarak koruma malzemesinin geçirgenliği hesaba katılmalıdır. Bu durumda τ_k koruma malzemesinin geçirgenliği ve τ_y kovuğun iç duvarlarından yansıyan ışınım için koruma malzemesinin geçirgenliği olmak üzere etkin soğurma oranı ve alıcı kovuğundan yansıyan ışınım,

$$\tau_k \alpha_{etkin} = \tau_k \left[\frac{\alpha_{kovuk}}{\alpha_{kovuk} + (1 - \alpha_{kovuk}) \tau_y \left(\frac{A_{açıklık}}{A_{kovuk,toplam}} \right)} \right] \quad (2.47.)$$

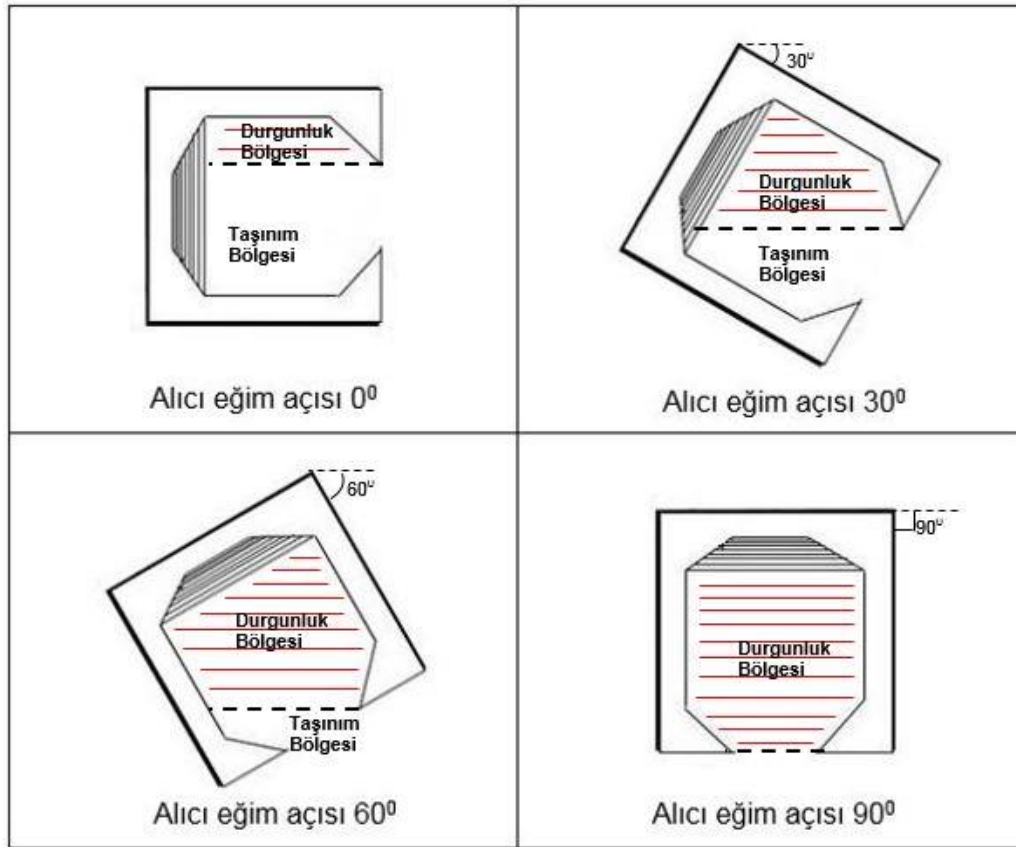
$$q_{ışınma,yansım} = (1 - \tau_k \alpha_{etkin})q_{alıcı,giriş} \quad (2.48.)$$

eşitlikleri ile verilir [10, 21].

- **Taşınım ile oluşan kayıplar**, alıcının sıcak yüzeyleri üzerindeki havanın hareketi sonucunda oluşur ve alıcı kayıplarının büyük bir kesrini oluşturur. Bu kayıplar; çevre sıcaklığına, rüzgar hızına, alıcı kovuk sıcaklığına ve geometrisine, alıcı açıklığının yönelimine ve çapına bağlıdır. Taşınım kayıpları, doğal ve zorlanmış taşınım kayıplarının toplamı olarak düşünülür. Doğal taşınım, alıcı açıklık yönelimi ve kovuk geometrisine bağlı iken, zorlanmış taşınım alıcıya gelecek rüzgarın yönüne ve hızına bağlıdır.

Doğal taşınım ile oluşan kayıplar sabah, akşam saatlerinde ve kış aylarında yani güneşin yükseklik açısının küçük olduğu zamanlarda daha fazla, öğle saatlerinde

ve yaz aylarında ise az olmasının sebebi alıcı açıklığının yöneliminin değişmesidir. Şekil 2.12'de literatürde kabul edilen açıklık yönelimine göre alıcı eğim açıları verilmiştir [24]. Şekilden görüldüğü gibi alıcı eğim açısı arttıkça hava akışının olmadığı durgunluk bölgesi (**stagnation zone**) büyümekte ve alıcı eğim açısı 90° olduğunda, yani alıcı açıklığı tamamen yere doğru baktığında durgunluk bölgesi tüm kovuk içini doldurarak ve içeride bulunan sıcak havanın dışarıya çıkması engellemektedir. Bu durum yukarıda bahsedilen yaz ayları ve öğle saatlerindeki duruma karşılık gelmektedir [24].



Şekil 2.12. Alıcı açıklığının yönelimine göre alıcı eğim açıları

Kovuk geometrisinin de doğal taşınım ile kayıplarda etkisi vardır. Kovuk geometrisini tanımlayan en önemli üç özellik, alıcı açıklık çapı, kovuk iç çapı ve kovuk yüzey alanıdır. Alıcı açıklık çapı baz alınarak kovuk çapının artırılması taşınım kayıplarını azaltıcı bir etki yapar. Çünkü açıklık çapının küçük olması kovuk içerisindeki sıcak havanın dışarıya çıkmasını engeller [21, 24].

Alıcı kovuğu için doğal taşınım katsayısı ($h_{\text{doğal}}$), Stine ve McDonald'ın deneysel verilere dayanarak yaptıkları Nusselt sayısı korelasyonu ile bulunabilir [24].

Gr Grashof sayısı, θ alıcı eğim açısı, $d_{açıklık}$ alıcı açıklığı çapı, d_{kovuk} kovuk çapı ve $S = 1,12 - 0,982 (d_{açıklık}/d_{kovuk})$ olmak üzere $Nu_{doğal,taşınım}$ doğal taşınım Nusselt sayısı,

$$Nu_{doğal,taşınım} = 0,088Gr^{1/3}(T_{kovuk} - T_{çevre})^{0,18}(\cos \theta)^{2,47}(d_{açıklık}/d_{kovuk})^S \quad (2.49.)$$

eşitliği ile verilir [24].

Alıcı kovuğu için doğal taşınım katsayısı ise k_{hava} havanın ısı iletkenlik katsayısı olmak üzere,

$$h_{doğal} = Nu_{doğal,taşınım} k_{hava}/d_{kovuk} \quad (2.50.)$$

eşitliği ile verilir [24].

Doğal taşınım katsayısı bulunduktan sonra doğal taşınım ile kaybedilecek ısı enerjisi,

$$q_{taşınım,doğal} = h_{doğal} A_{kovuk,toplam} (T_{kovuk} - T_{çevre}) \quad (2.51.)$$

eşitliği ile verilir [24].

Zorlanmış taşınım ile oluşacak kayıplar rüzgar hızına ve yönüne bağlıdır. Rüzgarın alıcıya geliş şekline göre kayıplar değişebilir. Rüzgarın direkt olarak alıcı açıklığına geldiği durumda gelmediği duruma göre taşınım ile kayıplar önemli derecede artış gösterir [24]. Rüzgarın alıcı açıklığına direkt olarak geldiği durumda zorlanmış taşınım kayıpları doğal kayıplara göre önem kazanır.

Rüzgarın alıcı açıklığına paralel olarak gelmesi durumunda Ma tarafından yapılan deneylerin sonucu olarak zorlanmış taşınım ile ısı transferi katsayısı $h_{zorlanmış,paralel}$; v rüzgar hızı olmak üzere

$$h_{taşınım,zorlanmış,paralel} = 0,1967 v^{1,849} \quad (2.52.)$$

eşitliği ile verilmiştir [24].

Rüzgarın alıcı açıklığına dik olacak şekilde geldiği durum için de Ma tarafından deneyler yapılmış ve bu durum için de zorlanmış taşınım ile ısı transferi katsayısı,

$f(\theta) = 0,1634 + 0,7498 \sin(\theta) - 0,5026 \sin(2\theta) + 0,3278 \sin(3\theta)$ ve θ alıcı eğim açısı olmak üzere,

$$h_{\text{taşınım,zorlanmış,dik}} = f(\theta) v^{1,401} \quad (2.53.)$$

eşitliği ile verilmiştir [24].

Rüzgarın alıcı açıklığına paralel geldiği durumda açıklık yönelimi önemli değilken, dik geldiği durumda Eş. 2.53'ten de görülebileceği gibi yönelim önem kazanır.

Toplam taşınım yolu ile kayıplara bakıldığında toplam taşınım ile ısı transferi katsayısı $h_{\text{taşınım,toplam}}$,

$$h_{\text{taşınım,toplam}} = h_{\text{taşınım,doğal}} + h_{\text{taşınım,zorlanmış}} \quad (2.54.)$$

eşitliği ile verilir.

Taşınım ile toplamı ısı kaybı ise,

$$q_{\text{taşınım,toplam}} = h_{\text{taşınım,toplam}} A_{\text{kovuk,toplam}} (T_{\text{kovuk}} - T_{\text{çevre}}) \quad (2.55.)$$

eşitliği ile verilir.

Alıcıda meydana gelen toplam ısı kayıp ise,

$$q_{\text{kayıp,alıcı}} = q_{\text{iletim}} + q_{\text{taşınım,toplam}} + q_{\text{ışınma,yayma}} \quad (2.56.)$$

eşitliği ile verilir [21, 24].

Dolayısı ile alıcıdan Stirling motoruna girecek enerji miktarı $P_{\text{stirling,giriş}}$, $P_{\text{alıcı,giriş}}$ parabolik çanaktan gelen ve alıcı tarafından yakalanan alıcı giriş enerjisi olmak üzere,

$$P_{\text{stirling,giriş}} = P_{\text{alıcı,giriş}} - q_{\text{ışınma,yansıma}} - (q_{\text{kayıp,alıcı}}) \quad (2.57.)$$

ile verilir [21].

2.2.3. Stirling Motoru Kayıpları

Stirling motoru kayıpları ısı kayıplar ve mekanik kayıplar olarak iki bölümde incelenebilir.

Isıl kayıplar, İletim kayıpları, boşluk kayıpları “appendix gap losses”, verimsiz rejenerasyondan kaynaklanan kayıplar olarak sıralanabilir [36-37].

İletim kayıpları, Stirling motorunda bulunan sıcak (ısıtıcı ve genişleme bölgesi) ve soğuk (soğutucu ve sıkıştırma bölgesi) bölgeler arasında doğrudan oluşabilecek ısı iletimlerinden kaynaklanır. Doğrudan ısı iletimi sonucunda soğutucu ve ısıtıcı üzerinde ısı yükü birikir ve bunun sonucu olarak motor verimi düşer. Rejeneratör malzemesinin gözenekli metal malzemedan yapılmış olması bu kayıpları azaltıcı etki yapsa da, motor üzerinde/içinde sıcak ve soğuk bölgeler arasında doğrudan bir yol var ise iletim kayıpları kaçınılmaz olur [36-37].

Genellikle contaları çalışma akışkanının sıcaklığından korumak için yer değiştirme pistonunun uzun olması tercih edilir. Dolayısı ile sıcak kısımdan contaya kadar bir boşluk olacaktır. Bu boşluk nedeni ile boşluk kayıpları adı verilen kayıplar meydana gelir. Yer değiştirme pistonu silindirin içinde çıkabileceği en üst noktaya (üst ölü nokta) geldiğinde piston duvar sıcaklığı, silindirin duvar sıcaklığından daha düşük olacağı için silindir duvarından pistonu ısı aktarımı olur. Piston silindir içinde inebileceği en alt noktaya (alt ölü nokta) indiğinde ise sıcaklıklar tam ters olacağından bu kez de pistondan silindir duvarına ısı aktarımı olur. Silindirden alınan ısı farklı yerlerde tekrar silindire aktarılacağı için piston hareketi ısıyı sıcak bölgeden soğuk bölgeye taşımış olacaktır. (**shuttle heat transfer**) Bunun sonucunda da kayıplar meydana gelmektedir. [36-37].

Bir diğer boşluk kaybı, akışkanın entalpi transferidir. Boşluk içinde bulunan çalışma akışkanının hareketi, basıncı ve sıcaklığı nedeni ile boşluğun alt kısmına doğru entalpi transferi olur. Bu kayıp pompalama kaybı olarak da bilinir. (**gas enthalpy transfer**) [36].

Rejeneratör Stirling motoru için önemli bir bileşendir. Bir rejeneratörün verimliliği gözenekli metal malzemenin ve içinden geçen akışkanın ısı kapasitelerinin oranına bağlıdır. Basınç artışı ile çalışma akışkanının yoğunluğu arttığında veya artan motor hızı ile akışkan akışının ters yöne dönme frekansı arttığında akışkanın ısı kapasitesi

artacaktır. Bu da Rejeneratör verimliliğini düşürecektir. Rejeneratör verimliliğinin düşmesi de verimsiz rejenerasyondan kaynaklanan kayıplara neden olacaktır [36-37]. Sürtünme kayıpları mekanik kayıplar sınıfına girer. Motorun mekanizmaları arasındaki sürtünmeler sonucu kayıplar meydana gelecektir. Motor hızı artığında, basınç yükselecek buna bağlı olarak sürtünmeler artacaktır. Sonuç olarak motor çıkış gücü ve verimi düşecektir [36-37].

Stirling motorunda bulunan contaların sızdırma problemi açısından iyi seçilmesi ve kontrol edilmesi gerekir. Sızıntılar da önemli kayıplara sebep olabilir [36-37].

2.3. Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırılmalı Güneş Güç Sistemlerinin Tasarımında Kullanılan Yazılımlar

Çanak güç sistemlerini analiz etmek /modellemek için kullanılan yazılımlar/kodlar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Parabolik çanaklı yoğunlaştırılmalı güç sistemlerinde genellikle yapılan analizlerde, alıcıdaki enerji akısını artırmak amaçlı çanağın optik analizleri üzerine ve güç çevrimlerinin modellenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada çizelgedeki yazılımlardan, NREL (National Renewable Energy Laboratories) tarafından kullanıma açılan ve yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemlerinin sistem bazında performans modellemesini yapan SAM yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 2.1.Yoğunlaştırılmalı sistemlerin modellenebileceği yazılımlar

Yazılım	Uygulama
<u>AEETES</u>	Paraboloit yoğunlaştırıcı kovuklu alıcılarında enerji transferini modeller.
<u>ASAP</u>	Paraboloit yoğunlaştırıcıların, heliostatların parabolik oluklu yoğunlaştırıcıların ve lineer fresnel yansıtıcıların optik modellemesi için kullanılabilen genel bir koddur.
<u>CIRCE</u>	Paraboloit ve parabolik oluklu yoğunlaştırıcıların optik modellemesi için kullanılabilen bir koddur.
<u>DISH-FIELD SYSTEMS MODEL</u>	Paraboloit yoğunlaştırıcı güneş güç sistemlerinin enerji çıktısını verebilen ve sistemlerin dizilişini optimize edebilen bir modeldir.
<u>FEA (COSMOSWORKS, ANSYS)</u>	Sonlu element ısı stress analizi yapar.
<u>GATECYCLE</u>	Gaz türbini ve buharlı güç çevrimlerini modeller.
<u>IPSEPRO</u>	Güç çevrimlerini modeller.
<u>SAM</u>	Tüm yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemlerinin sistem bazında performans modellemesini yapan bir yazılımdır.
<u>SOLERGY</u>	Güneş-ısı santrallerinin sistem bazında modellemesini yapar.
<u>STEAMPRO</u>	Buharlı güç çevrimlerini modelleyen bir yazılımdır.
<u>TBRD</u>	Borulu alıcıların dinamik simülasyonunun yapılabildiği bir yazılımdır.
<u>TRNSYS</u>	Sistem bileşenlerini modeller.

3. SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL) PROGRAMI

SAM (The System Advisor Model) yenilenebilir enerji sistemleri için performans modellemesi ve finansal analiz yapan, yenilenebilir enerji endüstrisinin içinde bulunan proje yöneticileri ve mühendisler, enerji politikası analistleri, teknoloji geliştiriciler, araştırmacılar tarafından kullanılacak ücretsiz bir yazılımdır [39]. SAM programı kullanılarak, fotovoltaik sistemler, yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemleri, güneş ile su ısıtma sistemleri, rüzgar enerji/güç sistemleri, jeotermal sistemler ve biyokütle güç sistemleri için performans tahmini ve ekonomik tahmin yapılabilmektedir.

SAM, başlangıçta "Solar Advisor Model" olarak adlandırılmış, Sandia National Laboratories ile işbirliği içinde NREL tarafından 2005'te geliştirilmiştir. Başlangıçta U.S. Department of Energy'nin Solar Energy Technologies Programı kapsamında sistem bazında analizler için kullanılmıştır. İlk halka açık versiyon Ağustos 2007'de Versiyon 1 olarak yayınlanmıştır. İlk versiyonda fotovoltaik sistemleri ve parabolik oluklu yoğunlaştırıcı güç sistemlerini teknolojik ve ekonomik olarak modellemeye olanak sağlamıştır. 2010 yılında ismi güneş enerji teknolojileri dışında da yenilenebilir enerji sistemlerinin de tasarlanabileceğini yansıtmak adına "System Advisor Model" olarak değiştirilmiştir.

SAM yazılımı içinde, **Performans modeli**, saatlik bazda sistemin enerji çıktısını hesaplar, **Finansal model**, sistemin kurulduğu yer ve sistemin kurulum ve çalışması ile ilgili maliyet bilgilerini kullanarak elektrik üretme maliyetini hesaplamaktadır. Oluşturulacak modeller, sistemin fiziksel ekipmanlarının performans karakteristiklerini ve proje maliyetlerini belirleyebilmek için giriş verilerine gereksinim duyar.

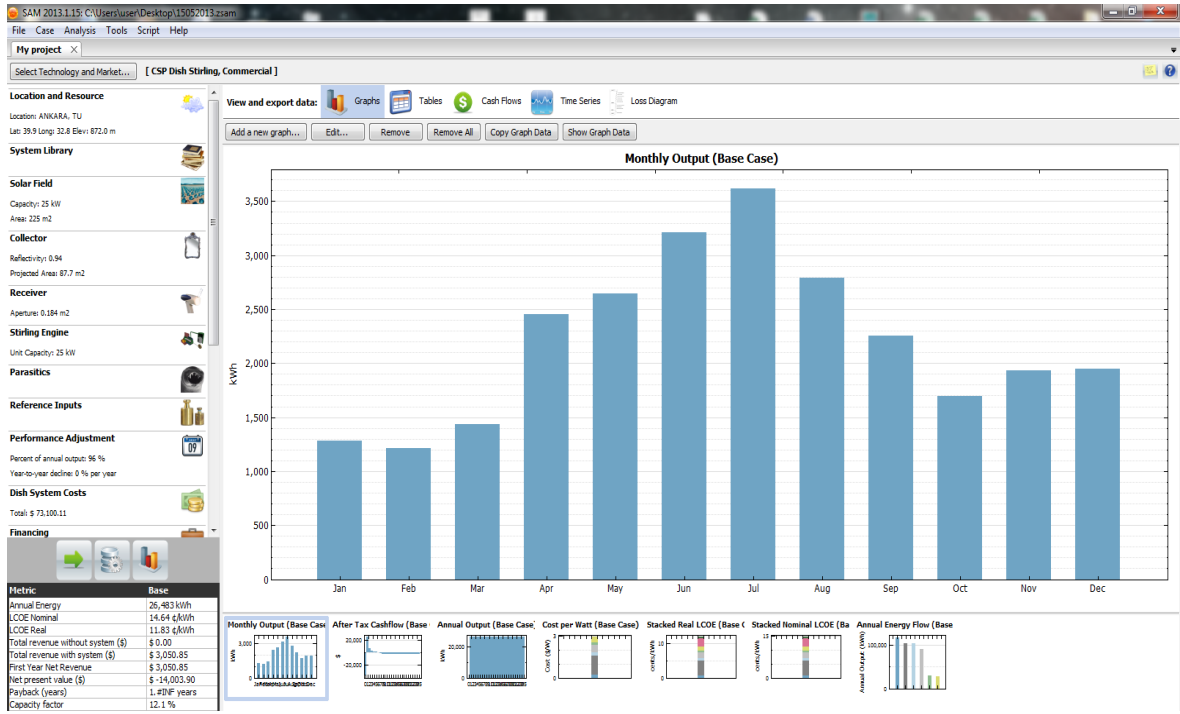
Kullanıcı arayüzü, girilen verilere ulaşılmasına, sonuçların çizelgeler ve grafikler ile detaylı bir biçimde gösterilmesine olanak sağlar. SAM'deki tüm grafik ve çizelgeler, kullanılmak istenen dokümana kolaylıkla taşınarak eklenebilir. Hesaplanan ve girişi yapılan verilerin, kolayca Excel programına aktarılabilmesini ve verilerin Excel programı aracılığı ile kullanılabilmesini sağlar. Performans parametreleri ve finansal parametreler için parametrik simülasyon, duyarlılık analizi ve diğer istatistiksel analizler gibi ileri modelleme seçenekleri de mevcuttur. SAM sistem performansını modellemede, Wisconsin Üniversitesinde geliştirilen TRNSYS yazılımını kullanır.

TRNSYS, geçerliliği onaylanmış, fotovoltaik sistemlerin, yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemlerinin, güneş ile su ısıtma sistemlerinin, saatlik meteorolojik veri kullanılarak zaman-serisi “*time-series*” simülasyonunu yapan bir programdır.

SAM programı içinde, bir SAM belgesi oluşturulmasındaki ilk adım, proje için bir teknoloji ve finansman türü seçilmesidir. SAM programı, proje türüne göre, giriş verilerini varsayılan parametreler ile otomatik olarak doldurur. Yapılacak modelleme için, giriş verileri kullanıcı tarafından uygun veriler ile de değiştirilebilir. Daha sonra, projenin gerçekleştirileceği yer, sistemde kullanılacak donanım, sistemin ilk kurulum ve çalışma maliyeti ve teşviklere karar verilir.

SAM, projenin gerçekleştirileceği yerde, yenilenebilir enerji kaynağını, iklim verilerini ve hava durumunu tanımlamak için, kaynak meteorolojik veri dosyası kullanır. Modellenen sistemin çeşidine göre, veri dosyası listeden seçilebilir, internetten indirilebilir ya da modelleyen kişi tarafından kendi verileri ile oluşturulabilir. SAM, fotovoltaik modüller ve eviriciler, parabolik çanaklı yoğunlaştırıcılar ve alıcıları, rüzgar türbinleri gibi sistem bileşenlerinin karakteristiklerini tanımlayabilmek için, performans verileri ve katsayılarını içeren geniş kütüphaneye sahiptir. Bu gibi bileşenler için, listeden kolayca bir seçenek seçilir ve SAM bu kütüphanedeki verileri giriş değişkenleri olarak belirler. Kalan diğer değişkenler için, varsayılan (default) değerler kullanılabilir veya kullanıcı tarafından yeni değerler tanımlanabilir. Girilen değerlerin doğru olduğuna karar verildikten sonra, simülasyon yapılır ve sonuçlar gözden geçirilir. Tipik bir analiz, simülasyonların yapılması, sonuçların değerlendirilmesi, giriş verilerinin tekrar gözden geçirilmesi ve sonuçların doğru olduğundan emin olunana dek bu işlemlerin tekrarlanmasını içerir.

SAM programında modelleme sonuçları, saatlik, aylık, yıllık bazda, çizelgeler ve grafikler halinde detaylı olarak verilmektedir. Şekil 3.1’de SAM kullanılarak modellenen parabolik çanaklı yoğunlaştırılmalı güç sistemi için sonuçlar kısmındaki grafikler bölümünün ekran çıktısı verilmiştir. İstenilen değişkenler seçilerek grafikler çizdirilebilir ve çizelgeler oluşturulup, Excel veya başka bir doküman içine kopyalanarak aktarılabilir.



Şekil 3.1. Modellenen parabolik çanaklı yoğunlaştırılmalı güç sistemi için sonuçlar kısmındaki grafikler kesimi

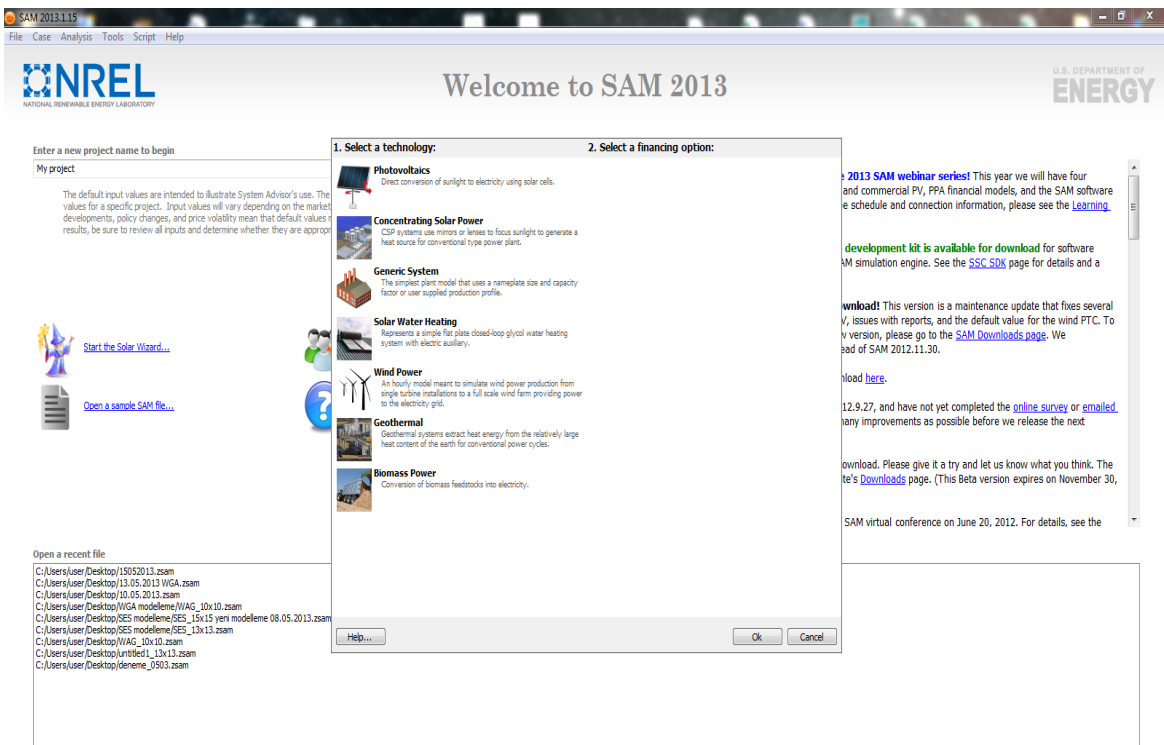
SAM'in performans modelleri ile bir güç sisteminin elektrik çıktısı oluşturulurken, bir yıl üzerinden 8760 saatlik değerler kullanılmaktadır. Sistem performansı karakteristikleri, ayrıntılı saatlik ve aylık performans verileri, grafik ve çizelgeler halinde incelenebildiği gibi sistemin toplam yıllık çıktısı ve kapasite faktörü gibi performans metrik değerleri kullanılarak daha genel performans değerlendirmeleri de yapılabilmektedir.

SAM'in 15.01.2013 tarihli güncel versiyonu ile tasarlanabilecek sistemler;

- Fotovoltaik Sistemler (düzlem ve yoğunlaştırılmalı)
- Yoğunlaştırılmalı Parabolik Oluklu Güç Sistemi
- Güneş Güç Kulesi (eriyik tuzlu ve doğrudan buharlı)
- Yoğunlaştırılmalı Fresnel Güç Sistemi
- Çanak Stirling Güç Sistemi
- Evsel veya Büyük Çaplı Binalar için Güneş ile Su Isıtma Sistemleri
- Büyük ve Küçük Çaplı Rüzgar Güç Sistemleri
- Jeotermal Güç Sistemleri

- Biyokütle Güç Sistemleri

olarak verilmiştir (Şekil 3.2). Bir belge içinde birden fazla sistem oluşturularak farklı tipteki projeler karşılaştırılabilir. Örneğin, rüzgar, fotovoltaik ve yoğunlaştırılmalı güneş güç sistemi projeleri yaratılarak belirlenen bir yer için fiyat veya teknoloji karşılaştırması yapılabilir, o yerleşim bölgesi için hangisinin daha yapılabilir olduğuna karar verilebilir. SAM programı ile hibrit güç sistemleri modellenemediğinden, aynı modelleme içinde iki farklı sistem yerleştirilememektedir.



Şekil 3.2. SAM programı ile tasarlanabilecek sistemler

Sistem performansının bir yıl üzerinden modellenmesine ve proje nakit akışının birkaç yıllık periyot üzerinden hesaplanmasına ek olarak, SAM'in analiz seçenekleri çoklu simülasyona, giriş değişkenlerinin Excel programı çalışma alanı ile bağlanmasına ve özel simülasyon modülleri ile çalışılmasına olanak sağlar. İklim bilgileri, performans, maliyet ve finansal parametreler ile değişimlerin ve belirsizliklerin etkilerinin model sonuçlarına yansımaları incelemek için kullanılabilen analiz seçenekleri aşağıda kısaca açıklanmıştır:

- **Parametrik Analiz:** Giriş verilerine birçok değer atayarak, farklı giriş verileri için çıkış değerleri hesaplanmasını, grafik ve çizelgelerin oluşturulmasını sağlar. Optimizasyon ve giriş değişkenleri ile sonuçların arasındaki ilişkiyi anlamak açısından faydalıdır/önemlidir.
- **Duyarlık Analizi:** Giriş değişkenleri için kullanıcı tarafından belirlenen yüzde değişimlerin, çıkış verilerini nasıl etkileyeceğini gösteren bir analiz biçimidir.
- **İstatistiksel Analiz:** Giriş değişkenlerindeki belirsizliklerin çıkış değerlerine olan etkilerini görmek için kullanılır.
- **P50/P90:** Uzun yıllara ait meteorolojik verisi olan yerler için, sistemin toplam yıllık çıktısının belirli bir değere ulaşp ulaşamayacağı olasılığının hesaplanmasını sağlar.

SAM aynı zamanda, *Excel Değişimi/Aktarımı*, *Değişkenlerin aktarımı*, *Simülatör Seçenekleri* ile Excel veya TRNSYS ortamında hazırlanmış modeller ile çalışılabilme olanağı vermektedir:

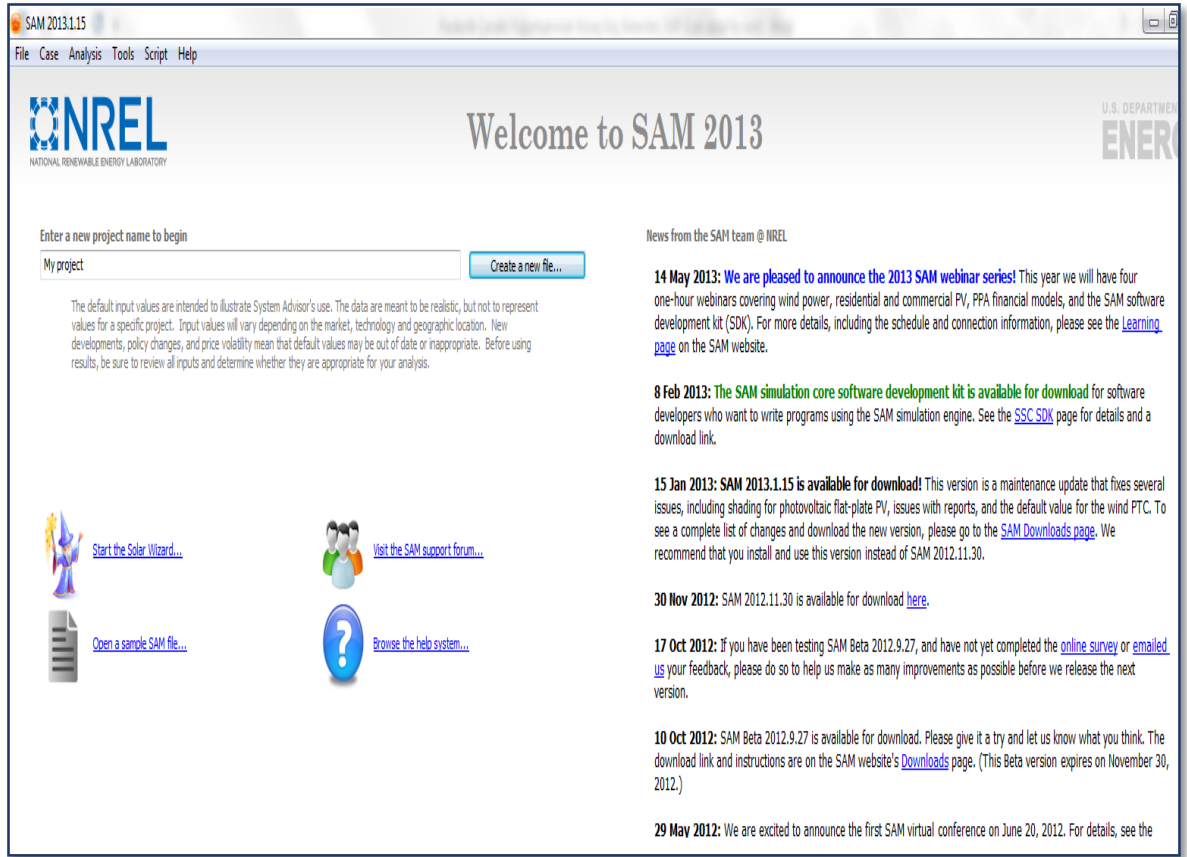
- **Excel Değişimi/Aktarımı:** Giriş verilerinin değerlerinin hesaplanmasında Excel programı kullanılabilir ve otomatik olarak SAM ve Excel programı arasında veri transferi yapılabilir.
- **Değişkenlerin Aktarımı:** Excel veya TRNSYS belgelerinde oluşturulmuş giriş verileri aktarılabilir.
- **Simülatör Seçenekleri:** Simülasyon zaman aralıkları değiştirilebilir veya TRNSYS modelleme ortamında oluşturulan simülasyon modülleri SAM 'de çalıştırılabilir.

SAM'in yazılım dili SamUL, SAM kullanıcı arayüzü içerisinde kullanıcının kendi programını yazmasına da olanak sağlamaktadır.

SAM programında, kullanıcı arayüzü, **hesaplama aracı** ve **programlama arayüzü**nden oluşur ve giriş değişkenlerine ulaşılmasını, simülasyonların nasıl yapacağını kontrol edilmesini, sonuç grafiklerinin ve çizelgelerinin görülmesini sağlar. SAM'in hesaplama aracı, belirli zaman adımlarında güç sisteminin performansının ve yıllık mali hesapların yapılmasına ve programlama arayüzü ise diğer yazılımların da SAM ile etkileşimine olanak verir.

3.1. SAM Programı ile Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırımlı Güç Sistemi Tasarımı ve Tasarım Aşamaları

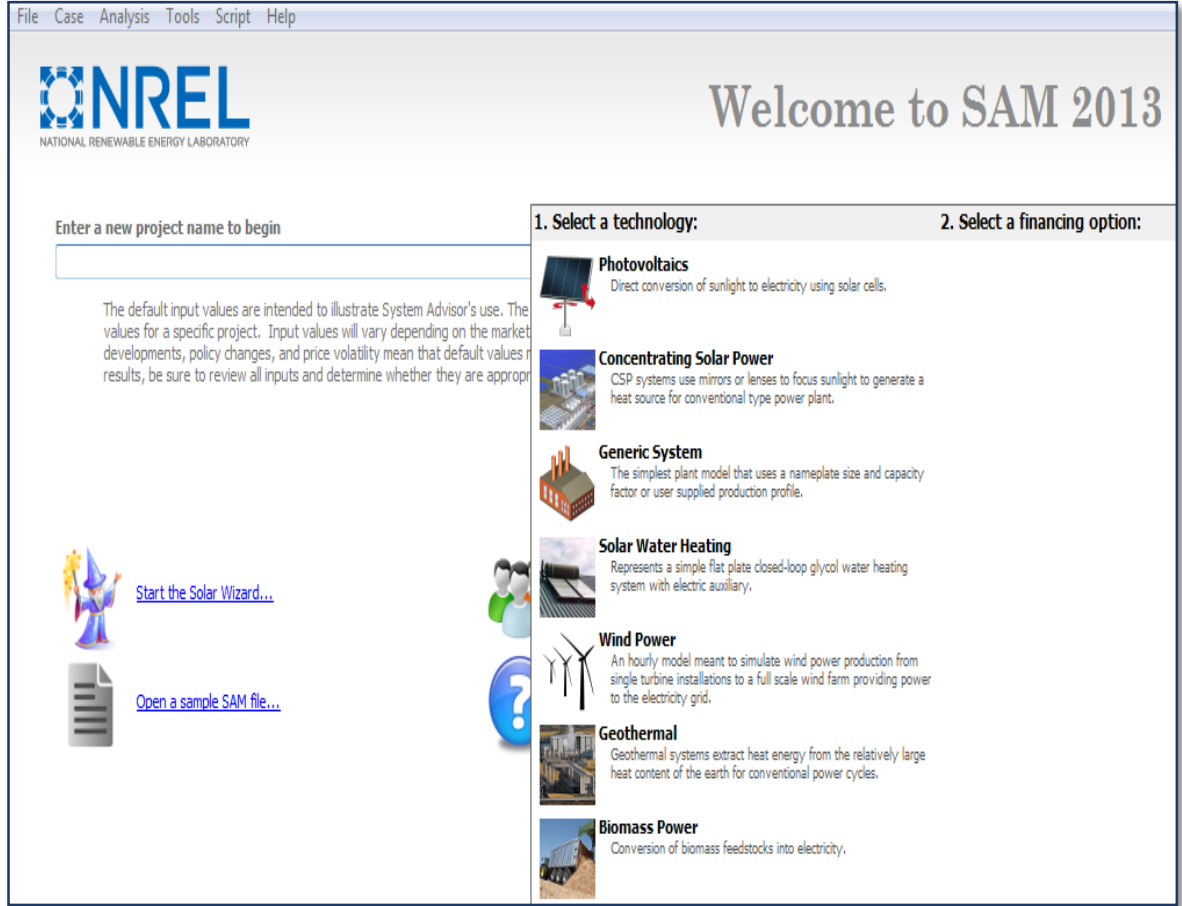
Parabolik Çanaklı Yoğunlaştırımlı Güç Sistemi tasarım adımları SAM programının 15.01.2013 tarihli versiyonu ile oluşturulmuştur. SAM programı açıldığında karşılaşılan arayüz, Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu arayüzde, “**Start solar wizard...**” seçeneği ile çok basit şekilde istenen bir sistem için enerji ve maliyet bilgilerine, “**Open a sample SAM file...**” seçeneği ile örnek tasarımlara ulaşılabilir.



Şekil 3.3. SAM programı başlatıldığında karşılaşılan ara yüz

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, yapılacak projenin ismi yazılarak ve “**Create a new file...**” butonu kullanılarak yeni bir proje yaratılabilir. “**Create a new file...**” butonuna basıldığında program ile tasarımı yapılabilecek sistemlerin listesi görülür, Şekil 3.4. Bu çalışmada, parabolik çanaklı yoğunlaştırımlı güneş güç sistemi tasarımı yapılacağından, Şekil 3.4'teki teknoloji seçeneklerinden yoğunlaştırımlı güneş güç sistemleri “**concentrating solar power**” seçeneği seçilmiştir. Bu seçeneğin altında Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi tüm yoğunlaştırımlı sistem seçenekleri bulunmaktadır. Bu tez çalışması için, seçenekler arasından parabolik çanaklı sistem

seçilmiştir. Bu tez kapsamında ayrıntılı finansal analiz yapılmayacağı için, Şekil 3.5'in sağ kısımda bulunan finansal analiz seçeneklerinden ticari seçeneği seçilmiştir.



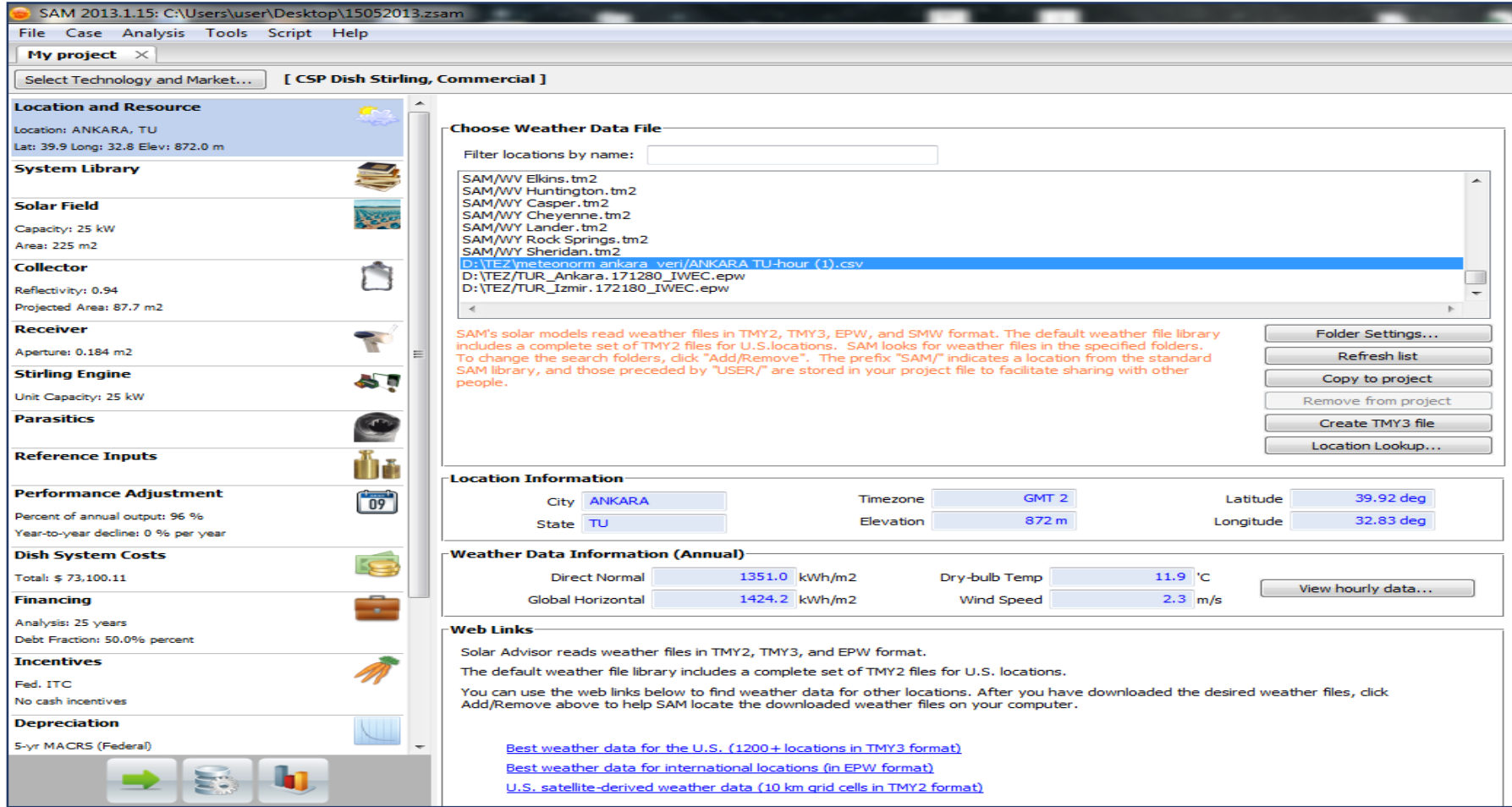
Şekil 3.4. Tasarımı yapılabilecek sistem/teknoloji seçenekleri



Şekil 3.5. Parabolik çanaklı sistem ve finansal model seçimi

Sistem teknolojisinin seçiminden sonra, tasarımı yapılacak sistemin kurulacağı yerin ve o yere ait meteorolojik verilerin seçilmesi gerekir. SAM programı TMY2, TMY3 ve EPW formatındaki meteorolojik verileri kullanır. Program içindeki veri tabanında Amerika eyaletleri için meteorolojik veriler TMY2 formatında bulunmaktadır. Şekil 3.6'da meteorolojik verilerin girişinin yapıldığı ve gözlenebildiği ekran görüntüsü verilmiştir. Şekildeki ekran görüntüsünün en alt kısmında da ücretsiz olarak meteorolojik veri indirilebilen bazı internet sitesi adresleri verilmiştir. Belirtilen formatlarda hazır olarak veri bulunamazsa kullanıcı "**Create TMY3 file...**" seçeneğini kullanarak kendi TMY3 veri setini de oluşturabilmektedir. Bu tez çalışmasında **METEONORM** yazılımından Ankara ve Van için TMY3 veri seti sağlanmış ve parabolik çanaklı güneş güç sistemi tasarımında kullanılmıştır. Parabolik çanaklı güneş güç sistemi tasarımında Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, sistem kütüphanesinde fiziksel olarak kurulmuş iki sistemin verisi bulunmaktadır: **SES**, **WGA**.

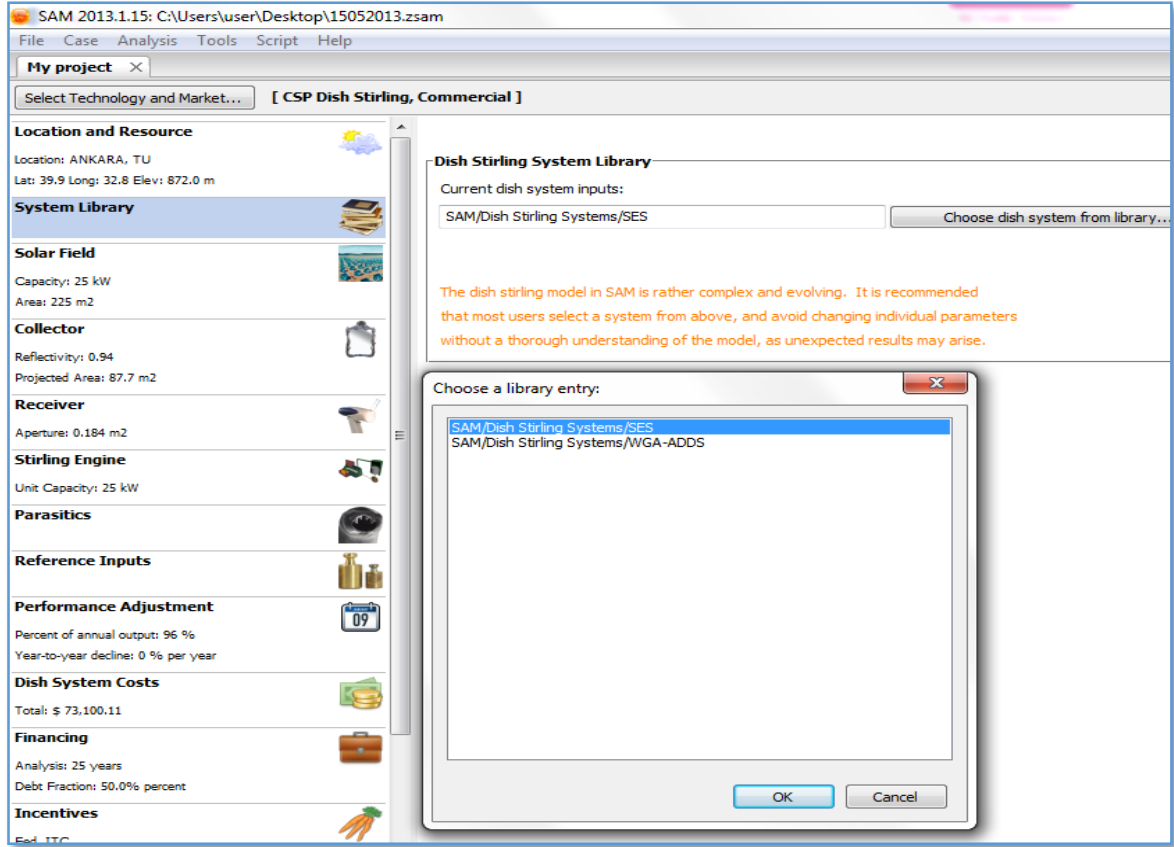
Şekil 3.6. Meteorolojik verilerin girişinin yapıldığı ve gözlenebildiği ekran görüntüsü



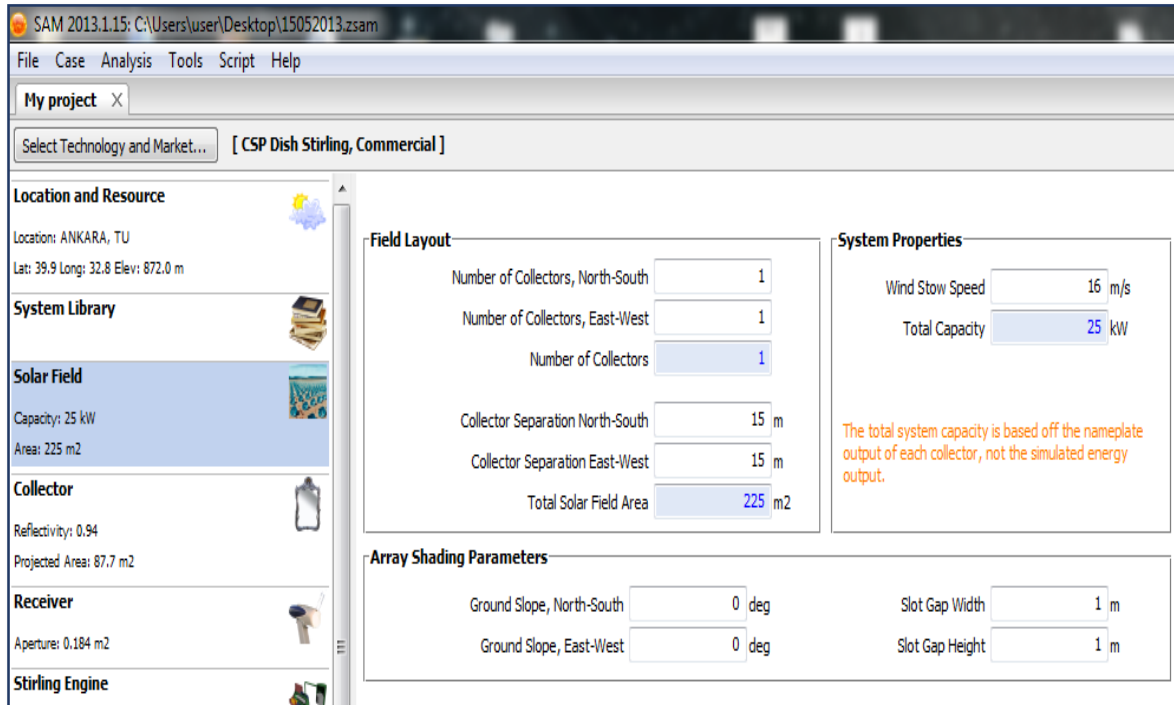
Bu sistemlerin özellikleri dördüncü bölümde detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Tasarıma devam edebilmek için bu iki sistemden biri seçilmelidir. Kullanılmak istenen sistem seçildikten sonra yazılım, sistem verilerinin girişinin yapıldığı alanlara verileri otomatik olarak yerleştirir. Sistemler ile ilgili tüm parametreler, açıklamaları ve varsayılan değerleri EK-1'de bulunan çizelgede görülebilir.

Sistem seçildikten sonra, Şekil 3.6'nın sol tarafındaki üçüncü seçenek olan ve sistemin üzerine kurulacağı alan ile ilgili özelliklerin bulunduğu kesime geçilir. Ekran görüntüsü Şekil 3.8'de verilen bu kesimde kuzey-güney hattındaki çanak sayısı ve çanaklar arası uzaklık, doğu-batı hattındaki çanak sayısı ve çanaklar arası uzaklık, sistemin zarar görmemesi için kapanma konumuna geçeceği maksimum rüzgar hızı ve gölgelenme ile ilgili parametreler bulunmaktadır. Birden fazla yoğunlaştırıcı çanak bulunan büyük sistemlerde, yoğunlaştırıcıların birbirlerini gölgeleme faktörleri de bu kesimde hesaplanmaktadır. Kullanıcı tarafından girilen parabolik çanak sayısına göre toplam alan ve toplam nominal güç hesaplanır. Aynı zamanda güneşten parabolik çanıklara gelen toplam güç de bu kesimde hesaplanır ve bir sonraki kesimde girdi olarak kullanılır. Bu kesimdeki veriler de girildikten sonra sıra parabolik çanak ile ilgili verileri içeren bir sonraki kesime gelinir. Şekil 3.9'da görülen bu kesimdeki veriler toplam yansıtıcı ayna alanı, toplam çanak alanı, yansıtıcı yüzeyin yansıtma oranı ve sistemin elektrik üretimine başlayacağı limit ışınım değeridir. Tüm değerler, istendiğinde kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Bu kesimin hesaplamaları sonucunda, parabolik çanaklardan elde edilen güç/enerji değeri, çanak kayıpları saatlik, aylık ve yıllık bazda elde edilir ve bu kesimin çıktısı olan parabolik çanak çıkış gücü değeri, bir sonraki kesimde alıcıya giren güç değeri hesaplamasında kullanılır.

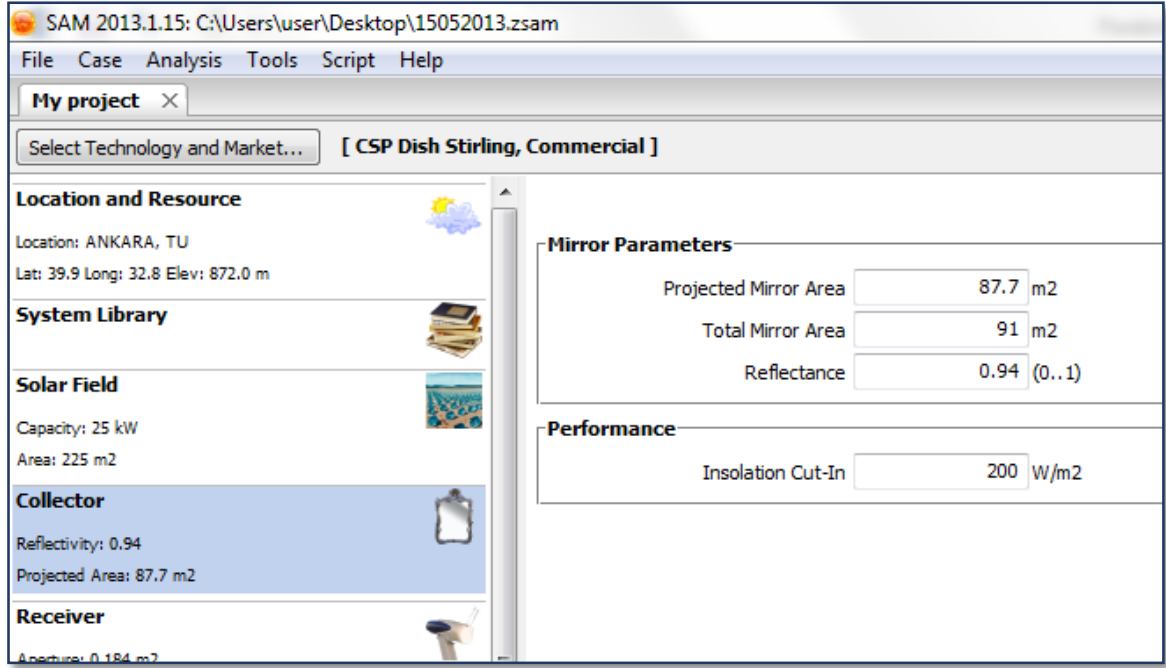
Ekran görüntüsü Şekil 3.10'da verilen ve alıcıya ait bilgilerin bulunduğu beşinci kesimde, alıcı boyutu, yalıtımı, soğuruculuğu ve kovuğu ile ilgili veriler bulunur. Bu veriler seçilen sisteme göre değişiklik gösterir ve yine kullanıcı tarafından değiştirilebilir. SAM programında paraboloid yoğunlaştırıcı sistemlerde sadece **DIR** tipi alıcı kullanılmaktadır. Bu kısımdaki parametreler kullanılarak alıcı çıkış gücü, alıcının ısı verimi, alıcı kayıpları hesaplanır. Bu kesimin çıktısı olan alıcı çıkış gücü



Şekil 3.7. Parabolik çanaklı güneş güç sistemi tasarımı için sistem seçimi



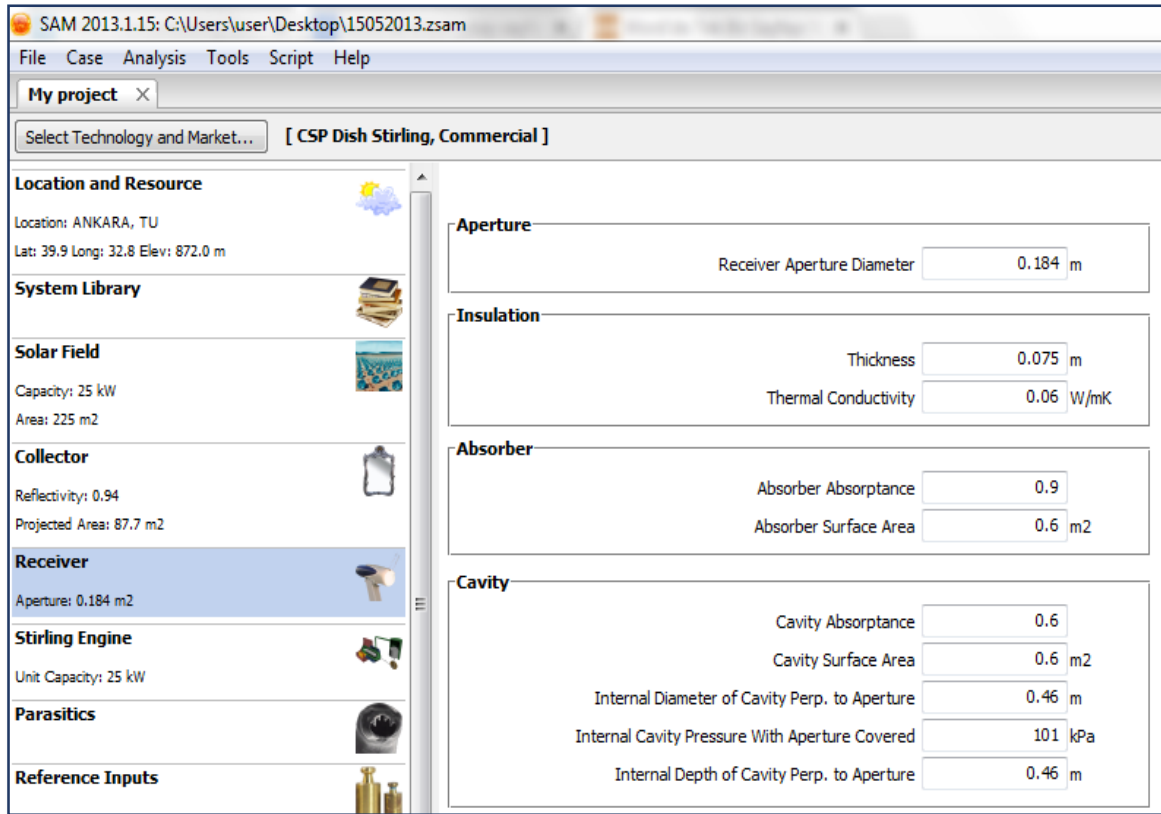
Şekil 3.8. Sistemin üzerinde bulunacağı alan ile ilgili özelliklerin bulunduğu ekran görüntüsü



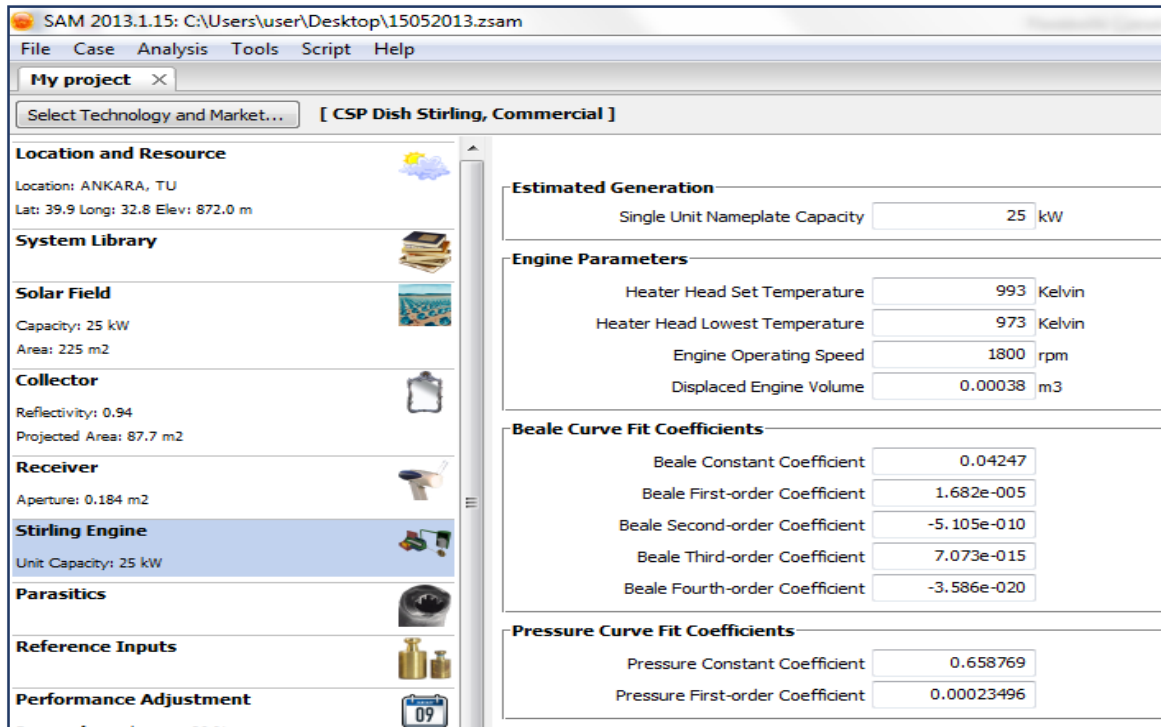
Şekil 3.9. Parabolik çanak ile ilgili verilerin bulunduğu ekran görüntüsü

değeri bir sonraki Stirling motoru kesiminde, Stirling motoru giriş gücü olarak kullanılmaktadır.

Stirling motoru ile ilgili parametreler bulunduğu altıncı kesime ait ekran görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir. Bu bölümde tek bir sistemin nominal gücü, genişleme bölgesinin belirlenmiş sıcaklık değeri, genişleme bölgesinin en düşük sıcaklık değeri, motorun dönüsel hızı, motor yer değiştirme hacmi parametreleri yer alır. Kullanıcı tarafından istendiğinde değiştirilebilir. SAM programında stirling motoru modeli, sıcaklık düzeltme terimi kullanan Beale eğri uydurma denklemine dayanır. Bu model saatlik bazda Stirling motoru çıkış gücünü Beale ve basınç eğri uydurma denklemlerinin, yer değiştirme hacminin, motor çalışma hızının ve genişleme bölgesi sıcaklığının bir fonksiyonu olacak şekilde hesaplar. Beale eğri uydurma (curve-fit) denklemi, Stirling motoru çıkış gücünü bir önceki kesimde hesaplanan alıcı çıkış gücünü (Stirling motoru giriş gücünü) kullanarak hesaplar. Hesaplama sonucunda, Stirling motoru çıkış gücü ve verimi, motor kayıpları gibi veriler elde edilebilir.



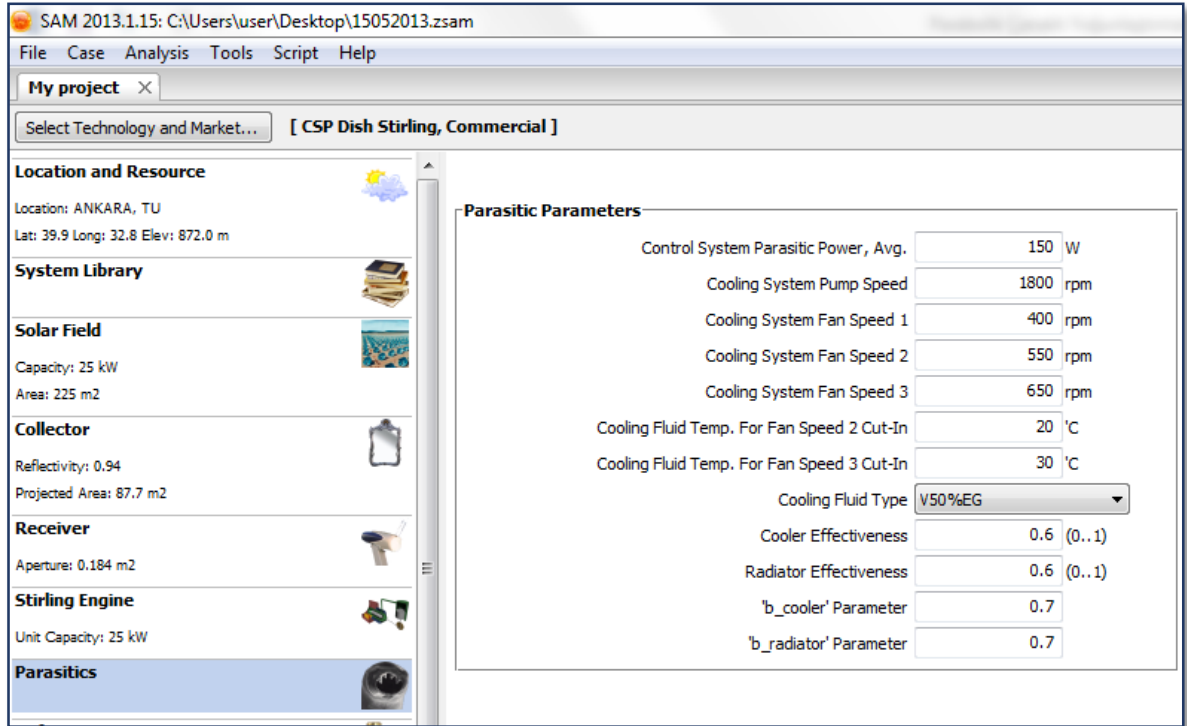
Şekil 3.10. Alıcı ile ilgili verilerin bulunduğu ekran görüntüsü



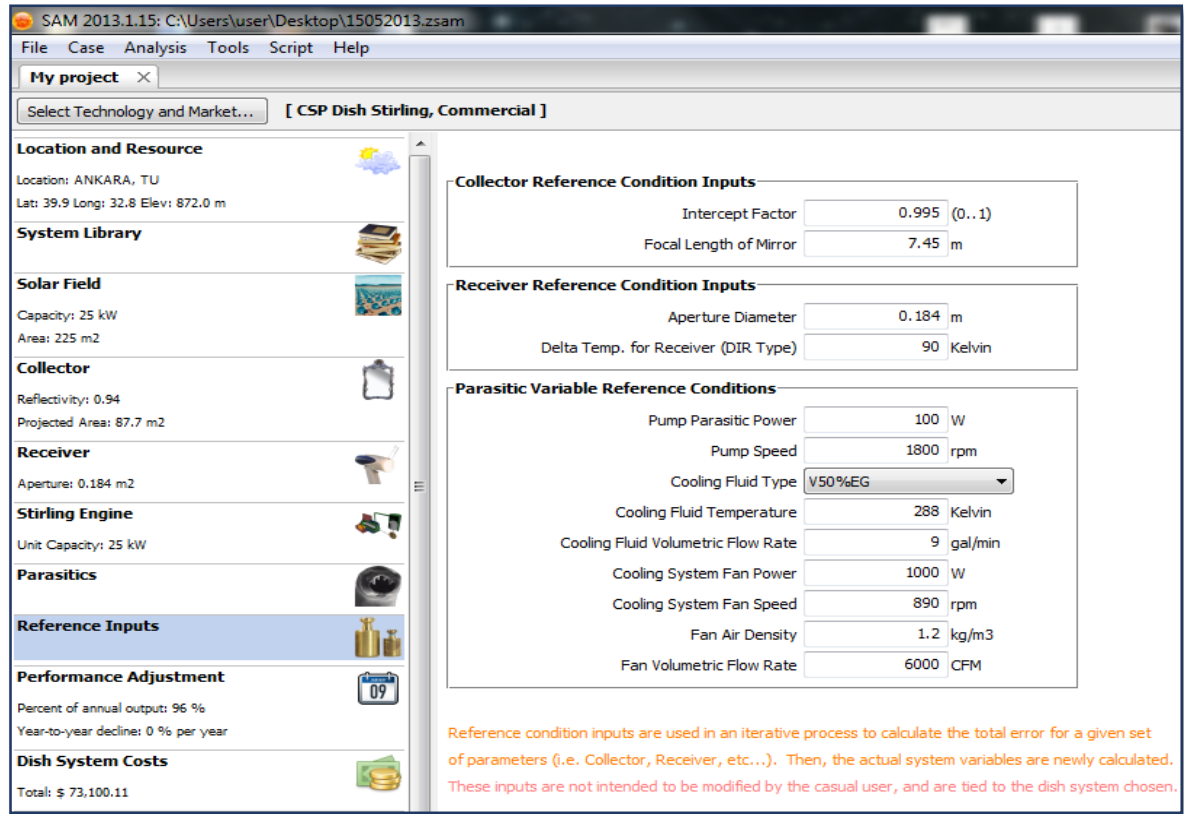
Şekil 3.11. Stirling motoru ile ilgili parametrelerin bulunduğu ekran görüntüsü

Enerji üretimi sırasında kullanılan sistemlerce harcanan enerjinin ele alındığı ve “Parasitics” adlı kesime ait ekran görüntüsü Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu kesimde Stirling motoru soğutma sistemi ve güneş takip sistemi gibi enerji harcayan kısımların parametreleri bulunmaktadır. Takip sisteminin harcadığı ortalama güç, soğutma sistemi elemanı olan fanın hızı ve hangi sıcaklıkta hangi fan hızlarının kullanılması gerektiği, soğutma sisteminde kullanılacak akışkanının türü, soğutucu ve radyatörün verimi ile ilgili bilgilerin bulunduğu kesimde de istenirse parametrelerde değişiklik yapılabilir. Bu kesimde bulunan parametreler, sıkıştırma bölgesi sıcaklığı, pompaların, soğutma sistemi fanlarının ve güneş takip sisteminin elektriksel güç harcamalarının hesaplanmasında kullanılır.

SAM programı kullanılan veri seti için referans durum parametrelerini tekrarlamalı bir süreç içinde kullanarak toplam hataları hesaplamaktadır. Şekil 3.13’te referans giriş verilerinin bulunduğu ekran görüntüsü görülmektedir. Bu parametrelerin değiştirilmemesi önerilmektedir.



Şekil 3.12. “Parasitics” ile ilgili parametrelerin bulunduğu ekran görüntüsü



Şekil 3.13. Sistem parametrelerinin referans verilerinin bulunduğu ekran görüntüsü

Sistemin yıllık yıpranması, yaşlanması, yıllık çıktı yüzdesi ve aylara göre günün hangi saatlerinde çalışıp, hangi saatlerinde çalışmayacağı kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Bu tanımlamalar sonucunda sistem çıktısı bu faktörler de hesaba katılarak hesaplanır. Bu tez çalışmasında kullanılan performans ayarlaması kesimi Şekil 3.14'te görülmektedir. Sistemin tüm yıl boyunca saat 06:00'dan 20:00'ye kadar tam kapasite çalıştığı düşünülerek performans ayarlaması yapılmıştır.

Tüm veri girişleri tamamlandıktan sonra, Şekil 3.15'te görülen **simülasyonları yap** butonuna basılarak simülasyon yaptırılır ve çıktılarına **sonuçlar** kısmından ulaşılabilir. Şekil 3.16'da simülasyon sonuçlarının çizelgeler halinde verilmiş şekli görülmektedir. Şekil 3.16'nın sol kısımda bulunan listeden alınmak istenen sonuçlar seçilerek istenilen çizelgeler oluşturulabilir. Bir parabolik çanak-Stirling sistemi performans modeli için alınabilecek sonuçlar yıllık, aylık ve saatlik bazda olabilir. Yıllık sonuçlar oluşturulan sistem bazında net enerji çıktısı, yoğunlaştırıcıya gelen enerji, yoğunlaştırıcı çıkış enerjisi, alıcıya gelen enerji, alıcı çıkış enerjisi ve Stirling motoru brüt ("**gross**") çıkış enerjisidir. Aynı sonuçlar aylık bazda da verilmektedir.

Saatlik sonuçlar ise daha detaylı bilgi verebilir. Saatlik sonuçlar; hava sıcaklığı, sıkıştırma bölgesi sıcaklığı, yoğunlaştırıcı verimi, soğuk tanka giren ve soğuk tanktan çıkan soğutucu suyu sıcaklıkları, direkt normal güneş ışınımı, yoğunlaştırıcıların birbirlerini gölgeleme faktörü, Stirling motoru basıncı, net sistem verimi, yoğunlaştırıcıya gelen güç, alıcıya gelen güç, alıcı çıkış gücü, alıcı ısı verimi, genişleme bölgesi sıcaklığı, stirling motoru verimi, stirling motoru brüt çıkış gücü, Stirling motoru kayıpları, toplam yoğunlaştırıcı kayıpları, “*parasitic*” yük, toplam alıcı kayıpları ve rüzgar hızıdır.

System Output Adjustments

Percent of annual output

Year-to-year decline in output

Use the system output adjustments to model system availability, annual degradation, curtailment, or other factors that cause the system's output (delivered energy) to be less than the value calculated by the performance model (net energy). Use annual schedules to specify different percentages for different years.

If you use combinations of adjustments, SAM multiplies the resulting percentages and hourly factors. See Help for examples.

Hourly Factors (24-hour profile for each month) 0=No Output, 1=Full Output

	12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm	11pm
Jan	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Aug	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Sep	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Oct	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Dec	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Şekil 3.14. Performans ayarlamalarının yapılacağı ekran görüntüsü



Şekil 3.15. Soldan sağa doğru **simülasyonları yap**, **simülasyonları yapılandır** ve **sonuçlar** butonları

View and export data:

Choose Simulation: Base Case

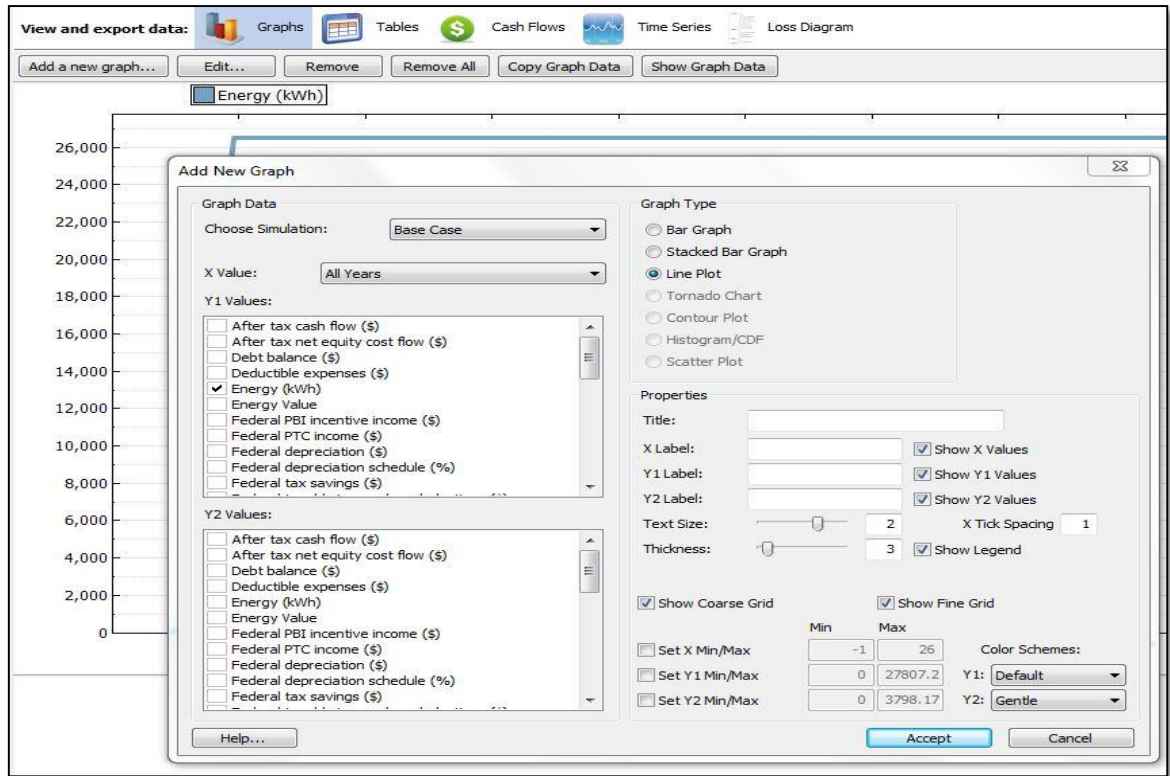
Output Variables

- Metrics
 - Annual Energy
 - LCOE Nominal
 - LCOE Real
 - Total revenue without system (\$)
 - Total revenue with system (\$)
 - First Year Net Revenue
 - Net present value (\$)
 - Payback (years)
 - Capacity factor
- Single Values
- Monthly Data
 - Monthly Energy Delivered (kWh)
 - Total Field Net Power Output (MWh), monthly
 - Total Field Net Power Output (kWh), monthly
 - Total Field Power Incident on Collector (MWh), monthly
 - Total Field Power from the Collector (MWh), monthly
 - Total Field Receiver Inlet Power from the collector (MWh), mont
 - Total Field Receiver Power Output (MWh), monthly
 - Total Field Stirling Engine Gross Power Output (MWh), monthly
 - Year 1 monthly demand charge (Fixed) with system (\$)
 - Year 1 monthly demand charge (TOU) with system (\$)
 - Year 1 monthly tiered charge with system (\$)
 - Year 1 monthly tiered rate with system (\$)
- Data: 25 values
- Annual Data
- Hourly Data
 - Ambient Temperature (C), hourly
 - Cold Sink Temperature / Compression Temperature (C), hourly
 - Collector Efficiency, hourly
 - Cooling Fluid Temp from Cold Sink (C), hourly
 - Cooling Fluid Temp to Cold Sink (C), hourly
 - DNI (W/m²), hourly
 - Dish-to-Dish shading performance factor, hourly
 - Engine Pressure (Pa), hourly

	Annual Energy	Monthly Energy Delivered (kWh)	Total Field Net Power Output (kWh), monthly	Capacity factor
1	26483	1286.43	1340.03	12.0927
2		1213.24	1263.79	
3		1439.63	1499.61	
4		2452.19	2560.55	
5		2643.37	2863.54	
6		3209.49	3417.8	
7		3617.3	3896.52	
8		2793.12	2918.69	
9		2252.14	2345.98	
10		1693.35	1763.91	
11		1931.39	2011.87	
12		1951.38	2032.69	

Şekil 3.16. Simülasyon sonuçlarının tablo olarak verilmesi

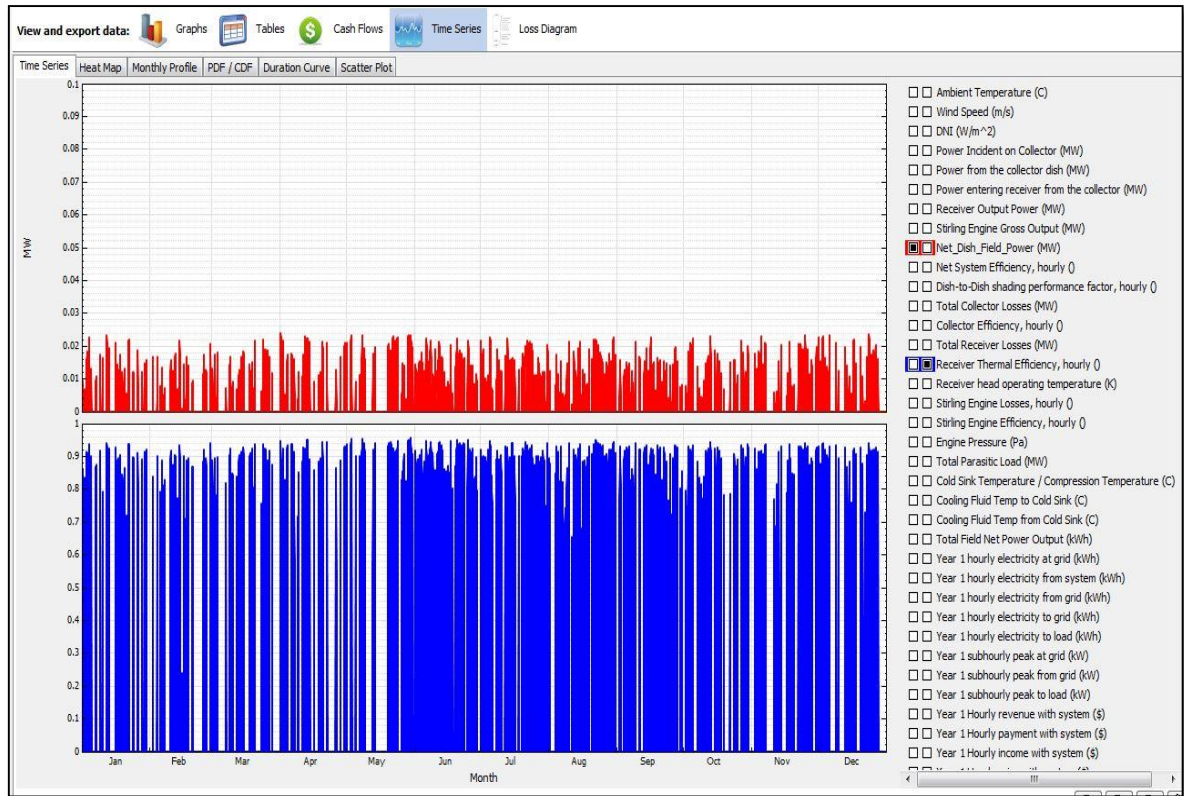
Şekil 3.16'da söz edilen verilerden istenilen veriler kullanılarak, Şekil 3.17'de görüldüğü gibi grafikler çizilebilir ve bu çizilen grafikler istenilen yerde kullanılmak üzere kopyalanabilir ve Excel programına aktarılabilir.



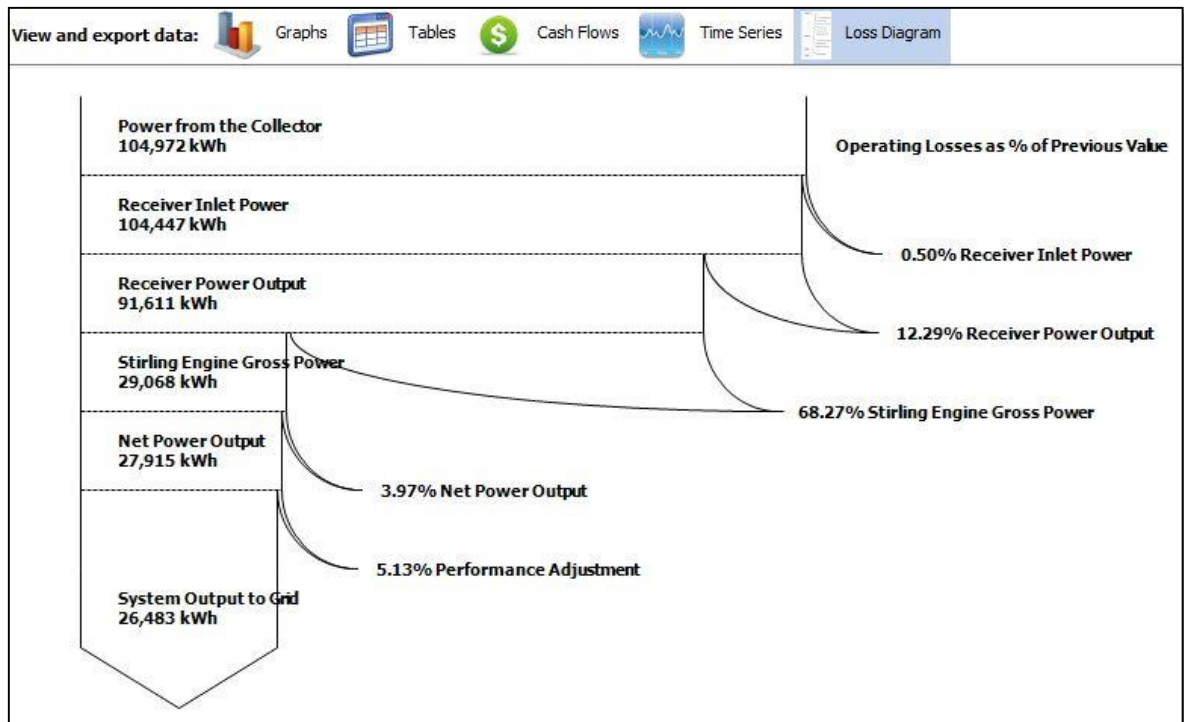
Şekil 3.17. Simülasyon sonuçlarının grafiklerinin çizilebileceği ekran görüntüsü

Şekil 3.18’de görülen zaman serileri “*time series*” isimli bölümden yatay eksen zaman olacak şekilde, dikey eksen parametresi seçilerek istenilen grafik çizdirilebilir, verileri görülebilir. Aylık profiller de tek tek grafikler halinde istenen parametre seçilerek oluşturulabilir.

Şekil 3.19’da görülen kayıp diyagramı bölümünden ise simülasyonu yapılan sistem için yüzde kayıplar incelenebilir. Kayıp diyagramında, alıcıda ve Stirling motorunda oluşan kayıplar ayrı ayrı gösterilmektedir.

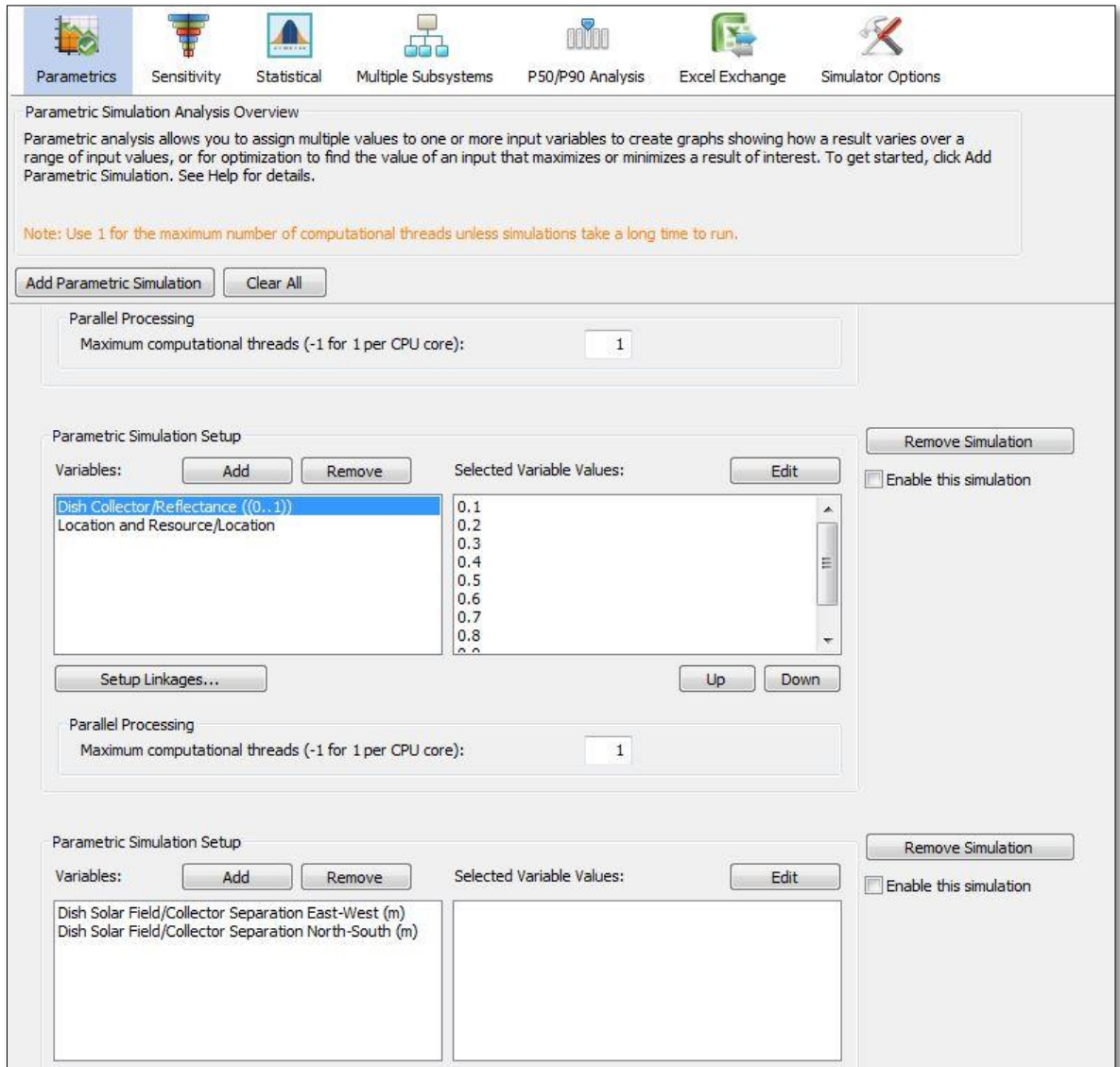


Şekil 3.18. Simülasyon sonuçlarının time-series olarak görülebileceği ekran görüntüsü



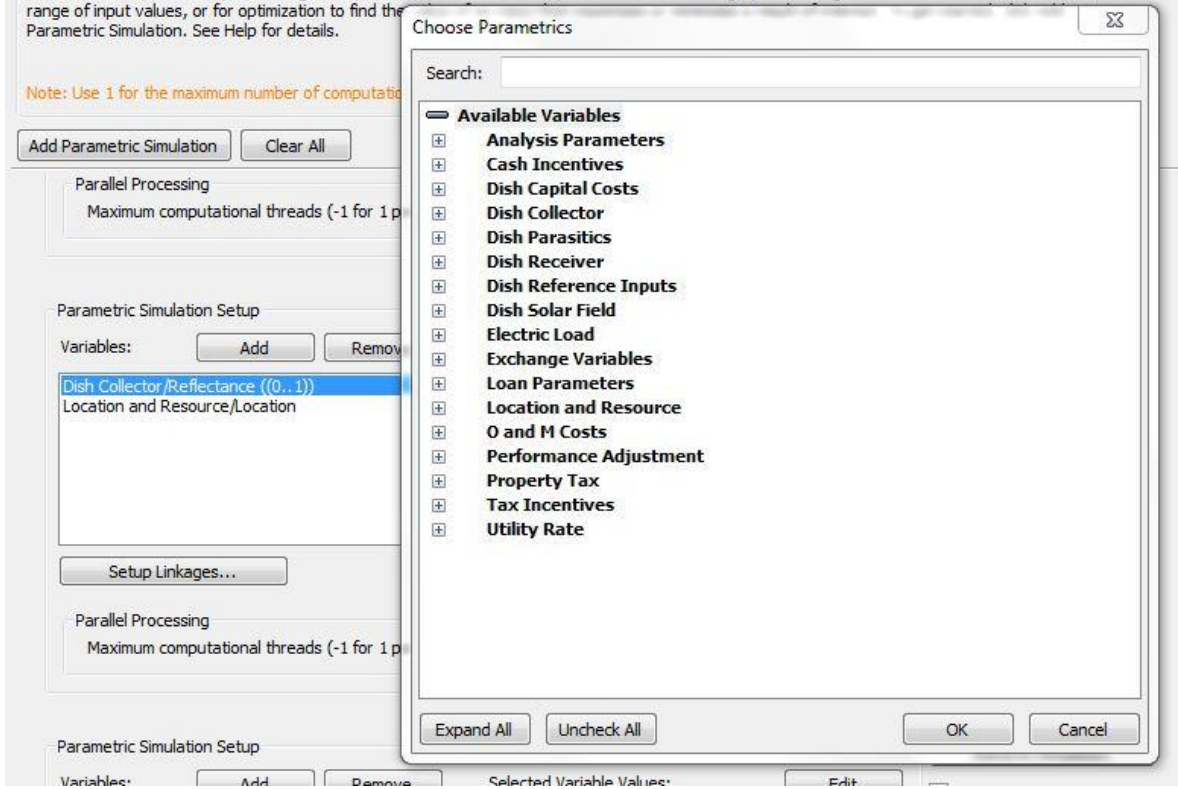
Şekil 3.19. Simülasyon sonucunda ortaya çıkan kayıp diyagramı

Şekil 3.15'te görülen **simülasyonları yapılandır** butonuna basılarak parametrik simülasyon yapılabilir. Butona basıldığında çıkan ekran görüntüsü, Şekil 3.20'de verilmiştir. **Parametrik simülasyon ekle "add parametric simulation"** butonu kullanılarak istenildiği kadar parametrik simülasyon eklenebilir. Bir parametrik simülasyon eklendiğinde parametrik simülasyonun yapılması istendiği parametreleri eklemek için ekle "**add**" butonuna basıldığında Şekil 3.21'de görülen ve seçilebilecek parametrelerin bulunduğu kesim ekrana gelir. Buradan istenen parametreler eklenir ve istenilen değerler arasında değiştirilerek sonuçlar elde edilir.



Şekil 3.20. Parametrik simülasyonların yapılabileceği ekran görüntüsü

Sonuçlar Excel programına aktarılabilir veya program içinde grafikler kısmından istenen grafikler çizdirilebilir. Tek bir parametrik simülasyon içine birçok parametre eklemek kullanışlı değildir. Çünkü yapılacak simülasyon sayısı ve zamanı artacaktır. 4. kesimde bu adımlar kullanılarak parametrik simülasyonlar yapılmıştır.



Şekil 3.21. Parametrelerin seçilebileceği ekran görüntüsü

4. SAM KULLANILARAK SİSTEM TASARIMI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez kapsamında SES ve WGA parabolik çanak-stirling sistemleri kullanıldığından, her iki sistemin kurulduğu yerleşim olan Amerika'daki Albuquerque yerleşiminin yanı sıra Türkiye'den Ankara ve Van yerleşimleri seçilmiştir. SES ve WGA sistemleri için Albuquerque'nin seçilme nedeni gerçek sistemlerin bu yerleşimde kurulmasıdır. Türkiye'de çanak-stirling sistemlerinin uygulanabilirliğinin görülmesi açısından ulaşılabilir meteorolojik veriler ile Ankara ve Van iki yerleşim yeri olarak seçilmiştir. Sistem simülasyonları yapılırken bu yerleşimlere ait meteorolojik data lar kullanılmıştır ve Amerika'ya ait veriler SAM yazılımının kütüphanesinden sağlanırken, Türkiye'ye ait veriler ise **Meteonorm** yazılımından sağlanmıştır. Öncelikle SAM yazılımının sistem bileşenleri bölümlerinde bulunan ve kesim 3.1.'de açıklanan parametreler için parametrik analiz yapılarak optimum değerler elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları tek bir çanak-stirling sistemi düşünülerek yapılmıştır. Kullanılan parametrelerin açıklamaları ve yazılımda varsayılan değerleri EK-1'de verilmiştir. Parametrelerin optimum değerleri elde edildikten sonra ikinci aşama olarak ise birçok sistemin bir araya gelmesi ile oluşturulan bir güneş tarlası ele alınarak kullanılacak çanak-Stirling sistemlerinin yerleşim planı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Son aşama olarak oluşturulan sistemlerde, sistem kayıpları ve üretimler ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

4.1. SES ve WGA Sistem bileşen parametrelerinin optimizasyonu

SES ve WGA sistemleri için Ankara, Van, Albuquerque, meteorolojik verileri kullanılarak yapılan parametrik simülasyon sonuçları ve grafikleri bu kesimde sırası ile verilmiştir. Çanak-Stirling sistem bileşenlerinden parabolik çanak, alıcı ve "parasitics" parametreleri için ayrıntılı inceleme yapılmıştır. Şekil 3.11'de verilen Stirling motor parametreleri SES ve WGA sistemlerinde kullanılan Stirling motoru olarak seçilmiştir. Programdan alınan uyarı üzerine Stirling motor parametreleri değiştirilmemiştir. Çanak-stirling sistem parametrelerin parametrik analizi ve optimizasyon işlemi yapılırken performans ayarlaması bölümünde bulunan yıllık çıktı yüzdesi %96 olarak alınmıştır. Parametrelerin değiştirilmesi sırasında, değiştirilen parametre dışındaki tüm parametreler için çizelge EK-2'de verilen değerler kullanılmıştır.

4.1.1. Parabolik Çanak

Parabolik çanak ile ilgili olarak Şekil 3.9'da verilen çanak parametrelerinden toplam ayna alanı sabit tutularak parabolik çanağın

- Yansıtıcı ayna alanı
- Yansıtma oranı

değiştirilerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistemlerde kullanılan toplam ayna alanı değeri arttırıldığında kullanılan Stirling motoru ile uyumsuzluk oluşabileceği göz önüne alınarak toplam ayna alanı SES sistemi için 91 m², WGA sistemi için 42,9 m² büyüklüğünde olan gerçek değerleri sabit değer olarak düşünülmüştür.

Parabolik çanak yoğunlaştırıcı çıkış gücü,

$$P_{yoğ,çıkış} = I_{DNI} \cdot \rho_{yansıtıcı} \cdot A_{yansıtıcı} \cdot \Phi_{rüzgar} \cdot \Phi_{gölge} \quad (4.1.)$$

eşitliği ile verilmektedir [21]. Burada;

I_{DNI} ; direkt normal güneş ışınımı,

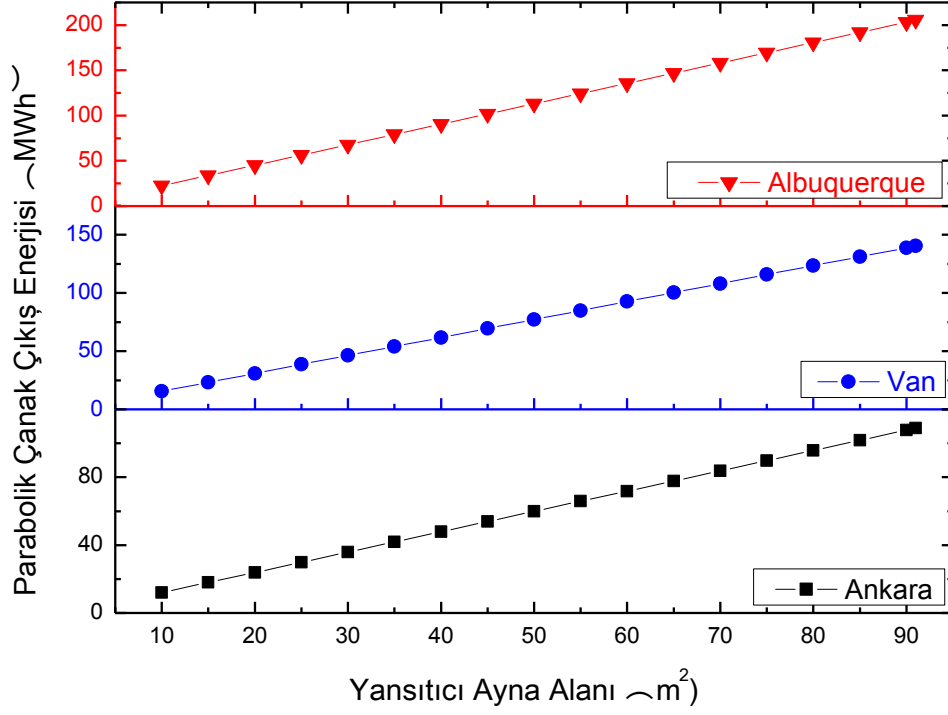
$A_{yansıtıcı}$; yansıtıcı ayna alanı,

$\rho_{yansıtıcı}$; yansıtıcı yansıtma oranı,

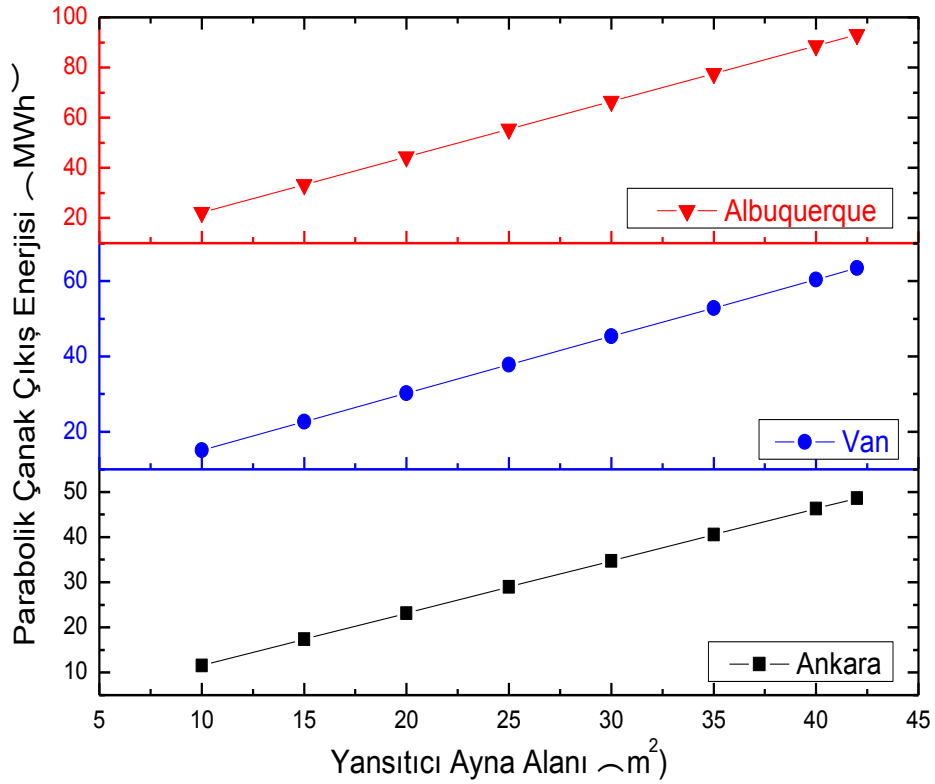
$\Phi_{rüzgar}$; rüzgar faktörü

$\Phi_{gölge}$; gölgelenme faktörüdür.

- **Yansıtıcı ayna alanı değişimi:** Yoğunlaştırıcı çıkış gücü yansıtıcı ayna alanı ile doğru orantılı olduğundan, Eş. 4.1'den beklendiği gibi yansıtıcı ayna alanı arttıkça parabolik çanaktan çıkan enerji miktarı da artacaktır. Yansıtıcı ayna alanı, SES sistemi için 10-90 m² aralığında, WGA sistemi için ise 10-42 m² aralığında değiştirilerek parametrik simülasyon yapılmış ve sonuçları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, doğrusal değişim göstererek, SES sistemi için yansıtıcı yüzey alanı 8 kat arttığında, çıkış enerjisi 8 kat artmaktadır, Şekil 4.1.(a). Benzer şekilde WGA sisteminde de 3,2 kat yüzey alan artışı yapıldığında, çıkış enerjisi artış oranının 3,2 kat olduğu görülmektedir, Şekil 4.1.(b).



(a)



(b)

Şekil 4.1. Albuquerque, Van ve Ankara için (a) SES (b) WGA yansıtıcı ayna alanının değişimi ile yıllık parabolik çanak çıkış enerjisi değişimi

- **Yansıtma oranı değişimi;** Yansıtma oranı, SES sistemi için 0,1-1, WGA sistemi için ise 0,2-1 değerleri aralığında değiştirilip parametrik simülasyon yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.2'de verilmiştir.

Eşitlik 4.1'de de verildiği gibi parabolik çanağın çıkış enerjisi; yansıtıcı yüzeyin yansıtma oranı ile doğru orantılı olduğundan, SES sistemi için yansıtıcı yansıtma oranı 9 kat artırıldığında, parabolik çanağın çıkış enerjisi de 9 kat artmıştır, Şekil 4.2.(a). Benzer şekilde yansıtıcı yansıtma oranı 4 kat artırılan WGA sistemi için ise, parabolik çanağın çıkış enerjisi artış oranı 4 kattır, Şekil 4.2.(b).

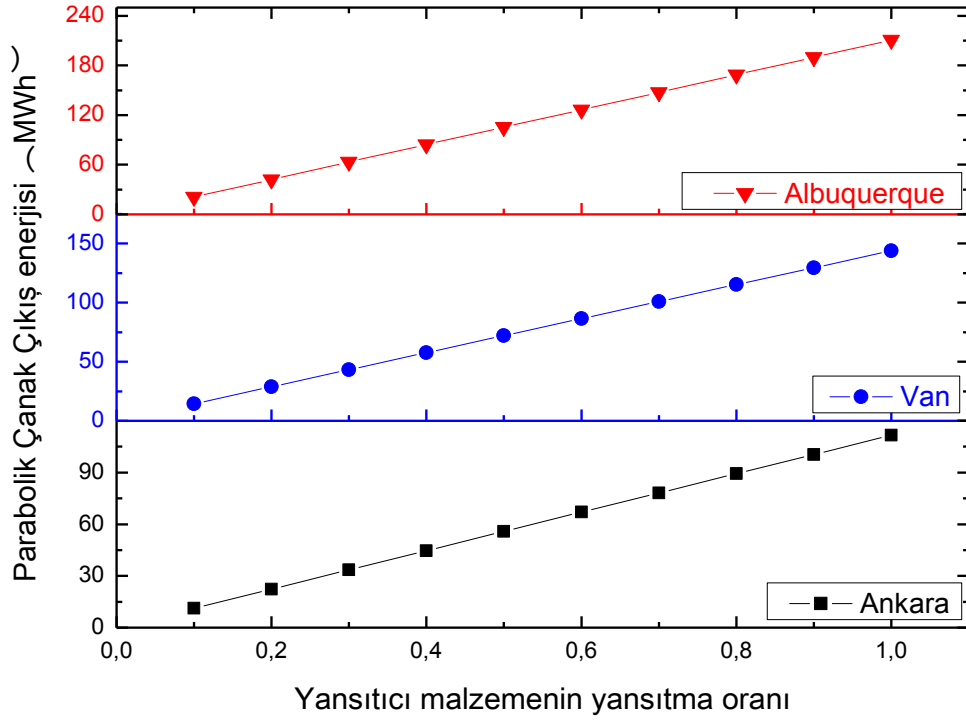
4.1.2. Alıcı

Alıcı ile ilgili olarak Şekil 3.10'da verilen alıcı parametrelerinden alıcının

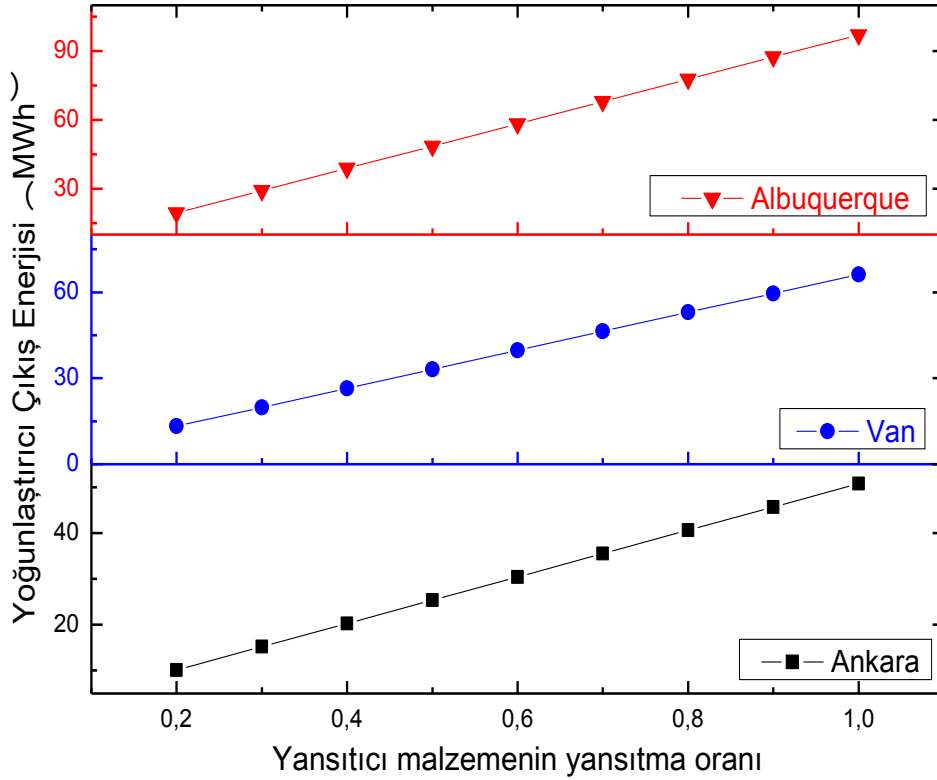
- açıklık çapı
- yalıtım malzemesinin kalınlığı
- yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği
- soğurucu soğurma oranı
- soğurucu yüzey alanı
- kovuk soğurma oranı
- kovuk iç yüzey alanı
- kovuk çapı ve derinliği

değiştirilerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Alıcı açıklığına koruma malzemesi konulduğu durumdaki iç basıncı gösteren parametre (internal cavity pressure with aperture covered) bu çalışmada koruyucu kullanılmadığı için atmosfer basıncı olarak alınmıştır.

- **Alıcı Açıklık Çapı;** Alıcı açıklık çapı, SES sistemi için 5-46 cm, WGA sistemi için ise 5-35 cm değerleri arasında değiştirilerek parametrik simülasyon yapılmıştır. Alıcı açıklık çapının maksimum değerinin SES sisteminde 46 cm olarak, WGA sisteminde ise 35 cm olarak seçilmesinin nedeni, sistemlerin alıcılarının iç kovuk çaplarının sırası ile 46 cm ve 35 cm olmasıdır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırası ile alıcı açıklık çapının değişimine karşı alıcı çıkış enerjisi ve toplam alıcı kayıpları incelenmiştir.

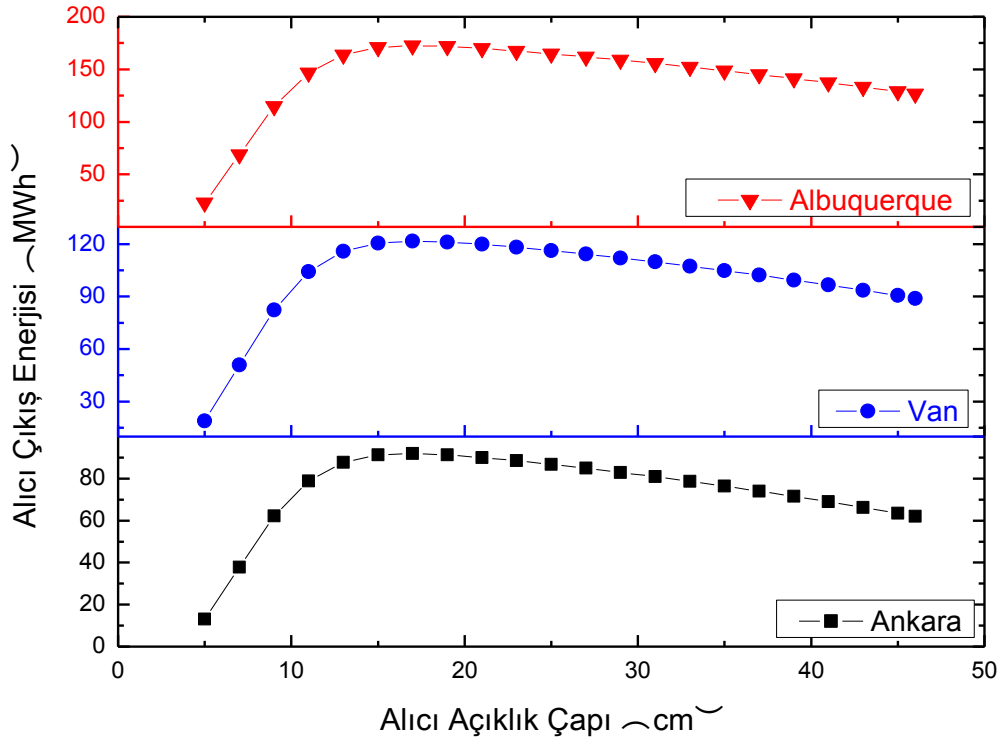


(a)

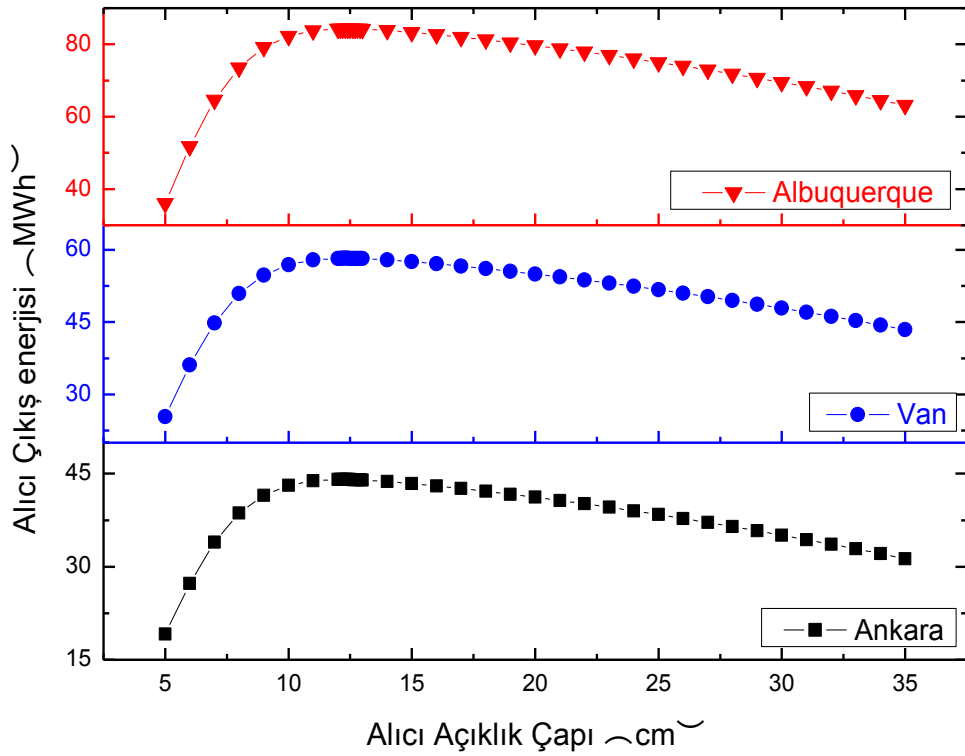


(b)

Şekil 4.2. Albuquerque, Van ve Ankara için (a) SES (b) WGA yansıtıcı yansıtma oranı değişimi ile yıllık parabolik çanak çıkış enerjisi miktarındaki değişim

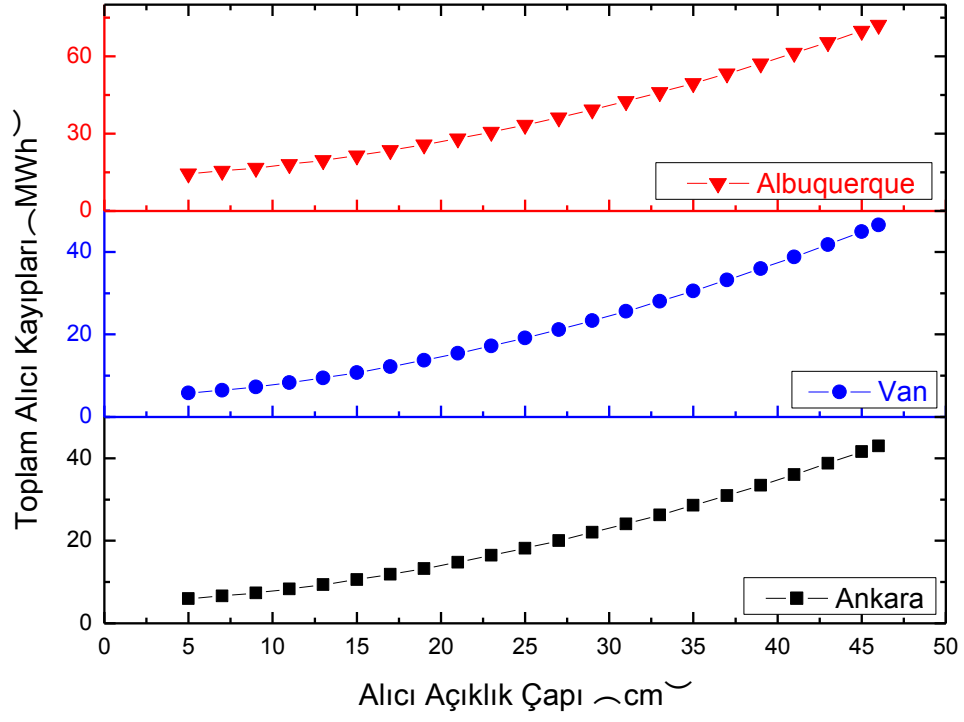


(a)

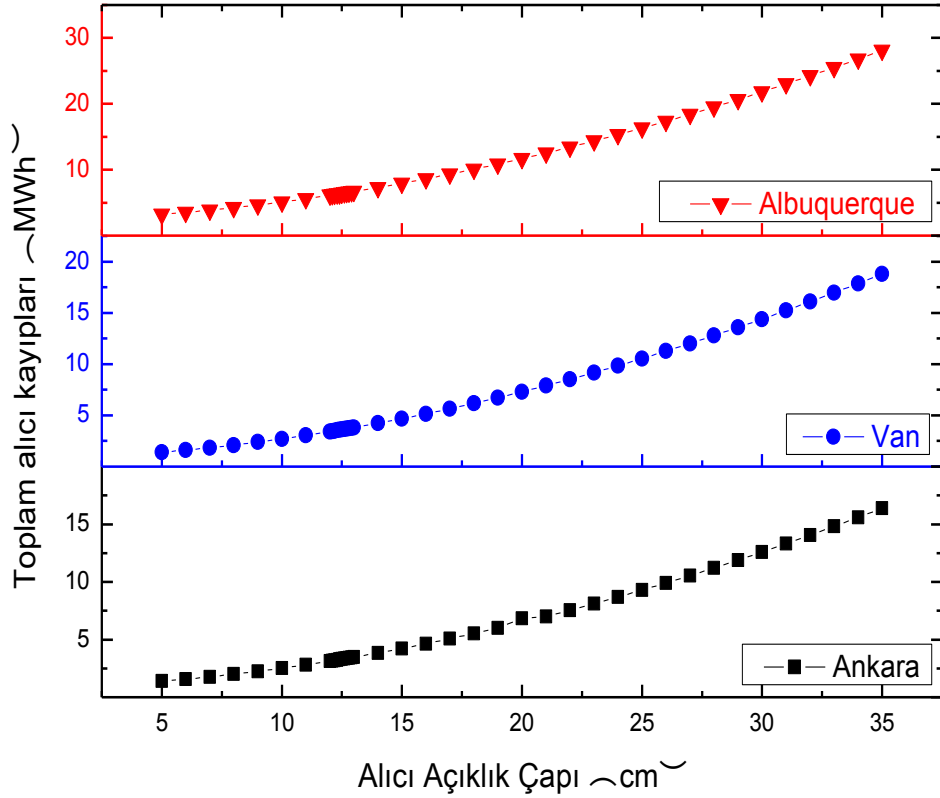


(b)

Şekil 4.3. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı açıklık çapı değerlerine göre değişimi



(a)



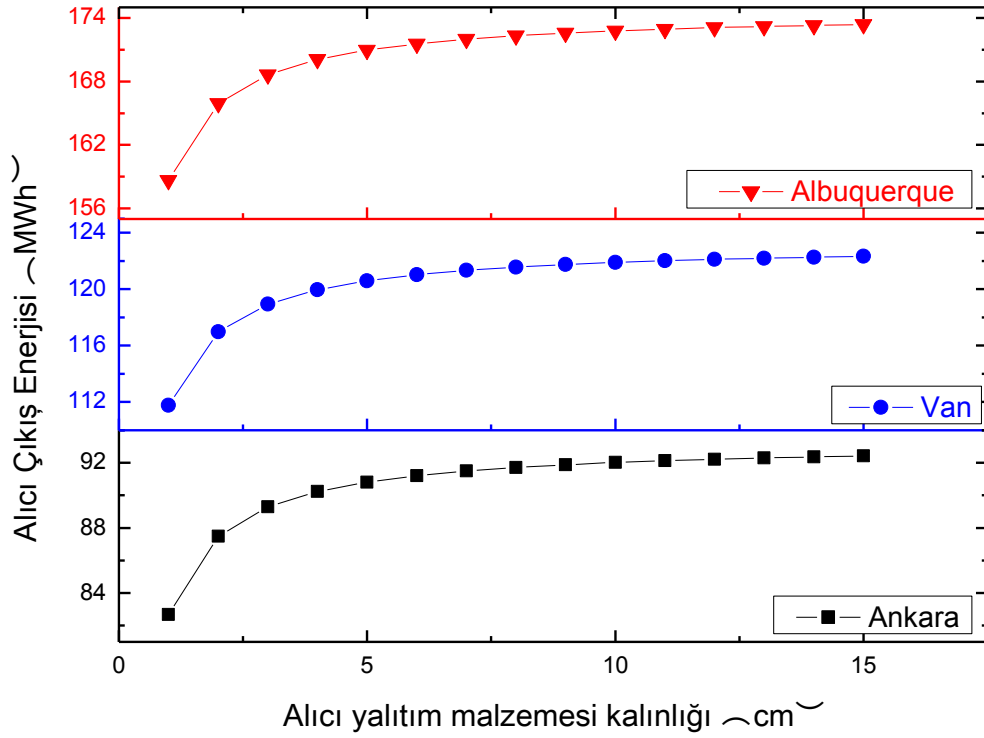
(b)

Şekil 4.4. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının alıcı açıklık çapı değerlerine göre değişimi

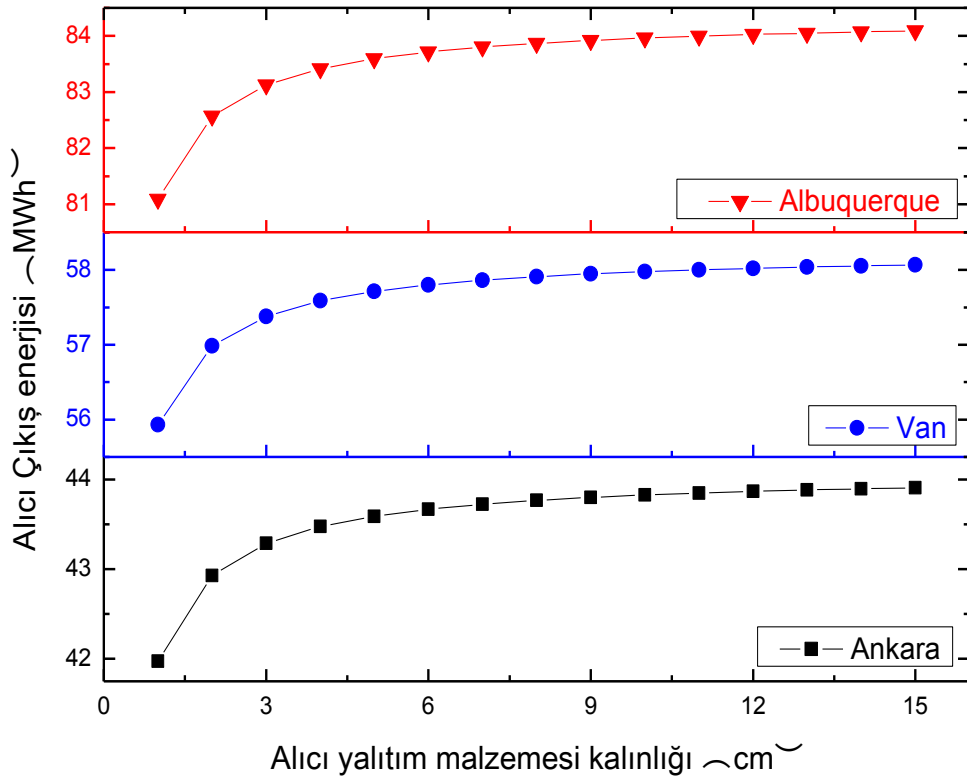
Şekil 4.3 (a) ve (b)'de alıcı açıklık çaplarının belirli bir değerinde maksimum enerji çıktısı gözlenmektedir. Alıcı açıklık çapının çok küçük olması durumunda parabolik çanakta yansiyarak gelen güneş ışınımının yakalanamayacağı gibi, çok büyük olması durumunda da ısı enerjisi kayıpları meydana gelecektir. Dolayısı ile, şekilden görüldüğü gibi, maksimum enerji çıkışının olduğu bir optimum değeri olmalıdır. SES sisteminin simülasyonu yapılırken maksimum enerji çıktısının gözlemlendiği alıcı açıklık çapı değeri 16,8 cm, WGA sistemi için de 12,3 cm'dir. Şekil 4.4 (a) ve (b)'de toplam alıcı kayıplarının değişimi gösterilmiştir ve alıcı açıklık çapının artan değerleri için alıcı kayıplarının daha büyük bir hızla arttığı görülmektedir. Şekil 2.10'dan görüleceği gibi alıcı açıklığından ışınım ve taşınım yolu ile kayıplar meydana gelecektir. Alıcı açıklık çapının artması durumunda, alıcı açıklık alanı da artacağından Eş. 2.44'e bakıldığında artan alıcı açıklık alanı ile ışınım yolu ile meydana gelen kayıpların arttığı görülür. Eş. 2.49, 2.50 ve 2.51'e bakıldığında açıklık çapının artışı sonucunda taşınım ile meydana gelen kayıpların da artacağı görülmektedir.

- **Yalıtım Kalınlığı;**

Alıcı üzerinde bulunan yalıtımın kalınlığı SES ve WGA sistemleri için 1 ile 15 cm aralığında değiştirilmiş ve Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi yalıtım kalınlığı değişiminin sırası ile alıcıdan çıkan enerji miktarına ve toplam alıcı kayıplarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5. (a) ve (b) grafiklerinden, alıcı yalıtım kalınlığı arttıkça, alıcı çıkış enerjisinin önce hızlı bir şekilde arttığı, 7,5 cm değerinden sonra bu artışın doyuma ulaşma eğiliminde olduğu görülmektedir. Şekil 4.6 (a) ve (b) grafiklerinden görüldüğü gibi, benzer davranışla, 7,5 cm değerinden sonra kayıplardaki düşüş hızı azalmaktadır. 7,5 cm olan bu kritik değer kesim 2.2.2'de açıklanan optimum yalıtım kalınlığı değeridir. Eş. 2.41'e bakıldığında yalıtım kalınlığının arttığı durumda ısı iletimine karşı direnç artacaktır ve direnç arttıkça iletim ve taşınım yolu ile meydana gelecek ısı kayıplarının azalması, Eş. 2.43'ten de görüleceği gibi, beklenen bir durumdur.

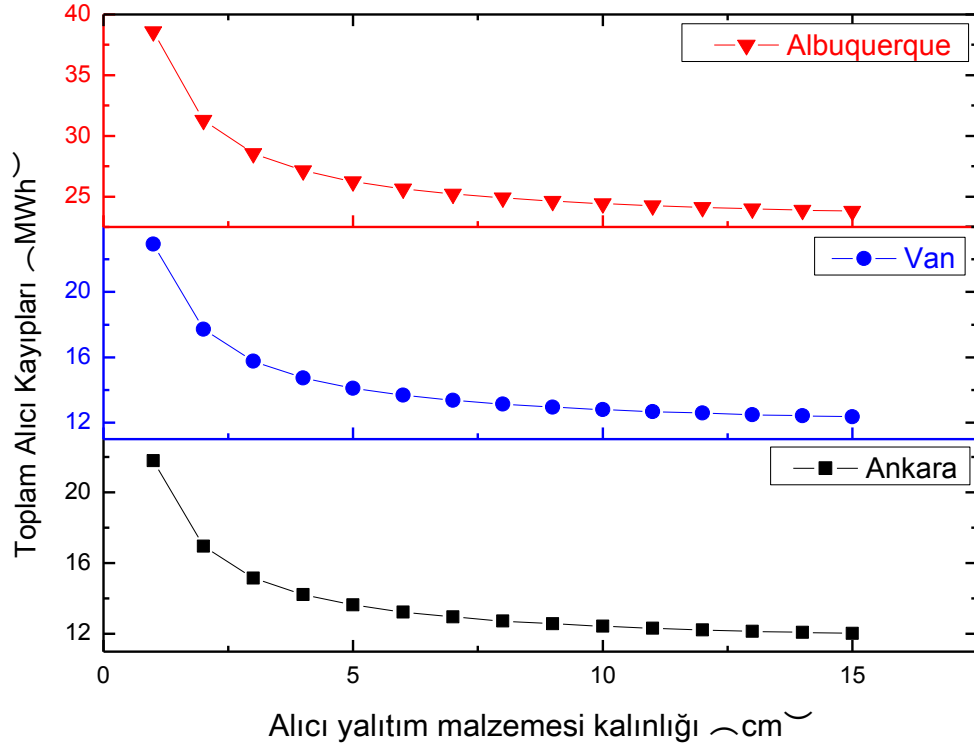


(a)

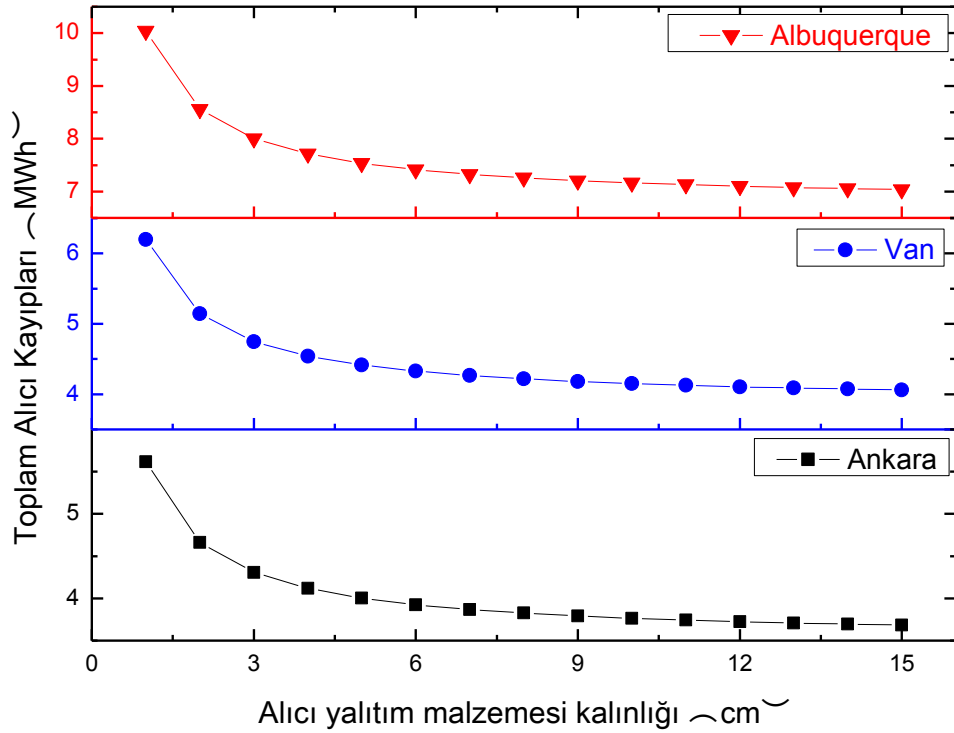


(b)

Şekil 4.5. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı yalıtım kalınlığı değerlerine göre değişimi



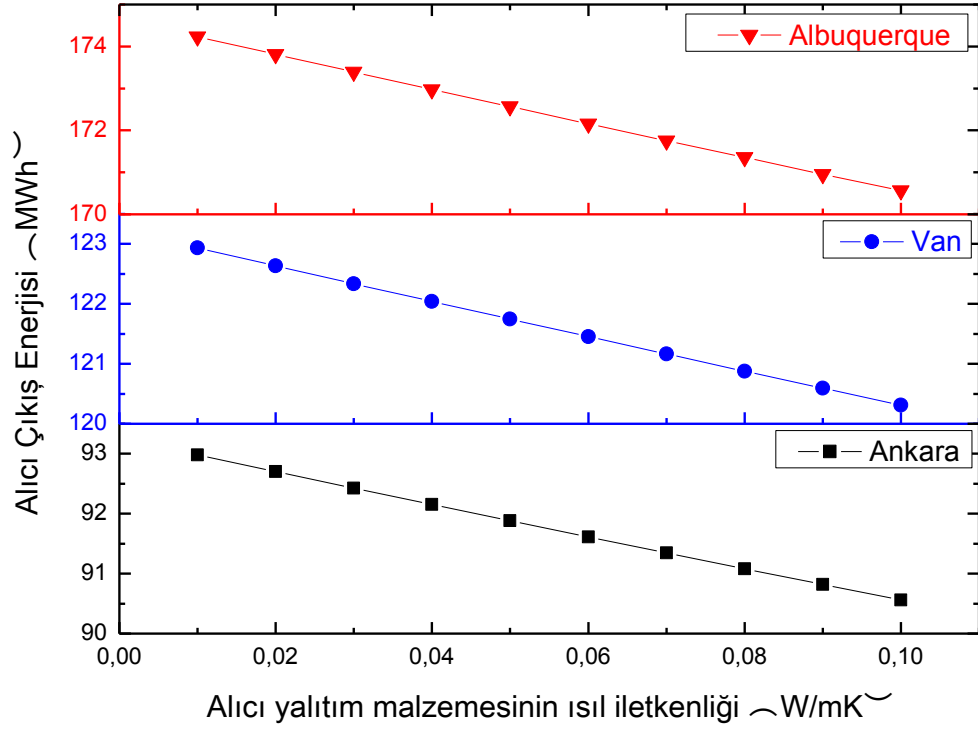
(a)



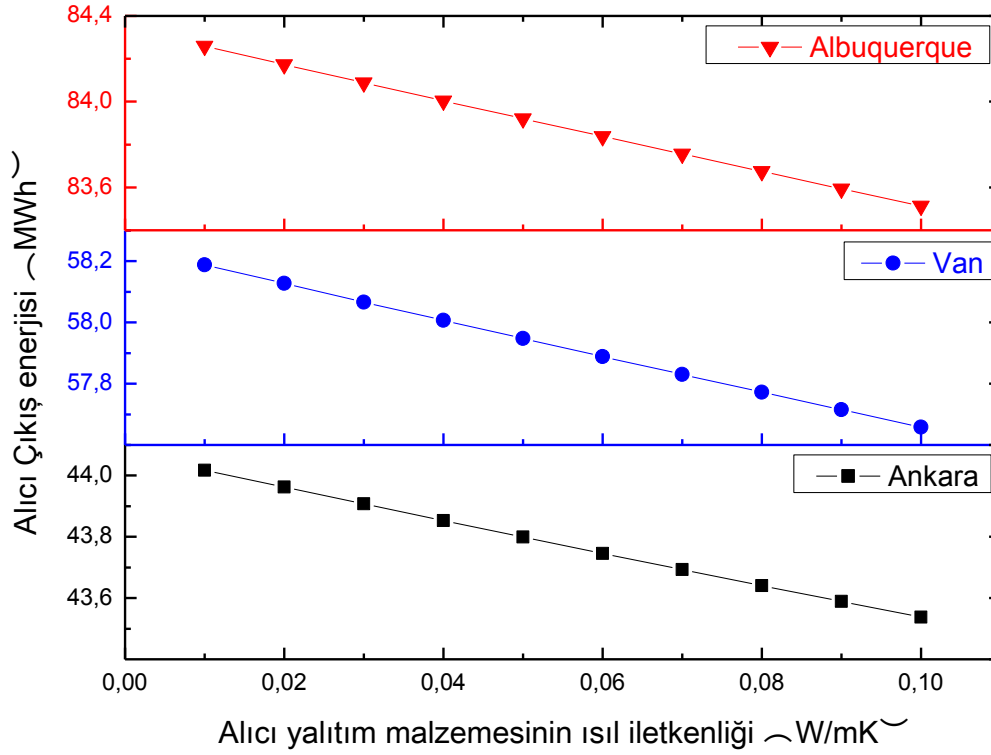
(b)

Şekil 4.6. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kaybının alıcı yalıtım kalınlığı değerlerine göre değişimi

- **Yalıtım Malzemesinin Isıl İletkenliği;** Yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği, SES ve WGA sistemleri için 0,01-0,1 W/mK aralığında değiştirilmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de alıcı uzerinde bulunan yalıtım malzemesi ısı iletkenliği değişiminin sırası ile alıcı enerji çıktılarını ve toplam alıcı ısı kayıpları nasıl etkilediği verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği arttıka, alıcı çıkış enerjisi azalmakta, alıcı kayıpları artmaktadır. Eş. 2.41'den görüleceği gibi yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğinin arttığı durumda ısı direnç azalacağından, Eş. 2.43'te verilen iletim yolu ile meydana gelen ısı kayıp artacaktır. Alıcı uzerine konulan yalıtım malzemesinin ısı enerjisini mümkün olduğunca iletmemesi gerekir. Yalıtım malzemesi seçilirken ısı kayıpların az olabilmesi için ısı iletkenlik katsayısı düşük malzemeler tercih edilmelidir.
- **Soğurucu Soğurma Oranı;** Alıcının arkasında bulunan soğurucuya ait soğurma oranı değerleri, SES ve WGA sistemleri için 0,1-1,0 aralığında değiştirilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da soğurucu malzemenin soğurma oranının alıcı çıkış enerjisini ve toplam alıcı kayıplarını nasıl etkilediği görülmektedir. Soğurucu soğurma oranı arttıka, Şekillerden görüldüğü gibi alıcı çıkış enerjisi artmakta, toplam alıcı kaybı azalmaktadır. SAM yazılımında, ortalama kovuk soğurma oranı, soğurucu malzemenin soğurma oranı ve kovuk yüzey soğurma oranlarının ortalaması olarak tanımlandığından, soğurucu malzemenin soğurma oranı arttığında, ortalama kovuk soğurma oranı da artacağından, bu artışa bağlı olarak Eş. 2.45'ten görüleceği gibi etkin soğurma oranı da artacaktır. Etkin soğurma oranının artışı ile de Eş. 2.46'dan görüleceği gibi yansıma aracılığı ile ışıma kayıpları azalacaktır.

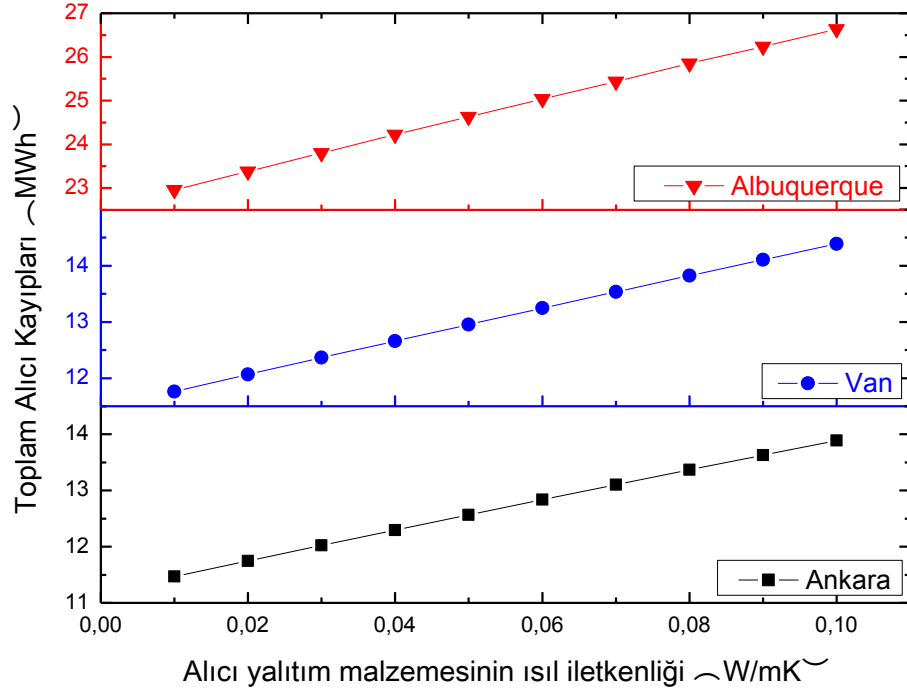


(a)

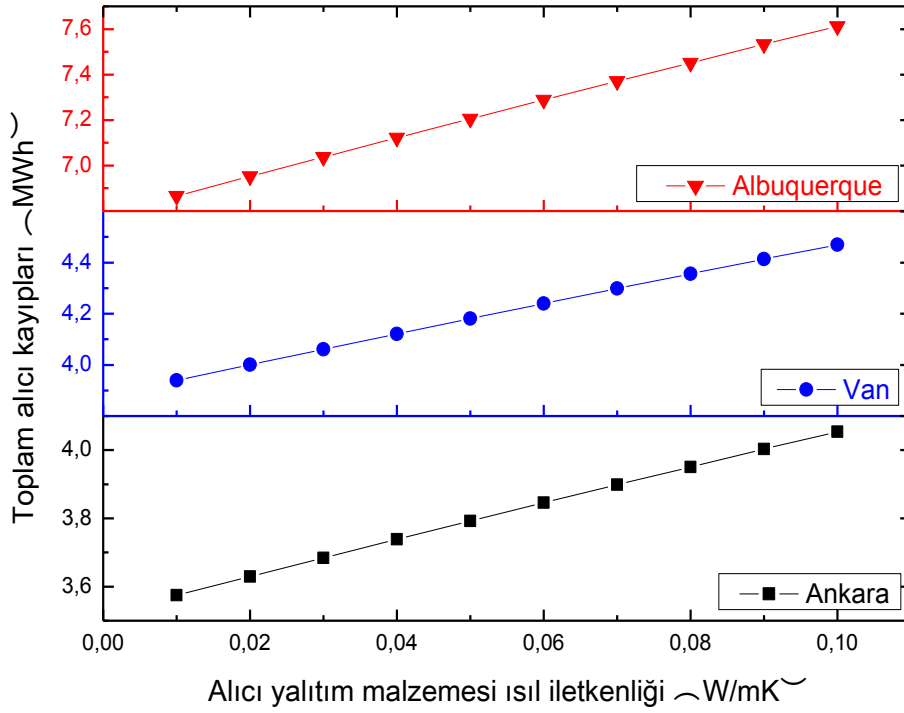


(b)

Şekil 4.7. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin alıcı yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği ile değişimi

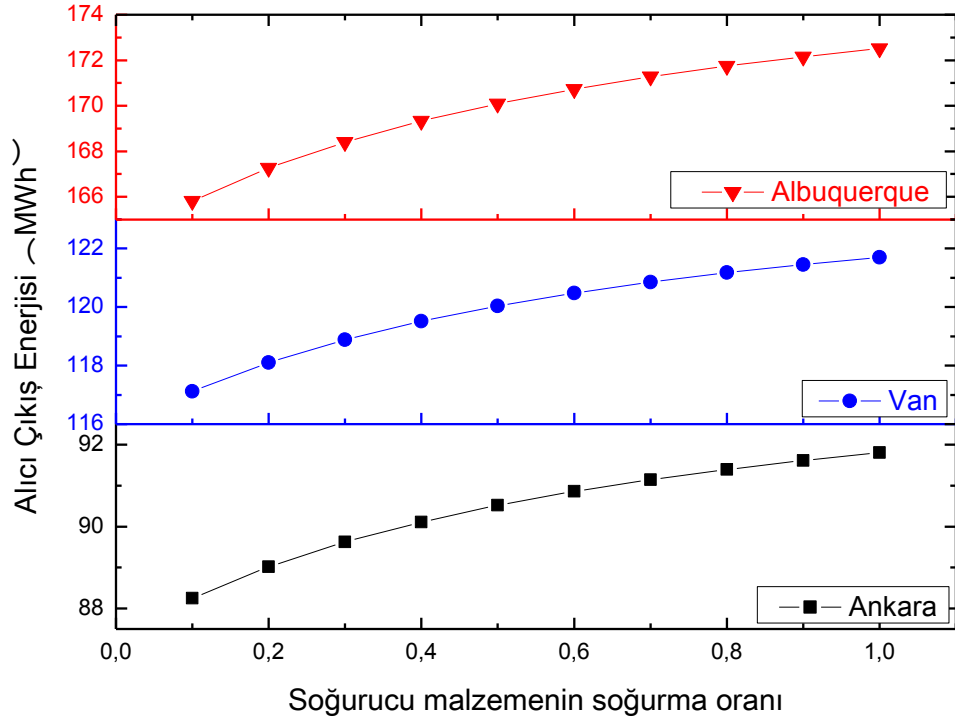


(a)

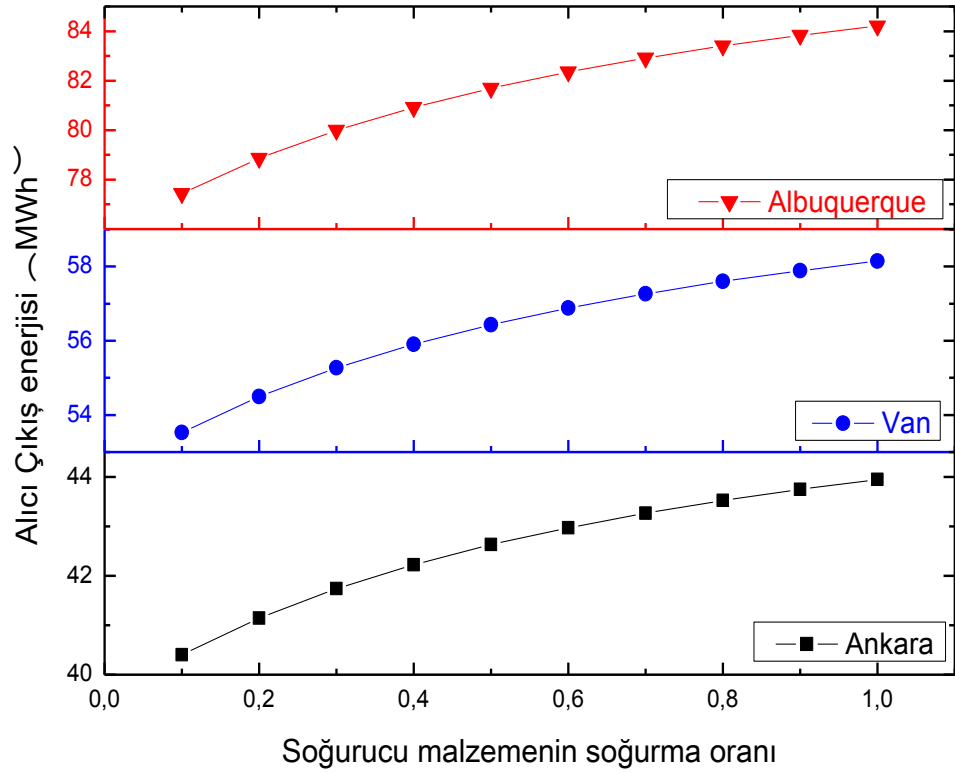


(b)

Şekil 4.8. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının alıcı yalıtım malzemesinin ısıl iletkenliği ile değişimi

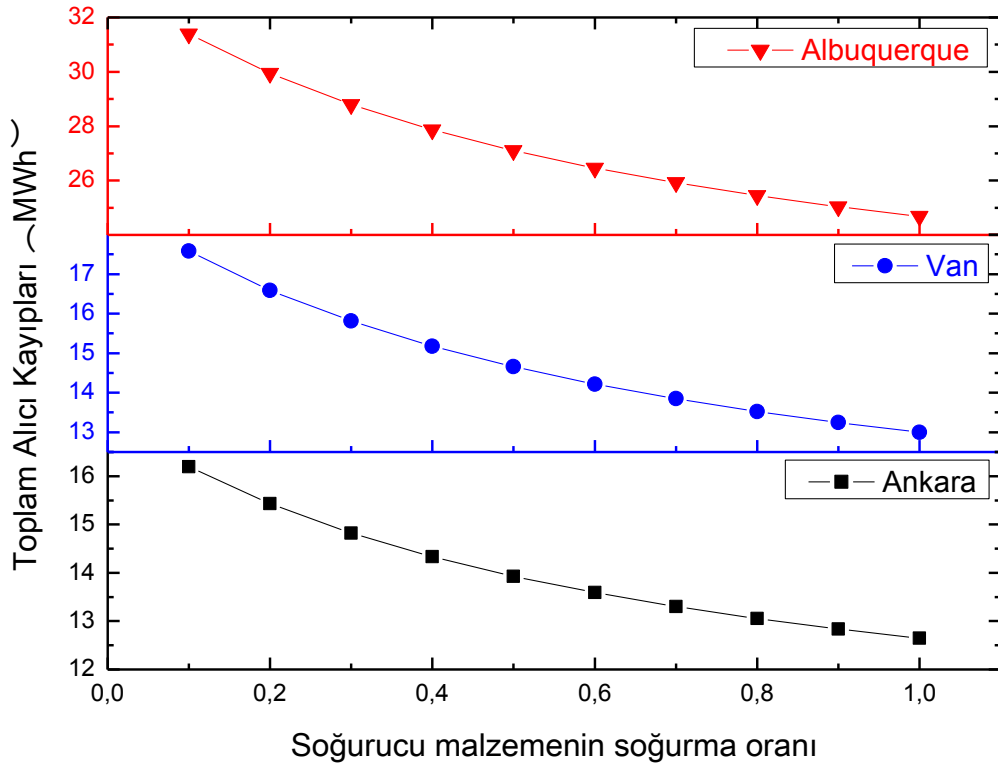


(a)

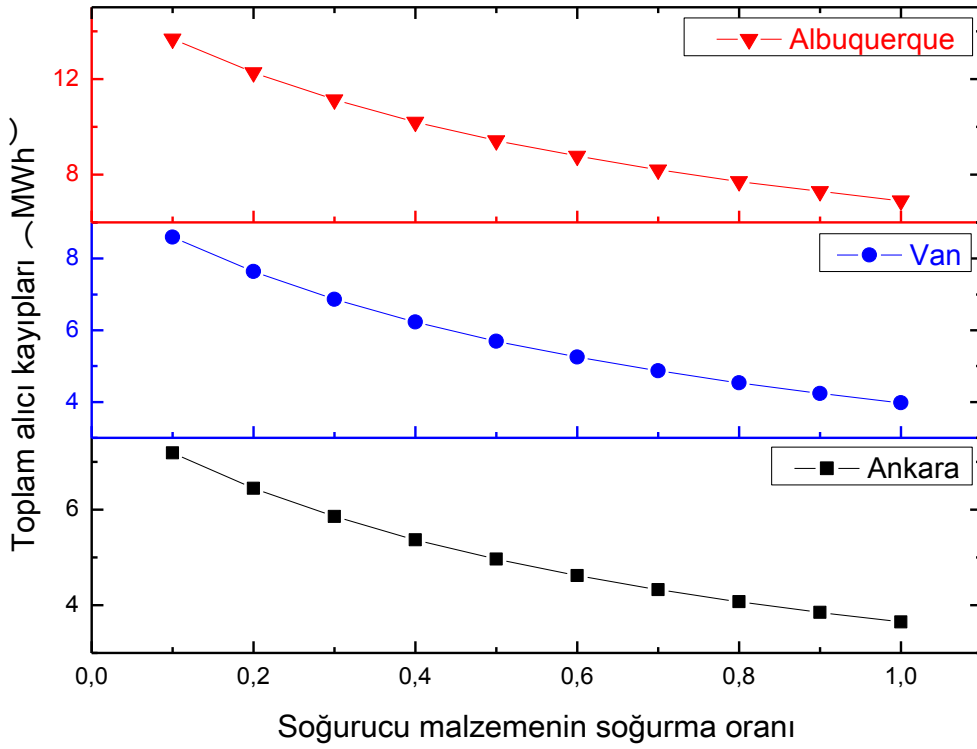


(b)

Şekil 4.9. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin soğurucu soğurma oranı ile değişimi



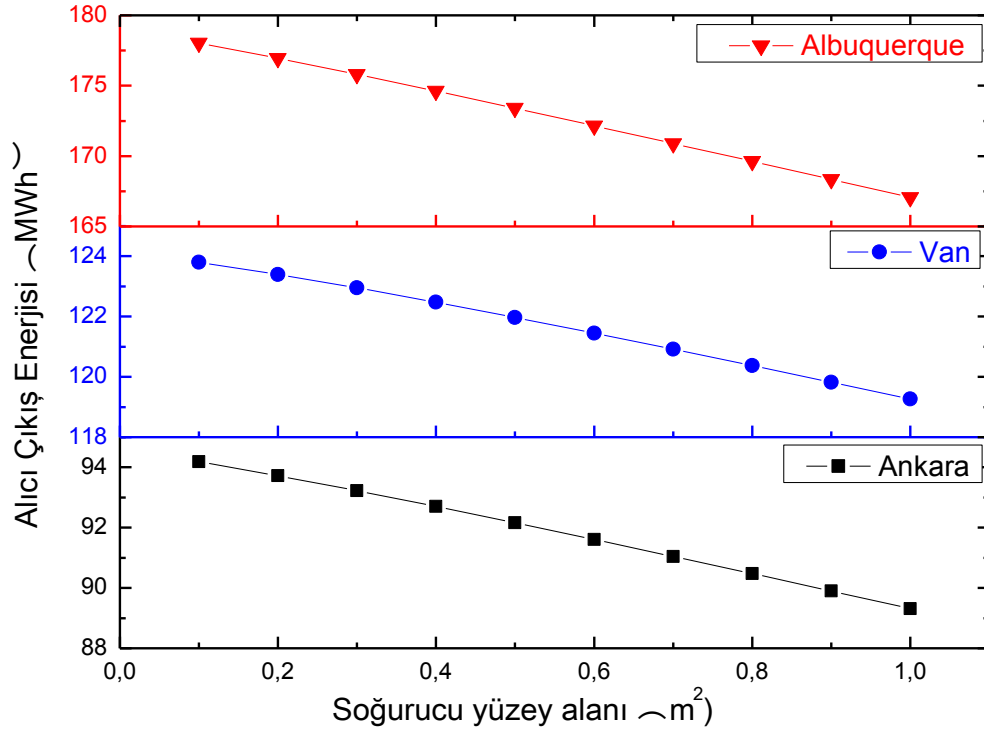
(a)



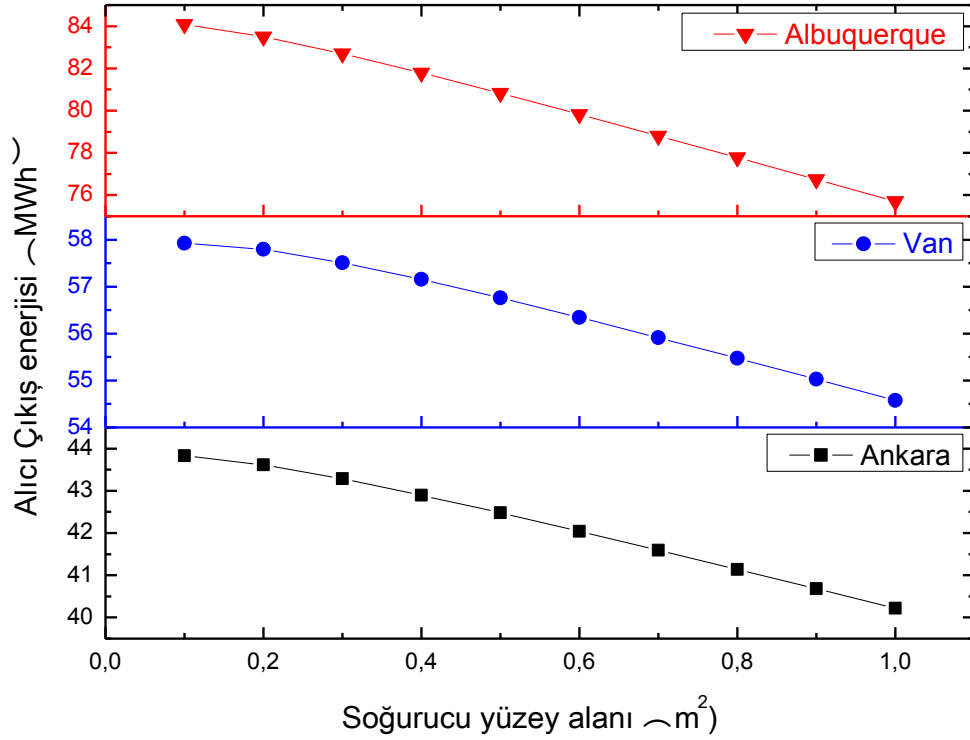
(b)

Şekil 4.10. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının soğurucu soğurma oranı ile değişimi

- **Soğurucu Yüzey Alanı;** Soğurucu yüzey alanı, SES sistemi için 0,1-1,0 m², WGA sistemi için ise 0,05-1,0 m² değerleri arasında değiştirilmiştir. Soğurucu yüzey alanının değişiminin, alıcı çıkış enerjisine ve toplam alıcı kayıplarına etkisi Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Soğurucu yüzey alanı arttıkça, alıcı çıkış enerjisinin azaldığı, toplam alıcı kayıplarının arttığı görülmektedir. SAM yazılımında, toplam kovuk yüzey alanı, soğurucu yüzey alanı ve kovuk iç yüzey alanlarının toplamı olarak tanımlandığından (Şekil 2.10), soğurucu yüzey alanı arttığında, toplam kovuk yüzey alanı artacaktır. Eş. 2.45'ten görüleceği gibi toplam kovuk yüzey alanının arttığı durumda kovuk etkin soğuruculuğu azalacak ve buna bağlı olarak Eş. 2.46'da verildiği gibi yansıma ya bağlı ışımaya yolu ile kayıplar artacaktır.
- **Kovuk Soğurma Oranı;** Kovuğun soğurma oranı her iki sistem için de 0,1-1,0 değerleri arasında değiştirilmiştir. Kovuk soğurma oranı arttığında, alıcı çıkış enerjisinde artış eğilimi, toplam alıcı kayıplarında ise azalma eğilimi olduğu görülmektedir (Şekil 4.13, Şekil 4.14). Soğurucu soğurma oranının tartışıldığı kesimde açıklandığı gibi, ortalama kovuk soğurma oranı, soğurucu soğurma oranı ve kovuk yüzey soğurma oranlarının ortalaması olacağından, kovuk soğurma oranı arttığında, ortalama kovuk soğurma oranı artar ve bu artışa bağlı olarak Eş. 2.45'ten görüleceği gibi etkin soğurma oranı artacaktır. Etkin soğurma oranının artışı da yansıma aracılığı ile ışımaya kayıplarının azalmasına neden olacaktır (Eş. 2.46).
- **Kovuğun İç Yüzey Alanı;** Kovuğun iç yüzey alanı (kovuk duvarlarının yüzey alanı), SES sistemi için 0,1-1,0 m² ve WGA sistemi için 0,05-1,0 m² aralığında değiştirilmiştir. Kovuk yüzey alanı arttıkça alıcı çıkış enerjisi azalmakta, toplam alıcı kayıplarında artış gözlenmektedir, (Şekil 4.15, Şekil 4.16). Toplam kovuk yüzey alanı, kovuk iç yüzey alanı ile soğurucu yüzey alanının toplamı olacağından, kovuk iç yüzey alanı arttığında, Eş. 2.45'te verilen etkin soğurma oranı artacak ve bunun sonucu olarak da yansımadan kaynaklanan ışımaya yolu ile kayıplar artacaktır. Toplam kovuk alanının artması sonucu Eş. 2.51'e göre taşınım yolu ile kayıplar da artacaktır.

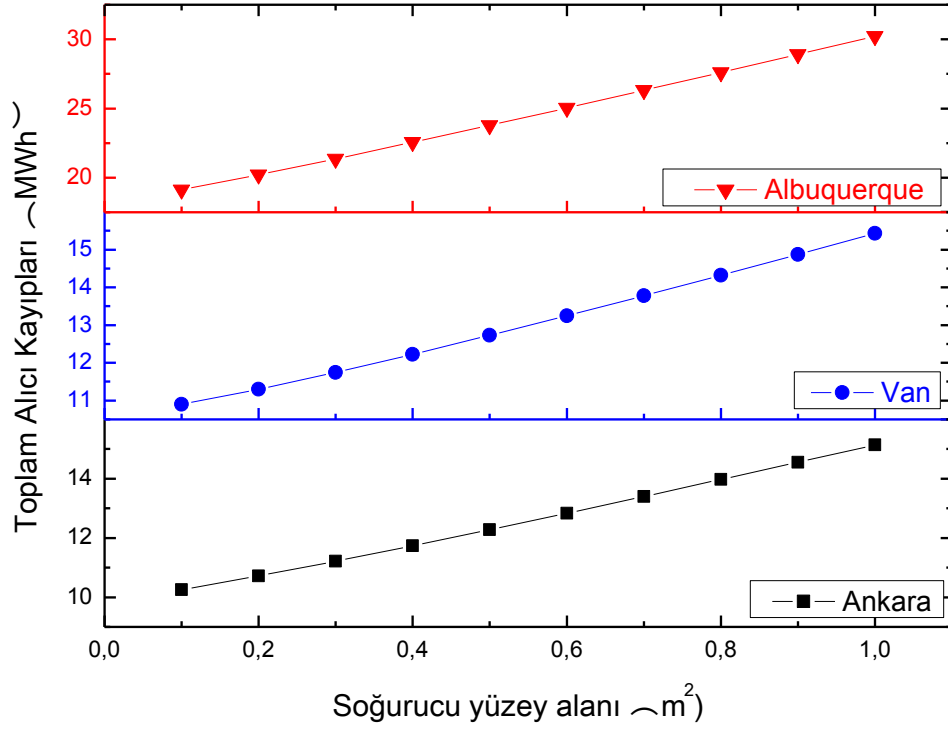


(a)

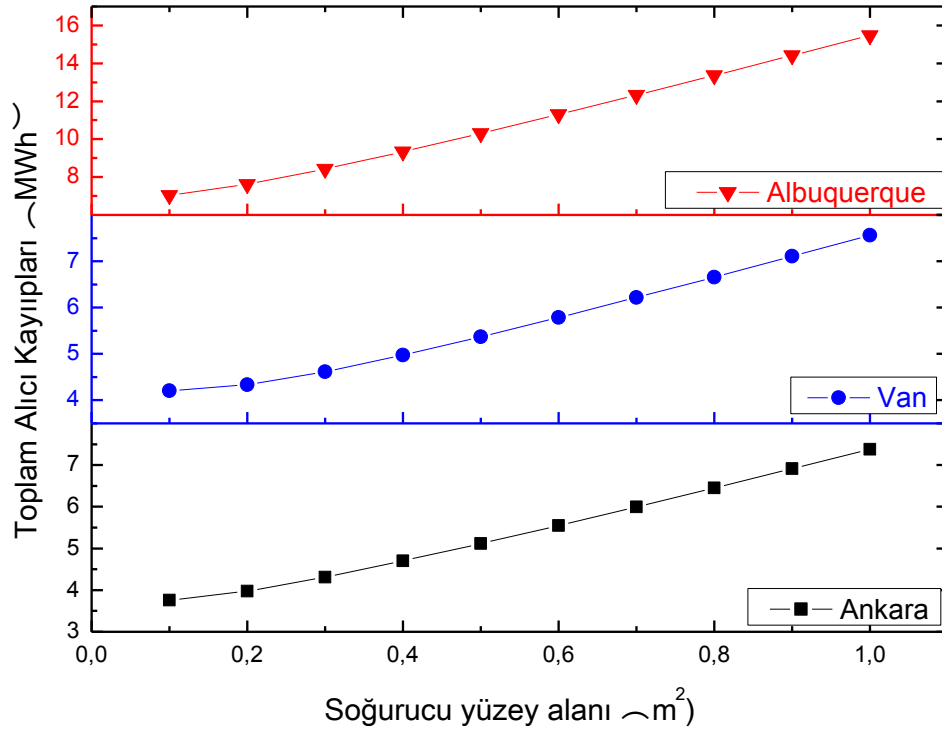


(b)

Şekil 4.11. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin soğurucu yüzey alanı ile değişimi

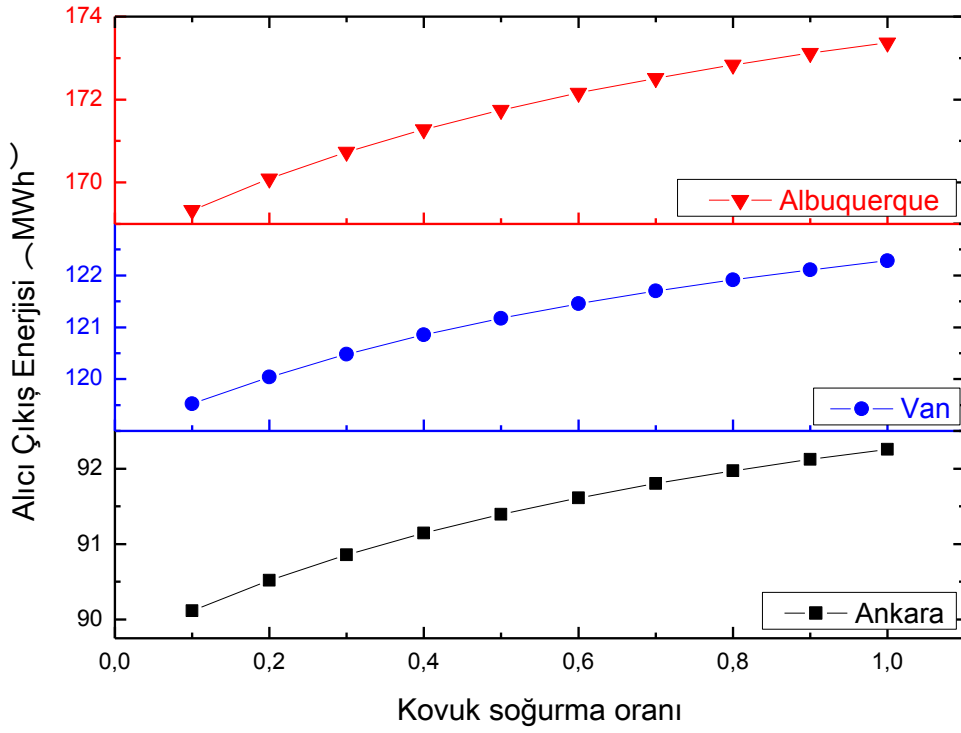


(a)

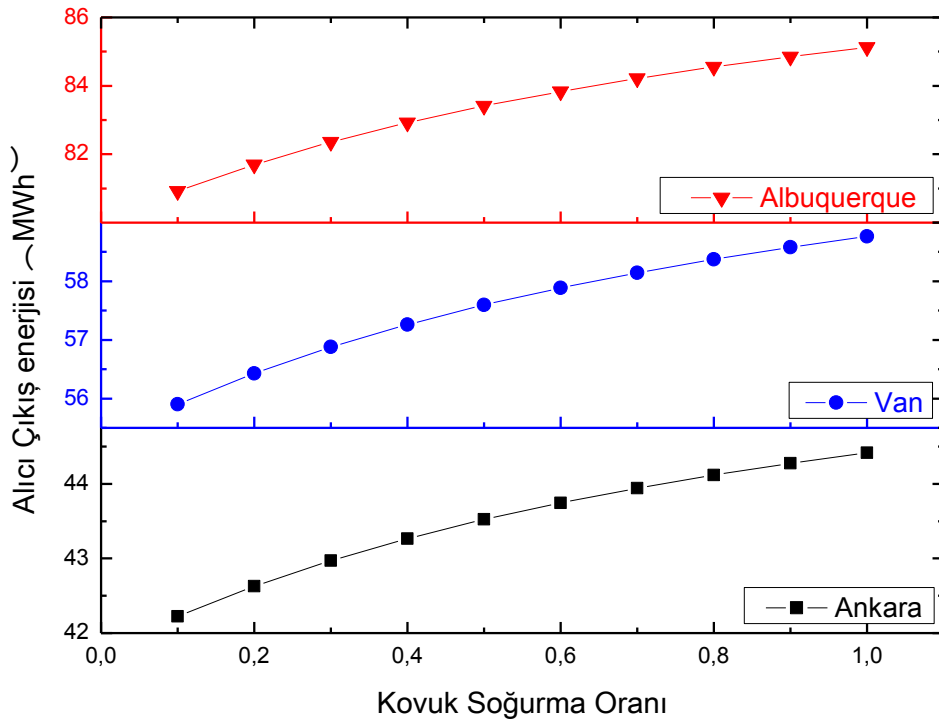


(b)

Şekil 4.12. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının soğurucu yüzey alanı ile değişimi

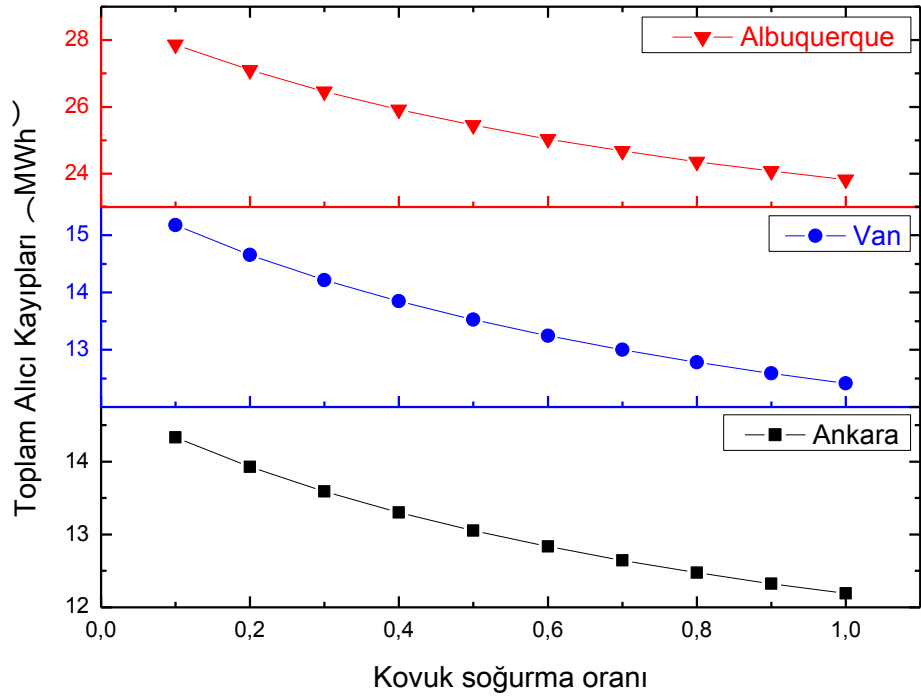


(a)

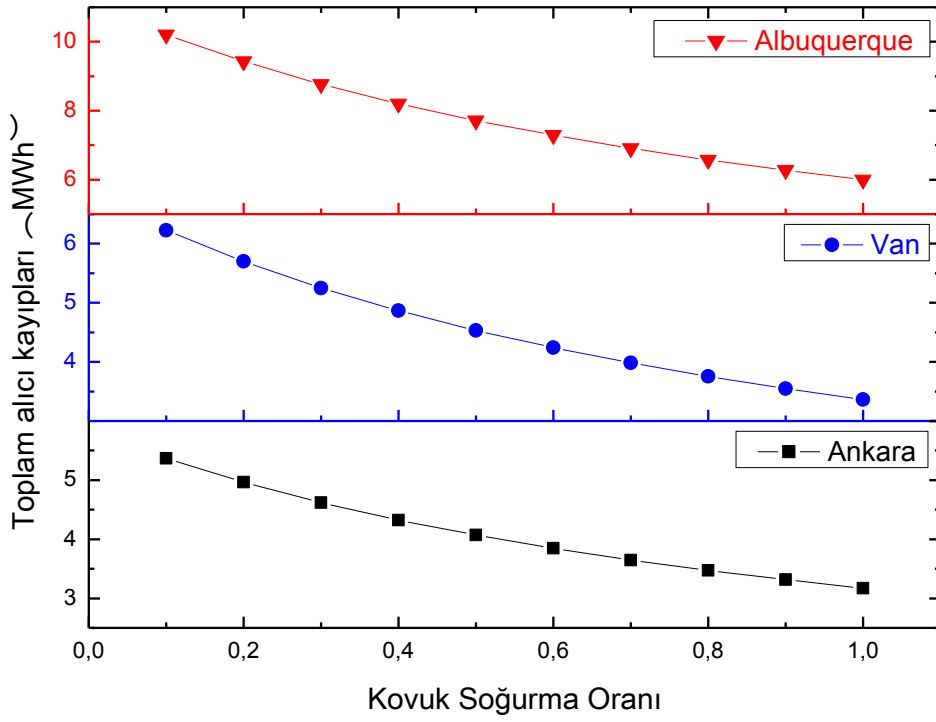


(b)

Şekil 4.13. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk soğurma oranı ile değişimi

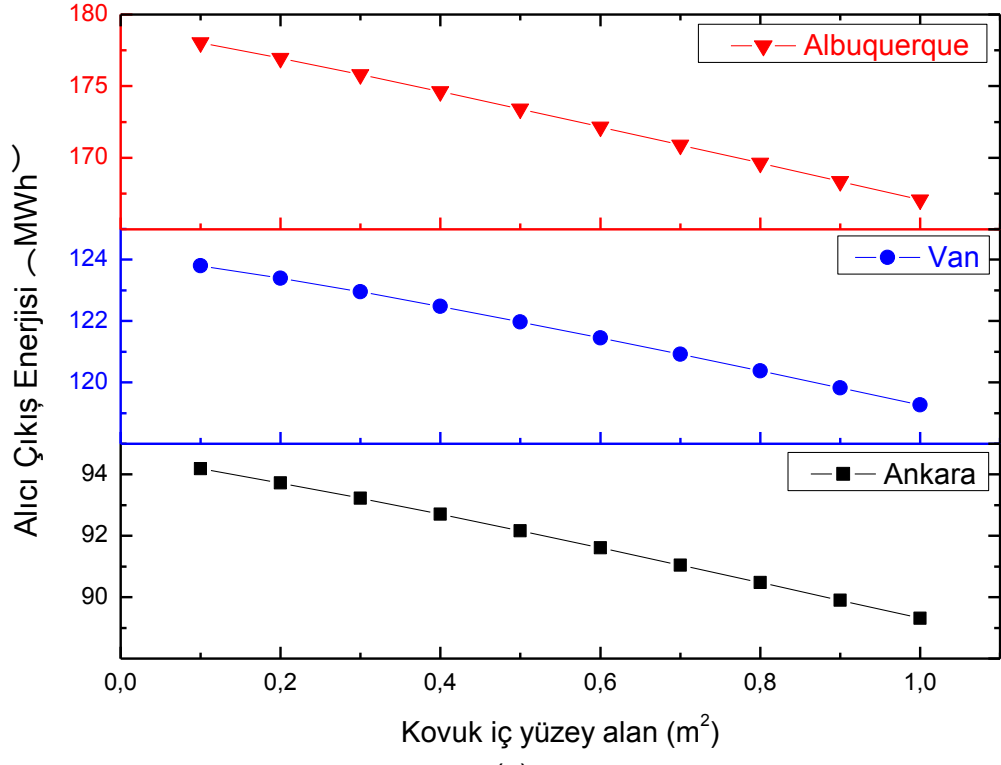


(a)

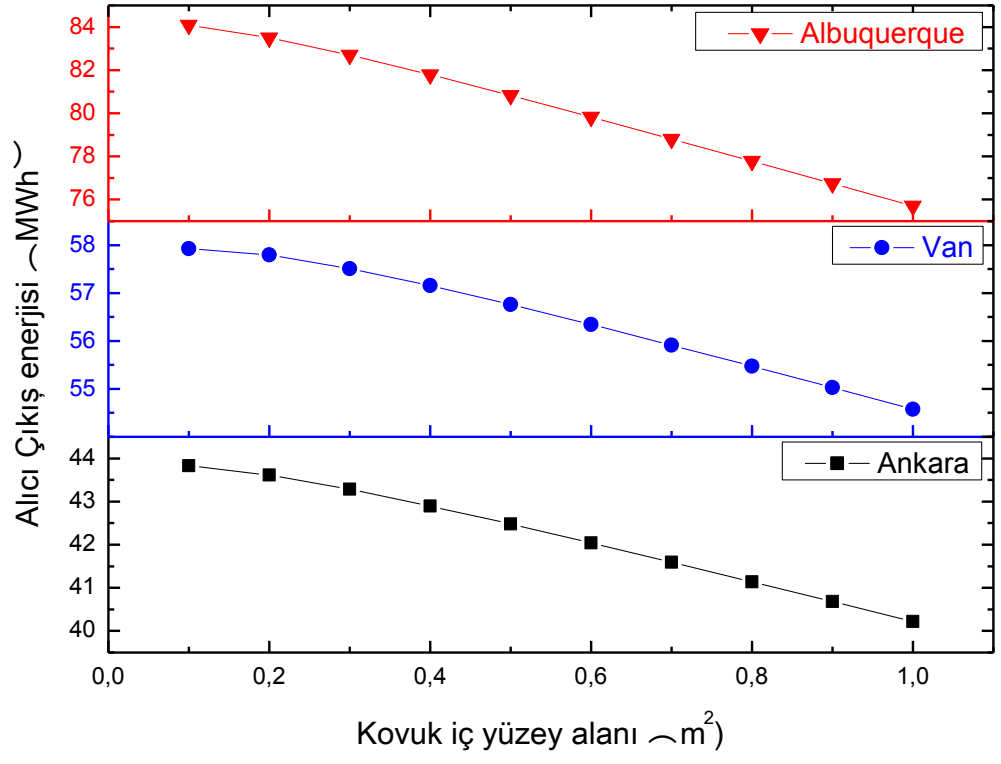


(b)

Şekil 4.14. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk soğurma oranı ile değişimi

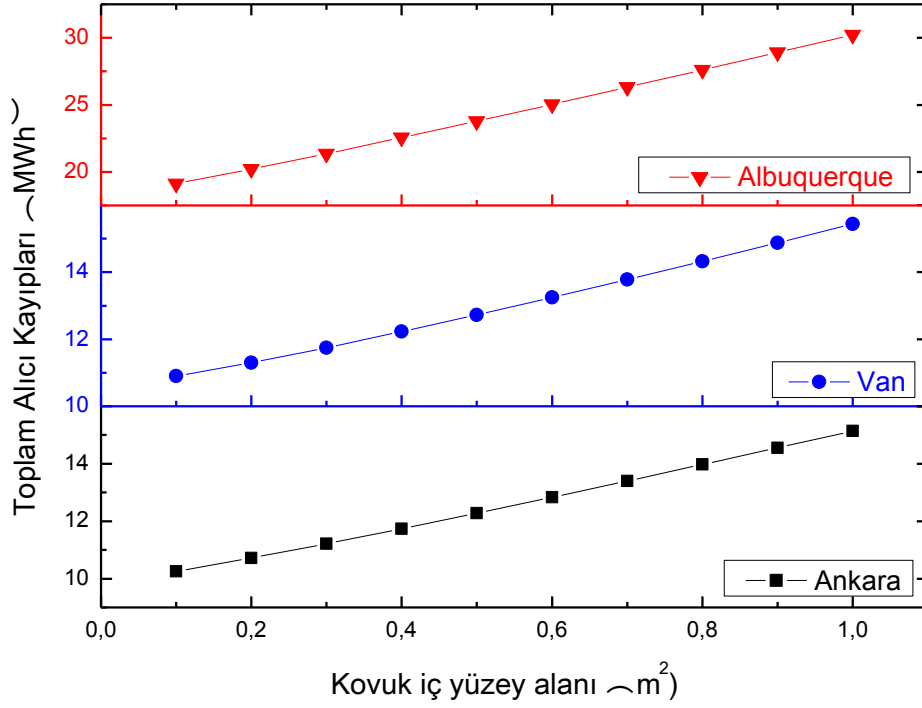


(a)

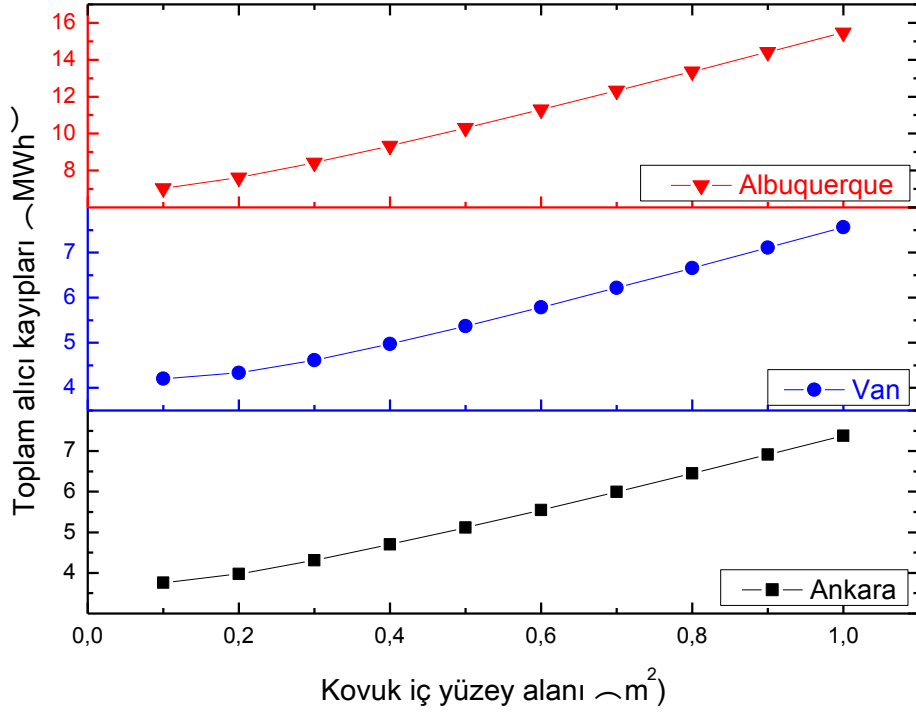


(b)

Şekil 4.15. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk iç yüzey alanı ile değişimi



(a)



(b)

Şekil 4.16. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk iç yüzey alanı ile değişimi

- **Kovuk Çapı ve Kovuk Derinliği;** Kovuk çapı, SES sistemi için 18,4-100cm, WGA sistemi için ise 14-100 cm aralığında değiştirilmiştir ve bu değişimin alıcı çıkış enerjisine ve ısı kayıplara olan etkileri incelenmiştir. Kovuk çapı minimum değerlerinin SES sistemi için 18,4 cm ve WGA için 14 cm seçilmesinin nedeni, alıcı açıklık çaplarının bu değerlerde olmasıdır. Kovuk iç çapı arttığında alıcı çıkış gücü artmakta (Şekil 4.17) ve kayıplar azalmaktadır (Şekil 4.18). Kovuk iç çapının artması, toplam kovuk alanının artmasına neden olacak, bu artış kavitenin etkin soğuruculuğunu arttıracak ve dolayısı ile yansıma ile ışıma kayıpları azalacaktır. Kovuk çapı arttığında Eş. 2.49'da bulunan Nusselt sayısı azalacak, Eş. 2.50'de verilen taşınım katsayısı azalacak, buna bağlı olarak 2.51'e bakıldığında taşınım yolu ile kayıplar da azalacaktır.

Diğer bir alıcı parametresi olan kovuk derinliği, SES ve WGA sistemleri için 0,1-1 m aralığında değiştirilmiş ve bu değişimin alıcı çıkış enerjisini ve alıcı kayıplarını nasıl etkileyeceği incelenmiş, ancak bir değişim gözlenmemiştir.

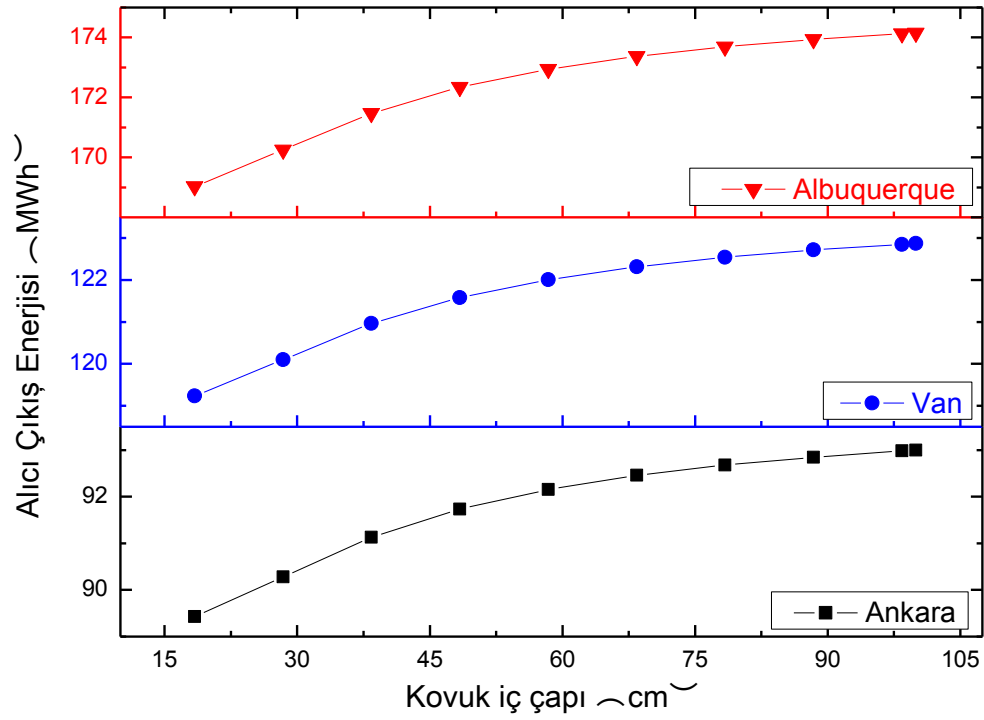
4.1.3. Parasitics

Parasitics parametreleri ile ilgili olarak Şekil 3.12'de verilen ekran görüntüsündeki parametrelerden

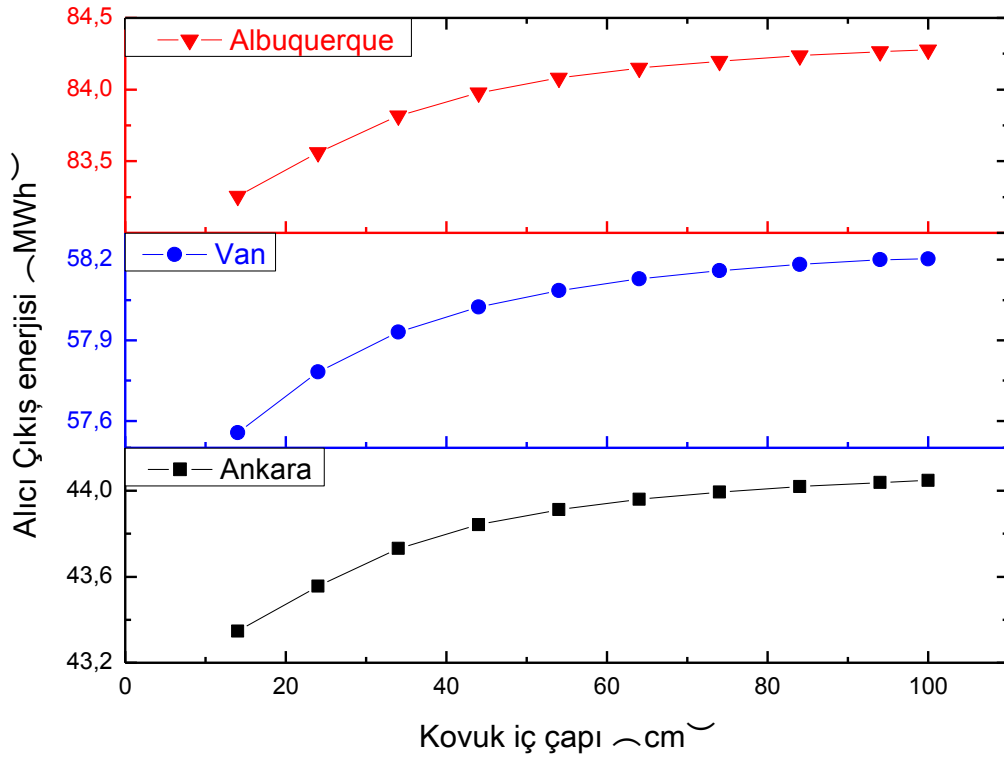
- soğutma sistemi pompa hızı
- soğutma sistemi akışkan türü
- soğutma sistemi fan hızı

değiştirilerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer parametreler programda varsayılan değerler sabit tutulmuştur.

- **Soğutma sistemi pompa hızı;** soğutma sistemi pompa hızı, SES ve WGA sistemleri için ise 1000-3000 dev/dak değerleri aralığında değiştirilip parametrik simülasyon yapılmış ve her bir yerleşim bölgesi için optimum pompa hızları elde edilmiştir. Elde edilen optimum pompa hızları ve hem bu optimum hızlar hem de SAM yazılımının kütüphanesinde her iki sistem için varsayılan değer olan 1800 dev/dak pompa hız değeri kullanıldığında bulunan net sistem çıkış enerjileri ve enerjideki yüzde değişimler SES ve WGA sistemleri için sırası ile Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

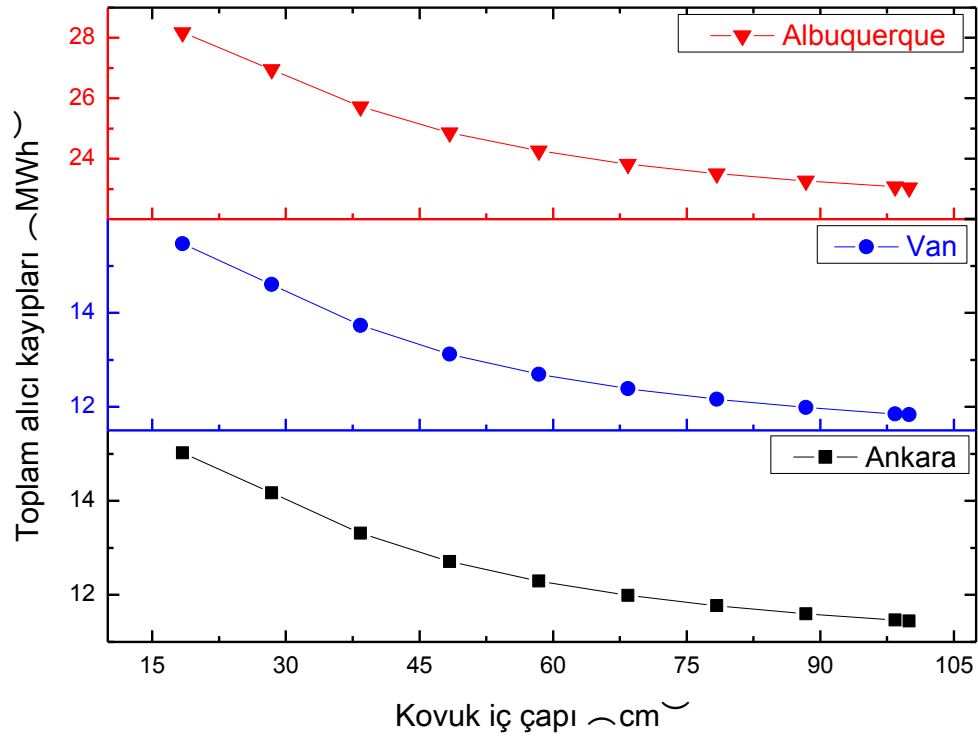


(a)

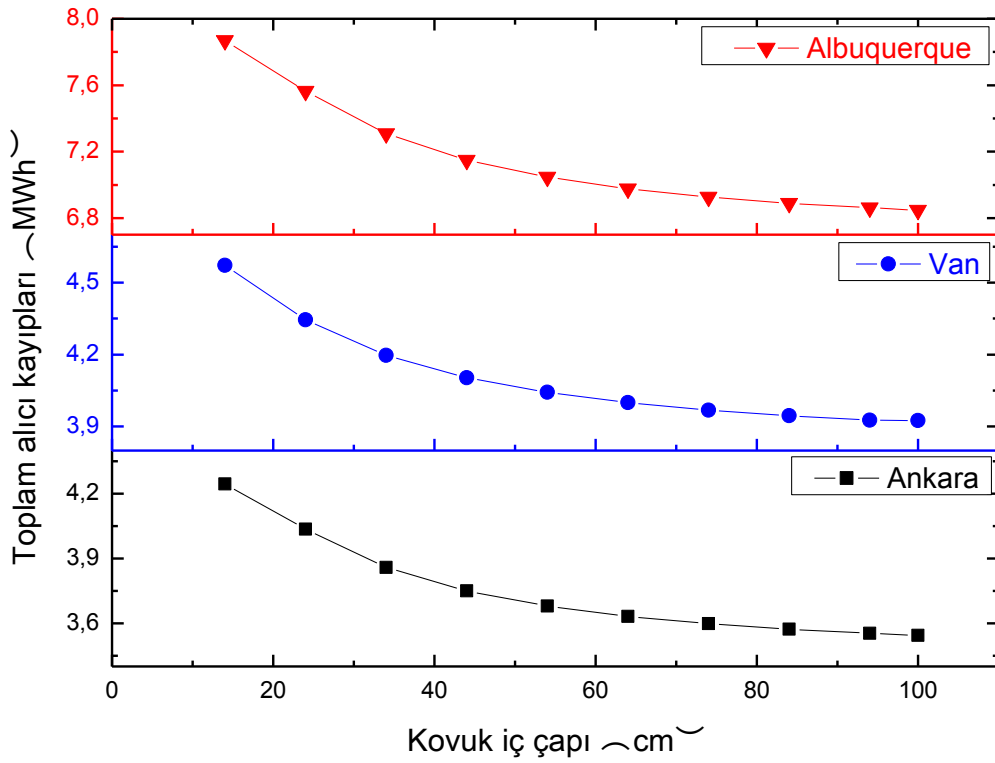


(b)

Şekil 4.17. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için alıcı çıkış enerjisinin kovuk çapı ile değişimi



(a)



(b)

Şekil 4.18. SES (a) ve WGA (b) sistemleri için toplam alıcı kayıplarının kovuk çapı ile değişimi

Çizelge 4.1. SES sistemi için yerleşime bölgesine bağlı optimum pompa hızları ve varsayılan pompa hızlarına göre yüzde değişimler

	Optimum Pompa Hızı dev/dak	Net Enerji (kWh/yıl)		% değişim
		Pompa hızı 1800 dev/dak seçildiğinde	Pompa hızının optimum değeri alındığında	
Albuquerque	2400	50511	50836	0,64
Van	2400	34349	34563	0,62
Ankara	2200	26483	26549	0,25

Çizelge 4.2. WGA sistemi için yerleşime bölgesine bağlı optimum pompa hızları ve varsayılan pompa hızlarına göre yüzde değişimler

	Optimum Pompa Hızı dev/dak	Net Enerji (kWh/yıl)		% değişim
		Pompa hızı 1800 dev/dak seçildiğinde	Pompa hızının optimum değeri alındığında	
Albuquerque	1700	18556	18560	0,02
Van	1700	12311	12314	0,02
Ankara	1500	9097	9114	0,19

Optimum pompa hızları yerleşim bölgesine ve sisteme bağlı olarak, SES sistemi için 2200 ve 2400 dev/dak, WGA sistemi için ise 1500 ve 1700 dev/dak olarak bulunmuştur. Bulunan optimum pompa hız değerleri, SES sistemi için SAM yazılımında verilen 1800 dev/dak değerinden büyük, WGA sistemi için ise küçük çıkmasına karşın, elde edilen optimum enerjinin 1800 dev/dak'daki enerji değerine göre yüzde değişimine bakıldığında çıkış enerjisi açısından etkin bir parametre olmadığı görülmektedir.

- **Soğutma sistemi akışkan türü;** SAM yazılımında soğutma sisteminde kullanılan akışkan seçenekleri
 - su,
 - %50 Etilen Glikol (**%50EG**),
 - %40 Etilen Glikol (**%40EG**),
 - %25 Etilen Glikol (**%25EG**)
 - %40 Propilen Glikol (**%40PG**) dür. Yüzdeler hacimseldir.

SAM yazılımının kütüphanesindeki varsayılan akışkan türü %50 Etilen Glikoldür. Soğutma sistemi pompa hızı bölümünde yapılan incelemeye benzer olarak soğutma akışkan türü soğutma sistemi akışkan türü her iki sistem ve tüm yerleşimler için değiştirilmiş ve yıllık sistem enerji çıktısına ve varsayılan akışkan türü seçildiği duruma göre enerjilerin yüzde değişimi Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelgelerden görüldüğü gibi, her iki sistem için de en büyük değişim %0,11 - %0.15'lik artışla soğutma sistemi çalışma akışkanı olarak suyun seçildiği durumda elde edilmiştir.

Etilen glikolün su ile karıştırılması ile hacimsel olarak farklı oranlarda elde edilen %50, %40 ve %25'lik Etilen için sırası ile -37°C, -25°C ve -12°C'dir. %40'lık propilen glikol ise -22°C'de donmaktadır. Bu nedenle donma sorunu olmayan bölgelerde %40 veya %25'lik etilen glikol çözeltilerini kullanmak çıkış enerjisi açısından avantaj sağlayabilir [40].

Çizelge 4.3. SES sistemi için yerleşime bölgesine bağlı farklı soğutma sistemi akışkan türlerine göre sistem enerji çıktıları ve %50EG baz alınarak yüzde değişimler

Soğutma Çevrimi Akışkanı	Albuquerque		Van		Ankara	
	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim
Su	50589	+0,15	34397	+0,14	26520	+0,14
%50EG	50511	+0,00	34349	+0,00	26483	+0,00
%40EG	50572	+0,12	34386	+0,11	26510	+0,10
%25EG	50564	+0,10	34380	+0,10	26507	+0,10
%40PG	50520	+0,02	34350	+0,00	26485	+0,01

Çizelge 4.4 WGA sistemi için yerleşime bölgesine bağlı farklı soğutma sistemi akışkan türlerine göre sistem enerji çıktıları ve %50EG baz alınarak yüzde değişimler

Soğutma Çevrimi Akışkanı	Albuquerque		Van		Ankara	
	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim	Net Enerji (kWh/yıl)	% değişim
Su	18577	+0,11	12326	+0,12	9108	+0,12
%50EG	18556	+0,00	12311	+0,00	9097	+0,00
%40EG	18568	+0,06	12320	+0,07	9103	+0,07
%25EG	18567	+0,06	12319	+0,06	9102	+0,05
%40PG	18553	-0,02	12310	-0,01	9095	-0,02

- **Soğutma sistemi fan hızı;** SES ve WGA sistemleri için soğutma sistemi fan hızı 890 dev/dak'dır. Soğutma sistemi fan hızının optimum değerini elde etmek için, fan hızı 400-890 dev/dak değerleri aralığında değiştirilip parametrik simülasyon yapılmış ve her bir yerleşim bölgesi için optimum fan hızları elde edilmiştir. Elde edilen optimum fan hızları ve sistemlerin fan hızları olan 890 dev/dak değeri kullanılarak bulunan net sistem çıkış enerjileri ve enerjideki yüzde değişimler SES ve WGA sistemleri için sırası ile Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. SES sistemi için yerleşim bölgesine bağlı olarak soğutma sistemi fan hızlarına göre sistem enerji çıktıları ve yüzde değişimler

	Optimum Fan Hızı dev/dak	Net Enerji (kWh/yıl)		% değişim
		Fan hızı 890 dev/dak seçildiğinde	Fan hızının optimum değeri alındığında	
Albuquerque	550	49135	50548	2,88
Van	550	33399	34347	2,83
Ankara	450	25316	26589	5,03

Çizelge 4.6. WGA sistemi için yerleşim bölgesine bağlı olarak soğutma sistemi fan hızlarına göre sistem enerji çıktıları ve yüzde değişimler

	Optimum Fan Hızı dev/dak	Net Enerji (kWh/yıl)		% değişim
		Fan hızı 890 dev/dak seçildiğinde	Fan hızının optimum değeri alındığında	
Albuquerque	550	18007	18574	3,15
Van	550	11941	12316	3,14
Ankara	450	8645	9136	5,68

Sistemler optimum fan hızı değerlerinde çalıştırılıyorsa, çıkış enerjileri, SES ve WGA sistemleri için yerleşim bölgesine göre %3 ile %5 arasında değişiklik gösterebileceği Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Yukarıda yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, elde edilen değerlerden SES ve WGA sistemlerinde, bazı parametrelerin optimum değerlerde olmadığı ve bu parametrelerin optimum değerlerinin kullanılması halinde sistem enerji çıktısında artış olabileceği gözlenmiştir. Bu nedenle, Çizelge 4.7’de SES ve WGA sistemleri için kullanılan parametreler ve bu parametrelerin olması gereken optimum değerleri belirtilmiştir. Kesim 4.2.2’de sistem çıktıları incelenirken, bu çizelgedeki optimum değerler göz önüne alınarak oluşturulan sistemlerin incelenmesi yapılmıştır. Soğutma sistemi fan ve pompa hızları yerleşim bölgelerine göre değişiklik gösterdiğinden sistem hangi yerleşim bölgesinde modelleniyorsa, fan ve pompa hızları yerine uygun değer yerleştirilmiştir.

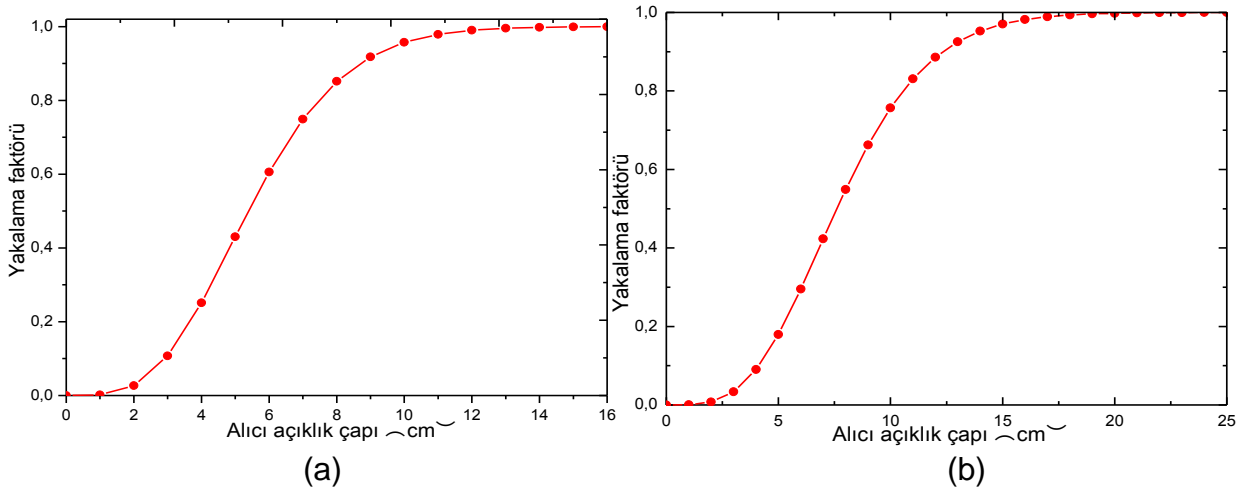
Çizelge 4.7. SES ve WGA sistemleri için belirlenen parametrelerin yazılımda varsayılan değerleri ve modelleme ile bulunan değerlerinin karşılaştırılması

Parametre	SES		WGA	
	Mevcut sistem değeri	Modellemeden çıkan optimum değer	Mevcut sistem değeri	Modellemeden çıkan optimum değer
Alıcı açıklık çapı	18,4 cm	16,8 cm	14 cm	12,3 cm
Alıcı yalıtım kalınlığı	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm
Soğutma Sistemi fan hızı	890 dev/dak	450 dev/dak 550 dev/dak	890 dev/dak	450 dev/dak 550 dev/dak
Soğutma Sistemi pompa hızı	1800 dev/dak	2200 dev/dak 2400 dev/dak	1800 dev/dak	1500 dev/dak 1700 dev/dak

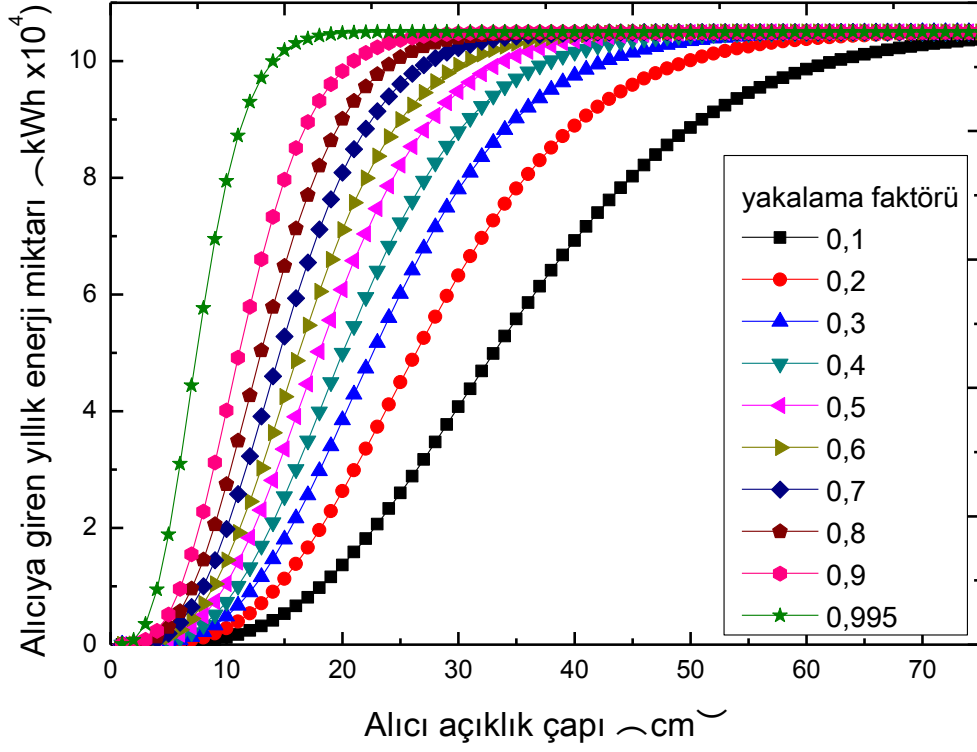
Alıcı açıklık çapı için elde edilen optimum değerlere farklı bir açıdan yaklaşmak için Şekil 4.19’da SAM yazılımı yardımıyla yakalama faktörü, alıcı açıklık çapının fonksiyonu olarak çizilmiştir. Yakalama faktörü, parabolik çanaktan yansıyarak gelen enerjinin, alıcı açıklığından giren enerjiye oranıdır. Şekil 4.19.a’da WGA sistemi için verilen yakalama faktörü-alıcı açıklık çapı grafiğinde alıcı açıklık çapı değeri 12,3cm ve üzerinde olduğunda yakalama faktörü de maksimum değerine ulaşmaktadır. Benzer olarak Şekil 4.19.b ’de SES sistemi için alıcı açıklık çapının

16,8 cm ve üzerindeki değerlerinde, yakalama faktörü maksimum değerine ulaşmaktadır. Yakalama faktörü ve alıcı açıklık çapı arasındaki bu ilişki, alıcı açıklığı boyutlandırmasında dikkat edilmesi gereken noktalardan birisidir.

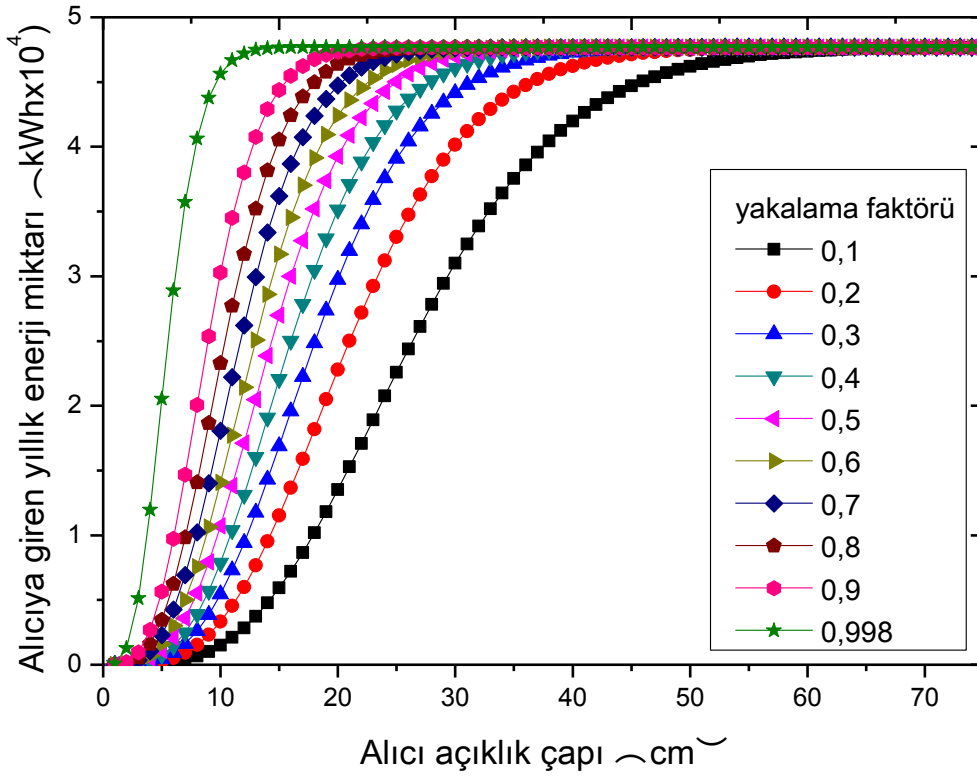
Şekil 20’de farklı yakalama faktörü değerleri için alıcı açıklık çaplarına karşılık alıcıya giren yıllık toplam enerji miktarları verilmiştir. Alıcıya giren enerji miktarının belirli bir büyüklüğü düşünülduğünde; yakalama faktörünün küçük değerlerindeki alıcı açıklık çapı, yakalama faktörünün büyük olduğu değerler ile kıyaslandığında daha büyük olmaktadır. Bu grafikler aynı zamanda farklı yakalama faktörleri için optimum alıcı açıklığı boyutu hakkında da bilgi vermektedir. Şekil 4.20 farklı bir şekilde yorumlanmak istenirse, alıcı açıklık çapının artmasıyla artış gösteren alıcıya giren enerji miktarı, belirli bir değer üzerinde sabit olma eğilimindedir. Bu sabit plato bölgesine ulaşılan alıcı açıklık çapı değeri, azalan yakalama faktörü değerleri ile artış göstermektedir.



Şekil 4.19. (a) SES ve (b) WGA sistemleri için yakalama faktörünün alıcı açıklık çapı ile değişimi



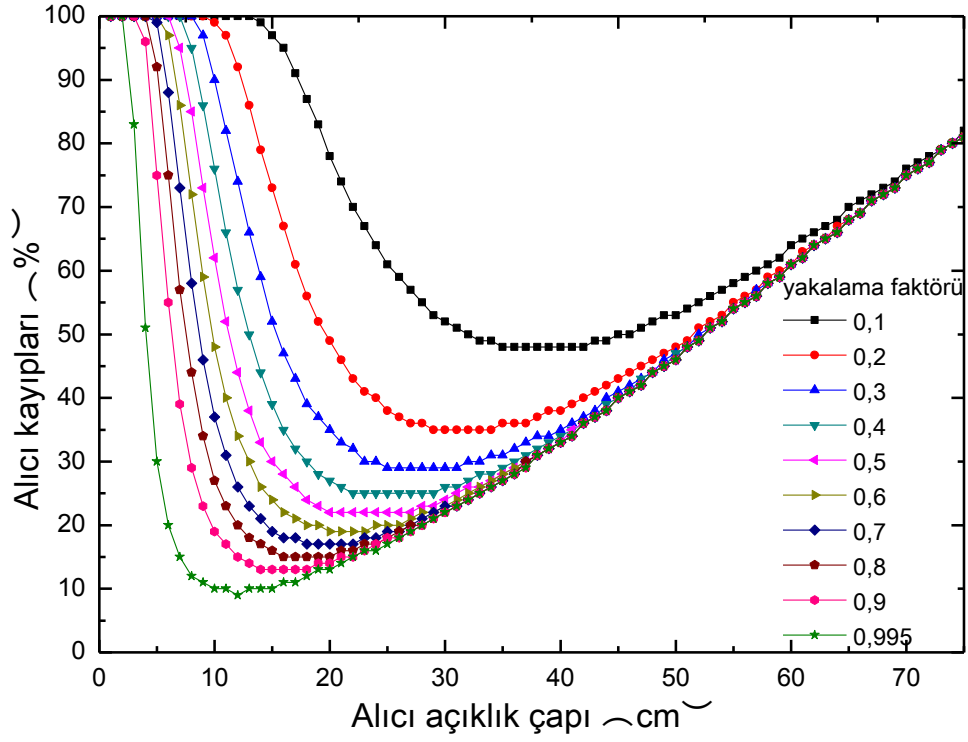
(a)



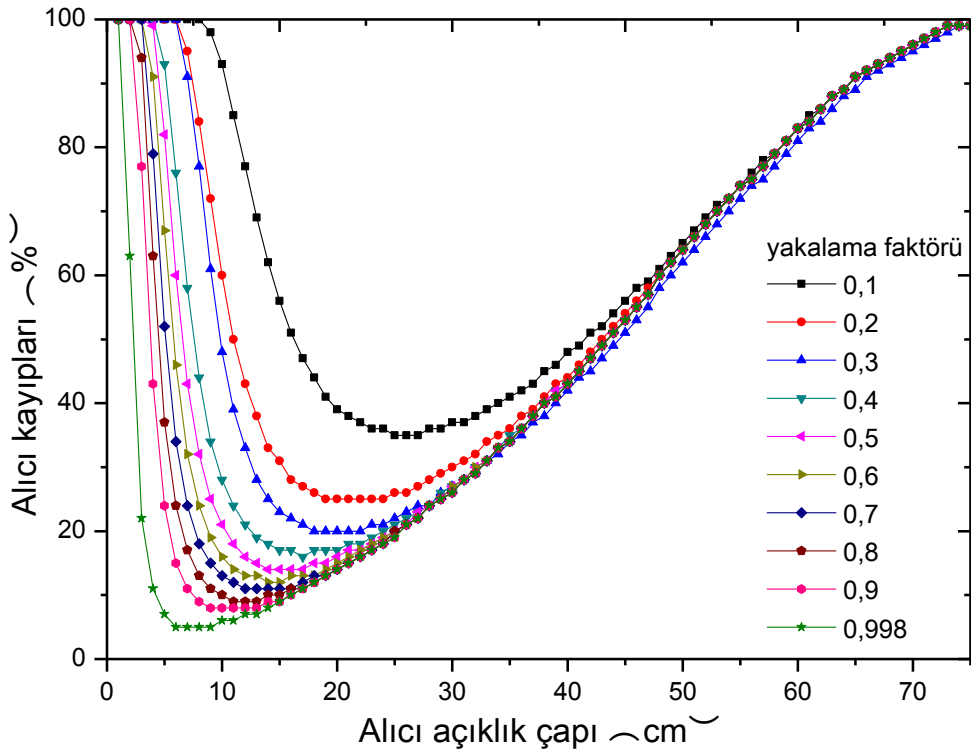
(b)

Şekil 4.20. (a) SES ve (b) WGA sistemlerinde farklı yakalama faktörü değerleri için alıcıya giren yıllık enerji miktarının alıcı açıklık çapına göre değişimi

Şekil 4.21’de farklı yakalama faktörü değerleri için alıcı kayıp yüzdelerinin, alıcı açıklık çaplarına göre değişimi görülmektedir. Bu şekil, alıcı açıklık çapı boyutlandırmasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir noktayı vurgulamaktadır. Alıcı açıklık çapı arttıkça, alıcı kayıplarının bir minimumdan geçtiği gözlenmektedir. Alıcı açıklık çapı çok küçük olduğunda parabolik çanaktan gelen ışınımın büyük bir miktarı yakalanamayacağından kayıp fazla olacaktır. Çok büyük olduğu durumda ise yüzey büyüdüğü için iletim, taşınım ve ışıma ile meydana gelen ısı kayıpları artacaktır. Yakalama faktörü arttıkça, alıcı kayıplarının bu minimum noktaları, düşük alıcı açıklık değerlerine doğru kaymaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.21. (a) SES ve (b) WGA sistemlerinde farklı yakalama faktörü değerleri için alıcı kayıpları yüzdesinin alıcı açıklık çapına göre değişimi.

4.2. SES Ve WGA Sistemlerini Kullanarak Farklı Yerleşim Düzenlenimleri İçin Sistem Tasarımı

Bir güneş tarlasında, yerleştirilecek çanakların kuzey-güney ve doğu-batı doğrultusundaki yerleşim planları, gölgelenme etkisi açısından önemlidir ve sistem performansını etkilemektedir. EK-2'de görüldüğü gibi, SAM yazılımında varsayılan değer olarak, SES sistemlerinden oluşacak bir güneş tarlası, kuzey-güney hattında 50, doğu-batı hattında 80 adet çanak olmak üzere toplam 4000 çanaklı, 100 MW'lık bir sistem şeklinde ele alınmıştır. Benzer şekilde WGA sistemi de 4000 çanak içeren 40 MW'lık bir sistem olarak düşünülmüştür. Bu çalışmada kolaylık olması açısından çıkış gücü 600 kW olan SES ve WGA sistemleri için, öncelikle yazılımdaki varsayılan parametrik değerler kullanılarak yerleşim planlaması yapılmış, daha sonra kesim 4.1'de gerçekleştirilen parametrik analiz sonucu bulunan optimum değerler ile sistem çıktılarının analizi yapılmıştır.

4.2.1. Güneş Tarlası Yerleşim Planlaması

600 kW'lık bir sistem oluşturabilmek için; 25 kW'lık SES sistemlerinden 24 tane, 10 kW'lık WGA sistemlerinden ise 60 tane gereklidir. Yerleşime karar verebilmek için, öncelikle kuzey-güney ve doğu-batı hatlarına yerleştirilecek olan sistem sayıları belirlenmiştir. Yerleşim planlaması yapılırken kuzey-güney ve doğu-batı hattına yerleşecek sistemlerin iki çanak merkezi arası uzaklık 15 m olarak alınmıştır. Oluşturulacak 600 kW'lık güç sistemlerinin yıllık enerji çıktılarına ve kapasite faktörlerine bakılarak kuzey-güney ve doğu batı hatlarına yerleştirilecek sistemlerin sayıları belirlenmiştir. Çizelge 4.8'de SES sistemi için, Çizelge 4.9'da ise WGA sistemi için simülasyonu yapılan farklı seçenekler ve her bir seçenek için yıllık enerji çıktısı, kapasite faktörü görülmektedir. Kapasite faktörü sistemin çıkış gücünün sistemin çalışması için tasarlandığı güce oranıdır. Bir sistemin kapasite faktörünün %30 olması, sistemin güç biriminde tasarlanan güç miktarının uzun dönem ortalamasının %30'u oranında elektriksel enerjisi çıktısı olduğunu göstermektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi, kuzey-güney hattındaki sisten sayısı arttıkça, doğu-batı hattındaki sistem sayısı azaldıkça, sistem çıktısı artmaktadır. Igo ve Andraka [41] tarafından yapılan modelleme çalışması sonucunda, küçük çaplı sistemler için çanakların tümünün kuzey-güney hattına uygun aralıklarla yerleştirilmesinin Aralık ayı öğle saati gölgelenmesini önleyeceğini belirtilmektedir. Bu gözlem Çizelge 4.8

ve Çizelge 4.9'da verilen bu çalışma sonuçlarını desteklemektedir. Ancak bu yerleşim şekli, arazilerin uygun kullanımı, kablolama maliyetlerinin artması ve rüzgar

Çizelge 4.8. SES Sistemleri ile oluşturulacak 600 kW'lık güç sisteminin kuzey-güney ve doğu-batı yerleşim seçenekleri

Sistem Sayısı		Yıllık Enerji (kWh)			Kapasite Faktörü (%)		
Kuzey-Güney	Doğu-Batı	Ankara	Van	Albuquerque	Ankara	Van	Albuquerque
1	24	517614	678019	969533	9,8	12,9	18,4
2	12	566829	748355	1080131	10,8	14,2	20,6
3	8	583620	772140	1118143	11,1	14,7	21,3
4	6	592467	784282	1137747	11,3	14,9	21,6
6	4	602115	796800	1158000	11,5	15,2	22,0
8	3	607758	803497	1168839	11,6	15,3	22,2
12	2	615003	811065	1181493	11,7	15,4	22,5
24	1	628704	822460	1201915	12	15,6	22,9

Çizelge 4.9. WGA Sistemleri ile oluşturulacak 600 kW'lık güç sisteminin kuzey-güney ve doğu-batı yerleşim seçenekleri

Sistem Sayısı		Yıllık Enerji (kWh)			Kapasite Faktörü (%)		
Kuzey-Güney	Doğu-Batı	Ankara	Van	Albuquerque	Ankara	Van	Albuquerque
1	60	443100	607676	882033	8,4	11,6	16,8
2	30	490739	673752	999663	9,3	12,8	19
3	20	508087	696887	1039389	9,7	13,3	19,8
4	15	516764	708254	1058459	9,8	13,5	20,1
5	12	521960	714953	1069541	9,9	13,6	20,3
6	10	525409	719341	1076769	10	13,7	20,5
10	6	532297	727963	1090851	10,1	13,9	20,8
12	5	534055	730090	1094329	10,2	13,9	20,8
15	4	535838	732196	1097843	10,2	13,9	20,9
20	3	537678	734310	1101470	10,2	14,0	21
30	2	539720	736419	1105437	10,3	14,0	21
60	1	542566	738661	1111018	10,3	14,1	21,1

etkisi göz önüne alındığında büyük çaplı sistemler için uygun görülmemektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında yapılması planlanan 600 kW'lık sistemin küçük bir sistem olmasına karşın, Çizelge 4.8'de SES sistemi için verilen seçeneklerden kuzey-güney hattına 8, doğu-batı hattına 3 sistem (**KG 8-DB 3**); Çizelge 4.9'da WGA sistemi için ise kuzey-güney hattına 12, doğu-batı hattına 5 sistem yerleştirilmesi (**KG 12-DB 5**) uygun seçenek olarak düşünülmüştür ve bu yerleşim planlamaları üzerine sistem tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Kuzey-güney ve doğu-batı hatlarına yerleşecek sistem sayısına karar verildikten sonra, bu sistemlerde her iki hatta bulunan çanakların merkezleri arası uzaklıkların (sistemler arası uzaklıklar) optimum değerlerin belirlenmesi gerekir. Yapılacak optimizasyon işlemi, parabolik çanakların birbirini gölgeleme etkisini azaltmak amacıyla. Fakat gölgelenme etkisini azaltırken, dikkat edilecek bir diğer husus da güneş tarlasının kaplayacağı alandır. Bu amaçla **KG 12-DB 5** düzenlenimi için, çanak merkezleri arası uzaklık kuzey-güney hattı için 15 m sabit değer alınarak, doğu-batı hattı için 15m ve 30 m'lik iki farklı değer için yıllık çanak çıkış enerjileri ve çanak kayıpları hesaplanmıştır. WGA sistemi için Ankara, Van ve Albuquerque yerleşim bölgelerinde yapılan bu incelemeler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelgeden görüldüğü gibi, doğu-batı hattında merkezler arası uzaklık kuzey-güney hattındaki uzaklığın 2 katına çıkartıldığında, sistemin kaplayacağı alan da 2 katına çıkmakta, yıllık çanak çıkış enerjisi artmakta, çanak kayıpları azalmaktadır. Doğubatı hattındaki uzaklığın artırılması gölgelenme etkisini azaltacağından, bu gözlemler beklenen sonuçlardır.

Doğubatı hattındaki uzaklıkların artırılması durumunda kayıplar azalsa da, güneş tarlası alanının artmakta olduğu görülmektedir. Güneş tarlasına sistem yerleştirilmesi sırasında saha ve kablo maliyetleri artacağı için, enerji çıktısı ve maliyetler bakımında detaylı bir analiz yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada kuzey-güney ve doğubatı hatları için çanak merkezleri arası uzaklıklar 15 m olarak ele alınmıştır.

Çizelge 4.10. WGA sistemi için farklı yerleşim bölgelerinde çanak merkezleri arası uzaklığın etkisi

	Çanak merkezleri arası uzaklık		Çanak merkezleri arası uzaklık	
	Kuzey-Güney 15 m Doğu-Batı 15 m		Kuzey-Güney 15 m Doğu-Batı 30 m	
	Çanak Çıkış Enerjisi (MWh)	Çanak Kayıpları (MWh)	Çanak Çıkış Enerjisi (MWh)	Çanak Kayıpları (MWh)
Ankara	2816	228	2838	206
Van	3695	278	3705	268
Albuquerque	5400	427	5422	406

4.2.2. Sistem Çıktılarının İncelenmesi

Seçilen üç yerleşim bölgesi için, kesim 4.2.1’de yapılan yerleşim planlaması kullanılarak (SES için KG 8-DB 3 ve WGA için KG 12-DB 5) 600 kW’lık sistem tasarımı yapılırken, kesim 4.1’de optimizasyonu yapılan parametreler için optimum değerler alınmış (Çizelge 4.7), diğer parametreler için SAM yazılımının kütüphanesindeki varsayılan değerler kullanılmıştır. Optimum değerler kullanılarak modelleme yapıldığında, SES sistemi yıllık çıkış enerjileri; Albuquerque’de 1179 MWh, Van’da 810 MWh, Ankara’da 614 MWh değerleri gözlenmiştir. WGA sistemi için aynı modelleme yapıldığında Albuquerque’de 1103 MWh, Van’da 735 MWh, Ankara’da ise 543 MWh yıllık enerji değerleri gözlenmiştir. Modellemeler tüm parametrelerin SAM programı kütüphanesinde bulunan varsayılan değerleri için yapıldığında, ise SES sistemi yıllık çıkış enerjileri; Albuquerque’de 1169 MWh, Van’da 803 MWh, Ankara’da 608 MWh değerleri gözlenmiştir. WGA sistemi için aynı varsayılan değerler kullanılarak modelleme yapıldığında ise Albuquerque’de 1094 MWh, Van’da 730 MWh, Ankara’da ise 534 MWh yıllık enerji değerleri gözlenmiştir.

Yoğunlaştırılmalı güneş enerjisi sistemleri elektrik üretiminde güneş ışınımının direkt bileşenini kullanır. Yayınık (difüz) bileşeni kullanılmadığından, direkt ışınım miktarının yüksek olduğu, bulutsuz gün sayısının fazla olduğu, sis veya tozun

olmadığı yerlere kurulmalıdır. Bu nedenle sistem kurulumunun yapılacağı yerleşim bölgelerinde güneş ışınımına ait DNI (Direct Normal Irradiance) verileri aylara göre saatlik ortalamalar formunda bir matris olarak hazırlanarak Şekil 4.19-Şekil 4.20-Şekil 4.21'de verilmiştir. SAM yazılımında Stirling motoru soğutma sisteminin, dolayısı ile çanak-Stirling sisteminin etkin çalışmaya başlayacağı DNI değerleri SES sistemi için 200 W/m^2 , WGA sistemi için ise 275 W/m^2 'dir. Bu nedenle şekillerde DNI değerleri 0-200, 201-275, 276-400, 401-550, 551-700, 701-850 W/m^2 aralıkları ayrı renklendirilerek verilmiştir. Sistemin etkin çalışabileceği ay ve saatler düşünüldüğünde, Ankara bu tür sistemler için uygun DNI değerlerine sahip bir yerleşim bölgesi olarak görünmemesine karşın, Van Albuquerque ile karşılaştırıldığında, potansiyel bir bölge olarak görülmektedir. SES sistemi kurulması durumunda her bir yerleşim bölgesindeki sistemlerin kW olarak verilen çıkış güçleri Şekil 4.25-Şekil 4.27'de, yüzde olarak verilen verimleri Şekil 4.28-Şekil 4.30'da aylara göre verilen saatlik ortalama matris formunda verilmiştir. 600 kW olarak tasarılanan SES sistemlerinden oluşacak santral için en yüksek güç değerleri,

- Albuquerque için Haziran ayında saat 11:00'de 466 kW,
- Van için Haziran ayında saat 08:00'de 387 kW,
- Ankara için Temmuz ayında saat 11:00'de 292 kW

olarak elde edilmiştir. Sistemlerin verimleri incelendiğinde ise,

- Albuquerque için Temmuz ayında saat 11:00'de %26,
- Van için Temmuz ayında saat 08:00'de %22,
- Ankara için Temmuz ayında saat 11:00'de %21

en yüksek verimle çalıştıkları bulunmuştur. Albuquerque tüm yıl boyunca 10:00-14:00 saatleri arasında %18'in üzerinde Mayıs-Ağustos ayları arasında ise %23-25 verimle çalışmaktadır. Ankara'da sadece Haziran ve Temmuz aylarında %17 üzerinde verim gözlenmesine karşın, Van'da %18'lik verim değerleri Şubat ve Ekim aylarına kadar uzanan bir zaman diliminde gözlenebilmektedir. Bu sonuca göre DNI verileri ile paralel olarak Van'ın çanak-stirling sistem kurulumu için Ankara'ya göre daha uygun bir yerleşim bölgesi olduğu, ancak etkin çalışacak çanak-stirling sistemi için uygun olmayacağı görülmektedir.

600 kW olarak tasarımı yapılan sistemin WGA sistemi olması durumunda çıkış gücü ve verim değerleri, Şekil 4.31-Şekil 4.36'den görüldüğü gibi saatlik ortalama matris formunda verilmiştir. 600 kW olarak tasarımı yapılan santral için en yüksek güç değerleri,

- Albuquerque için Haziran ayında saat 11:00'de 429 kW,
- Van için Haziran ayında saat 08:00'de 357 kW,
- Ankara için Temmuz ayında saat 11:00'de 265 kW

Sistemlerin verimleri,

- Albuquerque için Temmuz ayında saat 11:00'de %20,
- Van için Haziran ayında saat 08:00'de %17,
- Ankara için Temmuz ayında saat 11:00'de %16,

olarak elde edilmiştir.

Tüm şekillerden görüldüğü gibi, SES sistemi WGA sisteminden daha verimlidir. Düşük güçlü çok sayıda çanak-stirling sistemi kullanmak yerine, yüksek çıkış gücüne sahip az sayıda çanak-stirling sistemi kullanmak uygun olacaktır. Enerji çıktılarının ve ekonomik analizlerinin ayrıntılı yapılması gerekmektedir.

Şekil 4.22. Albuquerque için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	49	165	277	96	53	3	0	0	0
07:00	0	4	129	385	518	558	409	348	235	198	24	0
08:00	174	194	384	562	680	727	621	553	479	532	329	236
09:00	443	436	573	674	781	790	755	668	573	652	576	536
10:00	616	583	588	775	814	831	783	731	658	699	659	644
11:00	686	645	613	791	826	845	821	768	697	759	715	698
12:00	649	740	651	768	790	828	819	770	750	752	733	670
13:00	654	753	699	716	763	816	802	703	771	746	724	648
14:00	679	729	638	647	770	651	734	623	725	746	716	631
15:00	612	674	560	640	631	596	648	529	634	692	661	621
16:00	589	604	505	557	569	527	406	546	518	574	521	461
17:00	398	516	498	463	495	457	326	407	391	428	212	230
18:00	46	124	300	339	408	374	233	256	193	97	1	0
19:00	0	0	21	93	151	210	110	85	4	0	0	0
20:00	0	0	0	0	1	21	5	0	0	0	0	0

0-200 W/m ²	201-275 W/m ²	276-400 W/m ²	401-550 W/m ²	551-700 W/m ²	701-850 W/m ²
------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Şekil 4.23. Van için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	102	369	170	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	151	331	558	440	266	319	0	0	0
07:00	0	56	286	281	495	648	603	484	532	318	145	0
08:00	198	293	484	314	566	680	642	538	589	476	270	143
09:00	372	413	490	335	575	677	666	549	603	508	330	229
10:00	403	459	535	347	583	664	650	540	607	498	340	259
11:00	450	454	508	341	591	636	631	543	579	508	350	277
12:00	449	455	498	319	541	572	556	489	571	515	335	262
13:00	435	440	480	333	457	592	558	534	565	516	326	246
14:00	497	499	462	314	484	604	556	539	556	528	360	294
15:00	401	492	430	302	454	617	548	545	567	492	113	101
16:00	32	226	371	263	451	604	519	502	458	28	0	0
17:00	0	0	30	86	359	541	467	292	32	0	0	0
18:00	0	0	0	0	5	80	81	5	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0-200 W/m ²	201-275 W/m ²	276-400 W/m ²	401-550 W/m ²	551-700 W/m ²	701-850 W/m ²
------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Şekil 4.24. Ankara için direkt normal ışınımın aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	11	195	189	253	37	0	0	0	0
07:00	0	0	56	170	357	371	437	284	208	67	0	0
08:00	0	93	195	298	423	416	484	443	351	188	209	55
09:00	150	183	248	335	439	461	502	496	371	263	317	223
10:00	267	234	231	360	442	461	551	493	395	295	359	329
11:00	269	255	250	362	444	454	559	473	430	304	381	364
12:00	244	259	254	402	338	399	475	412	405	307	377	392
13:00	241	256	217	390	317	420	455	418	358	295	384	402
14:00	320	273	235	376	304	440	456	407	351	356	422	460
15:00	344	286	276	376	299	433	483	397	358	365	415	428
16:00	206	265	266	359	300	452	456	377	329	300	249	286
17:00	0	147	188	339	276	429	438	335	285	142	0	0
18:00	0	0	24	210	182	389	365	202	66	0	0	0
19:00	0	0	0	0	40	228	184	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0-200 W/m ²	201-275 W/m ²	276-400 W/m ²	401-550 W/m ²	551-700 W/m ²	701-850 W/m ²
------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Şekil 4.25. SES sistemi kullanıldığında Albuquerque için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	3	31	89	1	0	0	0	0	0
07:00	0	0	25	152	244	283	175	127	59	36	0	0
08:00	37	61	166	302	369	402	320	282	231	250	132	53
09:00	203	215	290	370	432	442	408	358	295	343	304	264
10:00	316	309	297	424	443	463	427	395	349	367	355	332
11:00	355	340	302	418	443	466	448	420	369	402	382	361
12:00	333	397	318	400	424	450	443	418	397	396	384	348
13:00	347	406	354	375	403	441	429	379	419	410	401	354
14:00	362	390	313	329	402	338	382	322	388	406	391	337
15:00	309	359	269	323	308	297	323	263	335	367	357	332
16:00	295	315	223	270	269	258	180	268	263	297	254	237
17:00	137	237	202	229	230	207	130	176	178	173	46	59
18:00	0	6	56	116	152	153	86	71	36	7	0	0
19:00	0	0	0	5	19	59	12	6	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.26. SES sistemi kullanıldığında Van için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

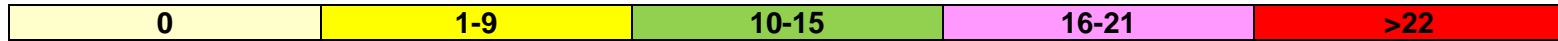
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	40	161	68	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	47	157	299	221	98	114	0	0	0
07:00	0	17	116	139	278	367	343	258	273	122	51	0
08:00	70	134	256	156	318	387	365	288	318	241	126	47
09:00	181	204	259	170	321	385	373	295	325	263	163	94
10:00	204	233	290	176	322	373	361	286	322	253	167	114
11:00	228	229	272	174	325	351	347	287	300	255	170	125
12:00	234	242	273	161	289	305	292	247	296	268	166	120
13:00	230	232	261	166	239	316	294	277	300	264	164	112
14:00	265	273	250	156	251	324	291	277	295	272	192	136
15:00	202	270	233	150	246	333	287	279	295	246	24	19
16:00	0	79	187	127	243	322	270	256	218	0	0	0
17:00	0	0	0	18	170	278	235	109	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.27. SES sistemi kullanıldığında Ankara için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	4	70	52	84	5	0	0	0	0
07:00	0	0	17	64	188	189	218	112	60	16	0	0
08:00	0	24	80	156	234	218	251	221	168	74	71	18
09:00	56	81	120	174	242	251	260	254	180	120	157	94
10:00	122	104	106	184	235	245	285	256	199	135	176	149
11:00	123	122	118	181	237	242	292	239	210	142	183	170
12:00	111	124	123	207	167	200	247	195	196	144	180	179
13:00	117	129	103	201	160	210	235	202	183	144	196	194
14:00	154	134	105	193	158	226	236	191	171	171	216	234
15:00	175	146	134	197	152	219	249	187	169	180	211	231
16:00	80	132	129	187	149	226	228	176	146	134	93	115
17:00	0	40	68	173	133	212	221	149	105	46	0	0
18:00	0	0	2	60	65	175	166	52	9	0	0	0
19:00	0	0	0	0	12	67	46	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

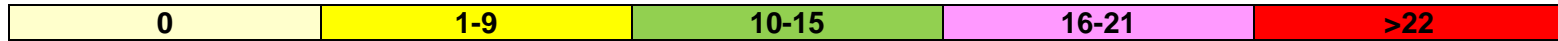
Şekil 4.28. SES sistemi kullanıldığında Albuquerque için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	0	0	3	13	21	22	17	13	7	5	0	0
08:00	5	7	13	20	25	24	24	21	18	18	13	7
09:00	15	14	19	22	25	25	25	24	20	21	20	19
10:00	19	21	18	23	25	25	25	25	20	21	20	21
11:00	19	21	17	24	24	25	26	25	22	21	22	21
12:00	18	22	17	22	23	24	25	25	22	22	21	20
13:00	19	23	20	21	24	24	25	25	23	23	21	20
14:00	19	22	18	20	23	20	23	22	22	23	22	18
15:00	18	21	16	18	17	18	22	20	21	21	21	20
16:00	18	20	13	16	18	18	14	20	19	20	18	17
17:00	11	17	14	14	15	14	11	15	14	13	7	8
18:00	0	1	5	9	13	12	8	8	5	1	0	0
19:00	0	0	0	1	3	6	2	1	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



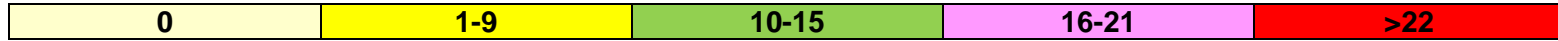
Şekil 4.29. SES sistemi kullanıldığında Van için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	4	17	8	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	6	13	20	19	12	11	0	0	0
07:00	0	2	14	11	16	21	22	17	19	15	6	0
08:00	10	14	19	11	18	21	22	17	19	17	12	6
09:00	12	14	17	12	17	21	22	17	20	18	12	8
10:00	14	15	19	13	19	21	21	17	19	17	12	9
11:00	15	15	18	13	19	20	21	19	18	18	12	9
12:00	15	16	19	12	16	17	17	15	18	18	12	9
13:00	15	15	17	12	12	18	17	17	18	18	11	8
14:00	18	18	16	11	14	18	17	18	18	18	14	11
15:00	17	18	16	10	13	19	17	17	19	19	3	3
16:00	0	10	15	9	14	20	17	16	16	0	0	0
17:00	0	0	0	3	12	19	16	10	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Şekil 4.30. SES sistemi kullanıldığında Ankara için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
07:00	0	0	2	7	13	16	19	14	9	2	0	0
08:00	0	4	9	11	14	17	19	18	16	7	9	2
09:00	8	9	10	12	14	19	19	18	14	9	13	10
10:00	10	9	8	12	14	18	20	19	16	9	13	11
11:00	10	10	9	12	16	19	21	18	16	11	13	11
12:00	9	10	11	14	10	17	19	14	15	10	12	12
13:00	9	10	9	13	10	18	17	16	14	10	14	13
14:00	12	11	9	13	9	18	17	15	14	13	16	17
15:00	14	12	12	13	10	18	17	15	14	13	15	17
16:00	10	12	10	12	9	18	16	15	13	11	11	12
17:00	0	6	7	13	9	18	16	13	12	5	0	0
18:00	0	0	0	7	7	16	15	7	1	0	0	0
19:00	0	0	0	0	2	10	7	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Şekil 4.31. WGA sistemi kullanıldığında Albuquerque için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	19	67	0	0	0	0	0	0
07:00	0	0	15	139	224	267	155	108	38	15	0	0
08:00	35	53	160	283	332	377	294	256	215	250	126	43
09:00	201	201	269	346	400	414	384	327	270	323	286	264
10:00	299	278	275	400	408	429	398	365	327	341	337	333
11:00	346	305	287	391	411	429	418	389	338	378	361	364
12:00	316	367	306	374	390	415	411	387	370	369	365	345
13:00	325	376	339	343	361	411	400	345	385	380	380	344
14:00	347	361	300	302	366	313	356	289	359	379	370	338
15:00	298	334	258	304	285	277	299	229	308	344	343	327
16:00	290	290	218	255	250	235	158	245	233	276	245	231
17:00	155	247	209	220	218	192	116	154	168	183	40	47
18:00	0	4	66	127	160	142	72	62	27	2	0	0
19:00	0	0	0	2	14	58	9	3	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.32. WGA sistemi kullanıldığında Van için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	36	138	52	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	34	144	285	201	76	88	0	0	0
07:00	0	11	85	123	259	340	313	239	255	95	46	0
08:00	46	105	230	141	294	357	332	265	295	219	99	34
09:00	175	185	233	148	295	354	340	265	298	238	148	89
10:00	194	214	263	153	291	343	327	258	293	227	150	107
11:00	221	210	241	148	296	323	315	251	275	225	153	121
12:00	224	213	238	136	265	282	266	217	267	238	153	116
13:00	223	209	231	143	225	293	270	248	272	237	150	108
14:00	247	247	223	138	227	301	269	244	268	249	173	120
15:00	175	248	208	136	231	308	266	248	273	223	14	7
16:00	0	56	169	114	229	299	253	234	205	0	0	0
17:00	0	0	0	11	169	264	222	97	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.33. WGA sistemi kullanıldığında Ankara için sistem çıkış gücünün (kW cinsinden) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	2	51	16	60	0	0	0	0	0
07:00	0	0	10	48	170	151	197	86	32	9	0	0
08:00	0	12	62	144	217	191	227	196	140	63	52	14
09:00	36	62	103	158	222	218	238	229	159	109	138	81
10:00	114	91	96	169	216	213	255	220	170	124	166	159
11:00	113	103	103	165	212	209	265	211	188	123	176	179
12:00	103	106	102	183	151	166	208	175	172	128	173	194
13:00	113	114	87	181	140	172	202	175	159	129	186	206
14:00	146	114	88	177	144	188	206	165	150	152	201	237
15:00	159	125	115	183	135	188	221	163	150	163	193	219
16:00	58	110	115	173	135	199	205	153	128	122	71	100
17:00	0	30	61	161	124	184	196	128	86	40	0	0
18:00	0	0	2	51	47	123	149	36	6	0	0	0
19:00	0	0	0	0	8	36	32	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.34. WGA sistemi kullanıldığında Albuquerque için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	2	7	0	0	0	0	0	0
07:00	0	0	1	10	16	17	12	9	4	2	0	0
08:00	4	5	10	16	19	19	18	16	14	15	10	5
09:00	12	11	14	17	20	20	20	18	15	17	16	16
10:00	15	15	14	19	19	19	19	19	16	16	16	17
11:00	16	15	14	19	19	19	20	19	16	17	17	18
12:00	14	17	14	17	18	18	20	20	17	18	17	16
13:00	15	18	16	15	18	19	20	19	18	18	17	16
14:00	16	17	14	15	18	15	18	16	17	19	17	15
15:00	15	16	12	14	13	14	17	14	16	17	17	16
16:00	15	15	10	12	14	13	10	15	13	15	15	14
17:00	10	14	12	12	12	10	7	10	10	11	4	5
18:00	0	1	5	8	11	9	5	5	3	0	0	0
19:00	0	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.35. WGA sistemi kullanıldığında Van için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	3	12	5	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	4	10	16	14	7	7	0	0	0
07:00	0	1	8	8	13	17	17	13	15	9	4	0
08:00	5	9	14	8	14	17	17	13	15	13	7	4
09:00	9	10	13	8	14	16	17	12	15	13	9	5
10:00	11	11	14	8	14	16	16	12	15	12	9	7
11:00	12	11	12	8	14	16	16	13	14	13	9	8
12:00	12	11	13	8	12	14	13	11	14	13	9	7
13:00	12	11	12	8	10	14	13	12	14	13	8	7
14:00	14	13	12	8	10	14	13	12	13	14	10	7
15:00	12	13	11	7	10	15	13	12	14	14	1	1
16:00	0	5	11	7	11	15	13	12	12	0	0	0
17:00	0	0	0	1	10	15	13	7	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.36. WGA sistemi kullanıldığında Ankara için net sistem veriminin (% olarak) aylara göre saatlik ortalama matrisi

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	5	2	7	0	0	0	0	0
07:00	0	0	1	4	10	11	13	9	4	1	0	0
08:00	0	2	5	8	11	12	14	13	11	5	5	2
09:00	4	5	7	9	11	14	14	13	10	7	9	7
10:00	7	6	6	9	11	13	15	13	11	7	10	10
11:00	8	7	7	9	11	13	16	13	11	8	10	10
12:00	6	7	7	10	8	11	13	11	11	7	10	10
13:00	7	7	5	10	7	11	12	11	10	7	11	12
14:00	9	8	6	10	7	12	12	10	10	9	12	14
15:00	10	8	8	10	7	12	13	10	10	10	12	14
16:00	6	8	7	9	7	13	12	10	9	9	6	8
17:00	0	3	5	10	7	13	12	9	8	3	0	0
18:00	0	0	0	5	4	9	11	4	1	0	0	0
19:00	0	0	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Parabolik çanak-stirling sistem tasarımı yapılırken, alıcı açıklık alanı, yakalama faktörü, kenar açısı ve yoğunlaştırma oranı, Stirling motoru soğurucu sıcaklığı göz önüne alınması gereken önemli parametrelerdir ve bu parametrelerin değerlerinin seçimi sistem çıkış gücünü ve verimi etkilemektedir. Tezin 4. kesiminde ayrıntılı olarak incelenen bu parametrelerin kontrolü ve en uygun değerlerinin seçim kriterleri aşağıdaki gibi özetlenebilir

- **Alıcı Açıklık Alanı;** Parabolik yoğunlaştırıcı direkt normal güneş ışınımını, alıcı açıklığına yansıtır ve soğurucuda ışınım yoğunlaştırılmış olur. Alıcı açıklık alanı, yansımış ışınımı yakalayacak ve soğurucuya iletecek kadar büyük olmalıdır. Açıklık alanı büyüdükçe, alıcıya gelen güneş ışınımının daha fazla miktarı yakalanırken, aynı zamanda konveksiyon ve ışıma/radyasyon ile meydana gelen ısı kayıpları da artacaktır. Birbirine zıt çalışan bu iki etki nedeniyle, alıcı açıklık alanı yoğunlaştırıcıdan gelen en fazla ışınımı alacak kadar büyük, ısı kayıpları en aza indirecek kadar da küçük olmalıdır. Kolektör sistemindeki hatalar, açıklık çapı ve soğurucu sıcaklığı sonucu meydana gelen alıcı kayıplarının etkisini görebilmek için bir analiz yapılması gereklidir.
- **Yakalama Faktörü;** Yakalama faktörü, parabolik kolektörden yansıtılan güneş ışınımının alıcı açıklığına ulaşan/giren kesri kadardır ve alıcı açıklık boyutu, kolektör hataları, kolektör kenar açısı, paralel olmayan güneş ışınımı ile değişim gösterir. Yakalama faktörünün artırılması, alıcıya giren enerji kesrini artırır, fakat bu da her zaman bir avantajlı durum değildir. Yakalama faktörü, parabolik çanak yüzeyi hatalarının azaltılması veya alıcı açıklığının artırılması sonucunda, artar. İlk olası durum sistem performansını artırırken, ikinci durumda ısı enerji kayıpları göz önüne alınarak değerlendirme yapılmalıdır. Bu değerlendirmede ısı kayıpları alıcı tarafından yakalanan enerji ile karşılaştırılmalı ve kayıplar kazançlardan fazla olmamalıdır.
- **Stirling Motoru Soğurucu Sıcaklığı;** Parabolik çanaklı Stirling motorlu güç üretme sistemlerinde soğurucu sıcaklığı güvenli bir çalışma aralığında tutulmalıdır. Motorun ısı verimini en büyük yapabilmek için soğurucu sıcaklığı malzemesinin yapısını bozmayacak şekilde olabildiğince yüksek tutulmalıdır. Sıcaklık kontrolü çalışma akışkanının basıncını değiştirerek sağlanabilir. Gerektiğinde motora çalışma

akışkanı ekleyerek veya çıkartarak, basınç değişimi gerçekleştirilebilir. Bunun sonucunda soğurucuya iletilen ısı miktarında değişim olur ve sıcaklık belirli bir aralıkta tutulabilir. Güneşten gelen ışıyım her zaman aynı şiddette olamayacağından, gün içinde sistemin çalışması sırasında basınç kontrolü, ışıyım değişimlerine hızlı bir şekilde cevap vermelidir. Bu şekilde basınç değişimi ile hem soğurucu sıcaklığı hem de stirling motor çıkış gücü kontrol edilmiş olur [42]. Motor çıkış gücü kontrolü için kullanılan diğler bir yöntem de hacim değişimi yaratmaktır. Motora entegre edilen değişken açılı oynar bir plaka yardımı ile piston ve silindirler arası hacim değiştirilerek güç kontrolü sağlanabilir [21].

- **Gölgelenme Etkisi;** Çok sayıda parabolik çanağın bulunduğu güneş tarlalarında, çanakların birbirlerini gölgeleme durumu da, kayıplara neden olur. Parabolik çanaklar, güneş tarlasına yerleştirilmeden önce gölge analizi modellemesi yapılarak birbirlerini gölgeleme durumları incelenmelidir. Özellikle güneşin yükseklik açısının küçük olduğu kış ayları için gölgelenme etkisine dikkat edilmelidir. Gölgeleme etkisini ortadan kaldırabilmek için sistemin kurulacağı arazinin eğimi, sistemler arası uzaklıklar ve kuzey-güney, doğu-batı hatlarına yerleştirilecek sistem sayılarına dikkat edilecek noktalardır.
- **Sistem Kayıpları;** Parabolik çanaktan alıcıya gelen ısı enerjisinde, sistemin bulunduğu yerleşim bölgesine ve günün saatlerine bağlı olarak, ışıma, iletim ve taşınım yolu ile kayıplar meydana gelir. Uzun dönem enerji tahmini için de bu kayıpların doğru bir şekilde analiz edilmesi ve hesaplanması önemlidir. Alıcıya yalıtım malzemesi eklenerek, iletim yolu ile oluşan kayıplar kontrol edilebilir. Yalıtım kalınlığı arttıkça parabolik çanak merkezinde gölgelenme artacağı ve bu gölgeleme etkisi ile sistem kayıpları ve güç düşmeleri oluşacağından, yalıtım kalınlığı da belirli sınır değerler içinde olmalıdır. Yalıtım malzemesi seçilirken ısı kayıplarının az olabilmesi için ısı iletkenlik katsayısı düşük malzemeler tercih edilmelidir.

Sistem tasarımının iyi yapılması kadar, sistemin kurulacağı yerleşim bölgesinin seçimi de önemlidir. Bu tez kapsamında ticari iki sistem olan SES ve WGA sistemlerinin Türkiye’de kullanılabilirliği araştırılırken meteorolojik verisi elde edilebilen Ankara ve Van illeri seçilmiş ve bu bölgelere göre değerlendirme yapılmıştır. Ancak kesim 4.2.2’de verilen sonuçlar ele alındığında, Van için en yüksek çıkış gücü değerlerinin saat 08:00’de elde edilmesi, Van ilinin 2005 yılına ait

meteorolojik verilerine dair bir soru işareti yaratmıştır. Öğle saatlerinde beklenen en yüksek çıkış gücü değerinin sabah saatlerine kayması, öğle saatlerinde oluşan olası bir bulutlanma şeklinde açıklanabilir. Daha sağlıklı bir sonuca ulaşabilmek için, on yıl gibi uzun yıl ortalamaları alınmış meteorolojik verilerin kullanılması ile elde edilecek sonuçların incelenmesi ve yorumlanması gerekir. Yine kesim 4'te belirtildiği gibi ekonomik analiz de bu tür uygulanabilirlik araştırması çalışmalarına dahil edilmeli ve sistem çıkış gücü-maliyet ilişkisi için optimizasyon çalışması yapılmalı ve bu konu üzerine yorum getirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Robert, F., Ghassami, M., Cota, A., *Solar Energy: Renewable energy and the environment*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, **2010**
- [2] Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., A review of studies on central Receiver solar thermal power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 12-39, **2013**
- [3] IEA, *Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives*, OECD/IEA, **2011**
- [4] Goswami, D.Y., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Taylor & Francis, **2000**
- [5] EPIA, *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017*, EPIA, **2013**
- [6] CSP Facts and Figures, <http://www.csp-world.com/resources/csp-facts-figures>, (Temmuz, **2013**)
- [7] IRENA, *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume:1, Power Sector issue 2/5, Concentrating Solar Power*, IRENA working paper, **2012**
- [8] Lovegrove, K., Stein, W., *Concentrating Solar Power Technology: Principles, developments and applications*, Woodhead Publishing, Cambridge, **2012**
- [9] IEA, *Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*, OECD/IEA, **2010**
- [10] Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley&Sons, **2005**
- [11] Kalogirou, S.A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Elsevier, California, **2009**
- [12] Newton, C.C., *A Concentrated Solar Thermal Energy System*, Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Florida State University, **2007**
- [13] Stine, W.B., Driver, R.B., *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*, Sandia National Laboratories Report, California, 1994
- [14] Mancini, T., Heller, P., Butler, B., Osborn, B., Schiel, W., Goldberg, V., Buck, R., Diver, R., Andraka, C., Moreno, J., Dish-Stirling Systems: an overview of development and status, *Journal of Solar Energy Engineering*, 125, 135-151, **2003**
- [15] Stone, K.W., McDonnell, D., Braun, H.W., Clark, T.B., Stirling Energy Systems (SES) Dish-Stirling Program, **1997**
- [16] WGAssociates, Introduction to WGAssociates and Solar Dish/Stirling Power Systems, **2001**
- [17] NREL Concentrating Solar Power Research, <http://www.nrel.gov/csp/>, (Temmuz **2013**)

- [18] Poullikkas, A., Kourtis, G., Hadjipaschalis, I., Parametric Analysis for the Installation of Solar Dish Technologies in Mediterranean Regions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2772-2783, **2010**
- [19] Barlev, D., Vidu R., Stroeve, P., Innovation In Concentrated Solarpower, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 2703–2725, **2011**
- [20] Siangsukone P., Lovegrove K., Modelling Of A Steam Based Paraboloidal Dish Concentrator Using The Computer Source Code *TRNSYS*, *Proceedings of Solar - Australian and New Zealand Solar Energy Society*, **2002**
- [21] Fraser, P.R., *Stirling Dish System Performance Model*, Master of Science, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Maddison, **2008**
- [22] Teichel, S.H., *Modeling and Calculation of Heat Transfer Relationships for Concentrated Solar Power Receivers*, Master of Science, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Maddison, **2011**
- [23] Lovegrove, K., Burgess, G., Pye, J., A New 500 m² Paraboloidal Dish Concentrator, *Solar Energy*, 85, 620-626, **2010**
- [24] Sandia National Laboratories, Ma, R.Y., *Wind Effects on Convective Heat Loss from A Cavity Receiver for A Parabolic Concentrating Solar Collector*, Sandia National Laboratories Report, **1993**
- [25] Zhigang Li, Z., Tang, D., Du , J., Li, T, Study On The Radiation Flux And Temperature Distributions Of The Concentrator-rereceiver System In A Solar Dish/Stirling Power Facility, *Applied Thermal Engineering*, 31, 1780-1789, **2011**
- [26] Reddy, K. S., Kumar, N. S., Combined Laminar Natural Convection And Surface Radiation Heat Transfer in A Modified Cavity Receiver of Solar Parabolic Dish, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1647-1657, **2008**
- [27] Nepvev, F., Ferriere, A., Bataille, F., Thermal Model of Dish/Stirling Systems, *Solar Energy*, 83, 81-89, **2009**
- [28] Prakash, M., Kedore, S.B., Nayak, J.K., Numerical Study of Natural Convection Loss from Open Cavities, *International Journal of Thermal Sciences*, 51, 23-30, **2012**
- [29] Jitte, R.D., Kedore, S.B., Nayak, J.K., Comparison of Cavity Receivers with and without mouth-blockage of different shapes and sizes used in paraboloid dish applications, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2, 1-6, **2010**

- [30] Wu, Shuang-Ying, Xiao, L, Cao, Y,. Li, You-Rong, Convection heat loss from cavity receiver in parabolic dish solar thermal power system: A review, *Solar Energy*, 84 ,1342–1355, **2010**
- [31] Reddy, K.S., Kumar, N. S., An improved model for natural convection heat loss from modified cavity receiver of solar dish concentrator, *Solar Energy* 83, 1884–1892, **2009**
- [32] Kongtragool, B., Wongwises, S., A review of Solar-powered Stirling Engine and Low-Temperature Differential Stirling Engine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7, 131-154, **2003**
- [33] Kongtragool, B., Wongwises, S., Four Power-Piston Low-Temperature Differential Stirling Engine Using Simulated Solar Energy As A Heat Source, *Solar Energy*, 82, 493–500, **2008**
- [34] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H., Cheap two axis following device, *Energy Conversion & Management*, 46, 1180-1192, **2004**
- [35] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A., A review of principle and sun tracking methods for maximizing solar system output, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1800-1818, **2009**
- [36] Urieli, I., Berchowitz, D.M., Stirling Cycle Analysis, Adam Hilger, Bristol, **1984**
- [37] Walker, G., *Stirling Engines*, Oxford University Press, New York, **1980**
- [38] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wily&Sons, **2007**
- [39] NREL SAM web sayfası, sam.nrel.gov, (Ağustos **2013**)
- [40] Anonim, (http://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html), (Ağustos **2013**)
- [41] Igo, J., Andraka, C.E., Solar Dish Field System Model for Spacing Optimization, *Proceedings of Energy Sustainability*, 27-30 Temmuz, Long Beach, California, USA, **2007**
- [42] Howard, D.F., *Modeling, Simulation and Analysis of Grid-Connected Dish-Stirling Solar Power Plants*, Master of Science, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, **2010**
- [43] Boles, M.A., Çengel, Y.A., *Termodinamik (Mühendislik Yaklaşımıyla)*, Güven Kitapevi, **2012**

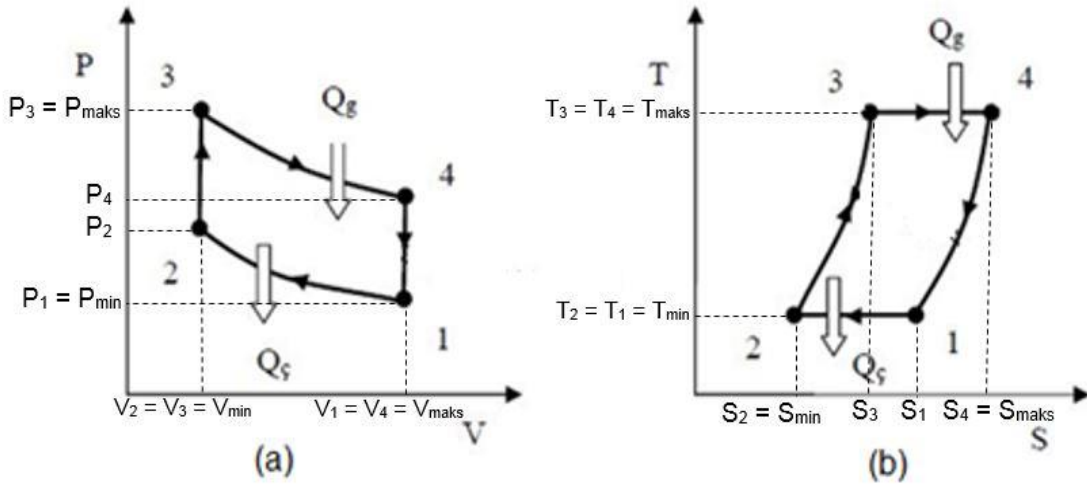
EK-1

İdeal Stirling Çevriminin Termodinamiğin 1. Ve 2. Yasaları Açısından İncelenmesi:

Stirling çevrimi kullanan motorun ideal analizi,

- Rejeneratörde kayıp olmadığı ve %100 verimle çalıştığı,
- Yapılan hesaplamalarda çalışma akışkanının ideal gaz olarak kabul edildiği,
- Sıkıştırılma ve genişleme süreçleri sırasında sıcaklığın sabit kaldığı,
- Çalışma akışkanının kütlesinin çevrim boyunca değişmediği,
- Isıtma ve soğutma süreçlerinin sabit hacim altında gerçekleştiği,
- Süreçler sırasında kayıp olmadığı

kabullenmeleri altında yapılmıştır [36-37].



Şekil EK-1.1. İdeal Stirling çevriminin (a) P-V ve (b) T-S diyagramları

Şekil EK-1.1.'de verilen P-V ve T-S diyagramlarında sabit sıcaklıkta sıkıştırma süreci, **1-2 durum değişimi** ile görülmektedir. Bu işlemde sıcaklığı sabit tutabilmek için sistemden çevreye ısı çıkışı olmaktadır ve süreçte yapılan iş, sistemden çıkan ısı enerjisine eşit olmaktadır. Sıcaklık sabit olduğundan iç enerjide değişim olmaz fakat sistemden ısı enerjisi çıkışı olduğundan dağıntı azalır.

1 ve 2 durumları için ideal gaz denklemleri,

$$P_1 V_1 = m R T_1 \quad (\text{EK-1.1.})$$

$$P_2V_2 = mRT_2 \quad (\text{EK-1.2.})$$

eşitlikleri ile verilir. Sıcaklık sabit olduğundan, PV çarpımı da sabit olacağından EK-1.1. ve EK-1.2. eşitlikleri oranlanır.

$$\frac{P_1V_1}{P_2V_2} = \frac{mRT_1}{mRT_2} \quad (\text{EK-1.3.})$$

Şekil Ek1.1'de verilen hacimler $V_1 = V_{maks}$ ve $V_2 = V_{min}$ Eş. EK-1.3.'te yerine yerleştirilirse,

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = P_1 \frac{V_{maks}}{V_{min}} \quad (\text{EK-1.4.})$$

eşitliği elde edilir.

Sistemden çevreye verilen ısı enerjisi Q_{1-2} ve yapılan iş W_{1-2} olarak tanımlandığında, termodinamiğin 1. Yasası,

$$dQ_{1-2} = dU_{1-2} + dW_{1-2} \quad (\text{EK-1.5.})$$

eşitliği ile verilir. İç enerjideki değişim sıfır olacağından, Eş. EK-1.5.'de $\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = 0$, ve $W_{1-2} = \int_1^2 PdV$ iş tanımı kullanılarak,

$$W_{1-2} = mRT_c \ln \frac{V_{min}}{V_{maks}} \quad (\text{EK-1.6.})$$

eşitliğine ulaşılır. Dağıntıdaki değişim ise,

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ_{1-2}}{T} = mR \ln \frac{V_{min}}{V_{maks}} \quad (\text{EK-1.7.})$$

eşitliği ile verilir.

Sabit hacimde yer değiştirme süreci, **2-3 durum değişimi** ele alındığında, değişimin süresince akışkan sıkıştırma hacminden genişleme hacmine doğru yer değiştirmektedir. Bu yer değiştirme sırasında akışkan rejeneratörden geçer ve rejeneratörden akışkana ısı transferi olurken akışkan sıcaklığı en düşük sıcaklık değeri olan T_{min} 'den en yüksek sıcaklık değeri olan T_{maks} 'a yükselir. Akışkanın

sıcaklığı yükseldiğinden iç enerji ve dağıntı artar. Fakat işlem sabit hacimde gerçekleştiği için iş yapılmaz. 2 ve 3 durumları için, ideal gaz denklemleri eşitliklerinden yararlanılarak,

$$\begin{aligned}
 P_3 V_3 &= mRT_3 & \frac{P_2 V_2}{P_3 V_3} &= \frac{mRT_2}{mRT_3} \\
 V_2 &= V_3 = V_{min} & T_2 &= T_{min} \quad T_3 = T_{maks} \\
 P_3 &= P_2 \frac{T_3}{T_2} = P_2 \frac{T_H}{T_C} & & \quad \quad \quad (EK-1.8.)
 \end{aligned}$$

Hacim değişimi olmadığı için iş yapılmayacağından iç enerjideki değişim,

$$\int_2^3 dU = m \int_2^3 C_v dT = mC_v(T_3 - T_2) \quad (EK-1.9.)$$

eşitliği ile verileceğinden, dağıntıdaki değişim için,

$$S_3 - S_2 = \int_2^3 \frac{dQ_{2-3}}{T} = \frac{mC_v dT}{T} = mC_v \ln \frac{T_H}{T_C} \quad (EK-1.10.)$$

bağıntısı bulunur.

Sabit sıcaklıkta genleşme süreci, **3-4 durum değişimi** göz önüne alındığında, Rejeneratörden geçip genleşme hacmine dolan sıcaklığı yükseltmiş olan akışkanın genleşme süresince basıncı düşer, hacmi artar. İdeal olmayan durumda aynı zamanda sıcaklığı da düşer. Bu işlem sabit sıcaklık işlemi olduğundan sıcaklığın düşmemesi için yani sıcaklığın T_{maks} değerinde sabit tutulması gerektiği için dışarıdan sisteme ısı transferi gerçekleşmektedir. Sıcaklık sabit kalacağından iç enerjide bir değişim olmaz. Fakat dışarıdan sisteme ısı transferi yapılacağından dağıntıda artış olur. Dışarıdan sisteme transfer edilen ısı enerjisi yapılan işe eşittir.

3 ve 4 durumları için ideal gaz denklemleri yazılarak ve benzer işlemler yapılarak,

$$\begin{aligned}
 P_4 V_4 &= mRT_4 & \frac{P_3 V_3}{P_4 V_4} &= \frac{mRT_3}{mRT_4} \\
 V_4 &= V_{maks} \quad V_3 = V_{min} & T_3 &= T_4 = T_H
 \end{aligned}$$

$$P_4 = P_3 \frac{V_3}{V_4} = P_1 \frac{V_{min}}{V_{maks}} \quad (\text{EK-1.11.})$$

eşitliği elde edilir. İç enerjideki değişim sıfır olacağından, iş için,

$$W_{3-4} = \int_3^4 \frac{mRT}{V} dV = mRT_H \int_3^4 \frac{dV}{V} = mRT_C \ln \frac{V_{maks}}{V_{min}} \quad (\text{EK-1.12.})$$

bağıntısına, Dağıntıdaki değişim için,

$$S_4 - S_3 = \int_3^4 \frac{dQ_{3-4}}{T} = mR \ln \frac{V_{maks}}{V_{min}} \quad (\text{EK-1.13.})$$

bağıntısına ulaşılır.

Sabit Hacimde yer değiştirme sürecini gösteren, **4-1 durum değişiminde** akışkan genleşme hacminden sıkıştırma hacmine doğru yer değiştirmektedir. Bu yer değiştirme sırasında rejeneratörden geçer ve sıcak akışkandan rejeneratöre ısı transferi olurken sıcaklığı en yüksek sıcaklık değeri olan T_{maks} 'tan en düşük sıcaklık değeri olan T_{min} 'e düşer. Akışkanın sıcaklığı düştüğünden iç enerji ve dağıtkanlık azalır. Süreç sabit hacimde gerçekleştiği için iş yapılmaz.

4 ve 1 durumları için, ideal gaz denklemlerinden başlayarak benzer işlemler yapıldığında,

$$\frac{P_4 V_4}{P_1 V_1} = \frac{mRT_4}{mRT_1} \quad V_1 = V_4 = V_{maks} \quad T_1 = T_{min} \quad T_4 = T_{maks}$$

$$P_4 = P_1 \frac{T_4}{T_1} = P_1 \frac{T_H}{T_C} \quad (\text{EK-1.14.})$$

Bağıntısı yardımıyla, Hacim değişimi olmadığından ve iş yapılmadığından için iç enerjideki ve dağıntıdaki değişimler, sırasıyla,

$$U_1 - U_4 = mC_v(T_C - T_H) = Q_{4-1} \quad (\text{EK-1.15.})$$

$$S_1 - S_4 = \int_4^1 \frac{dQ_{4-1}}{T} = \frac{mC_v dT}{T} = mC_v \ln \frac{T_C}{T_H} \quad (\text{EK-1.16.})$$

eşitlikleri ile verilir.

İncelenen dört süreç sonucunda, 2-3 ve 4-1 süreçlerinde iş yapılmadığı yalnızca sistem içinde sırası ile rejeneratörden çalışma akışkanına ve çalışma akışkanından rejeneratöre ısı enerjisi transferi söz konusu olduğu görülür. 2-3 sürecinde çalışma akışkanının rejeneratörden aldığı ısı enerjisi, 4-1 sürecinde akışkandan rejeneratöre geri verilmektedir.

Çevrim sırasında yapılan net iş, 1-2 sürecinde Eş. EK-1.6 ile verilen sistemden çevreye verilen ısı enerjisi ve 3-4 sürecinde Eş. EK-1.12 ile verilen çevreden akışkana transfer edilen ısı enerjilerinin toplamı şeklinde,

$$W_{net} = mR \ln \frac{V_{maks}}{V_{min}} (T_{maks} - T_{min}) \quad (\text{EK-1.17.})$$

Eşitliği ile verilir. Stirling çevrimi ısıl verimi, net işin sisteme giren ısı enerjisine oranı olarak,

$$\eta_{stirling} = \frac{W_{net}}{Q_{3-4}} = \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{maks}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{maks}} \quad (\text{EK-1.18.})$$

şeklinde tanımlanır. Verim ifadesine bakıldığında bu verimin Carnot verimine eşit olduğu görülür. Çünkü analizi yapılan çevrim tersinirdir ve kayıplar göz önünde bulundurulmaz. Gerçek çevrim verimi bu verimden farklı olacaktır [43].

EK-2

Çizelge EK-2.1. SAM yazılımında kullanılan parametrelerin tanımları ve yazılımda varsayılan değerleri

Parametre	Tanım	Programda Kullanılan Varsayılan Değerler	
		SES	WGA
Güneş Tarlası			
Güneş Tarlası Alan Yerleşimi			
Kuzey-Güney Hattındaki Sistem Sayısı	Güneş tarlasında kuzey-güney hattına yerleştirilecek sistem sayısıdır.	50	50
Doğu-Batı Hattındaki Sistem Sayısı	Güneş tarlasında doğu-batı hattına yerleştirilecek sistem sayısıdır.	80	80
Toplam Sistem Sayısı	Güneş tarlasında bulunan toplam sistem sayısıdır.	4000	4000
Kuzey-Güney Hattında bulunan çanak merkezleri arası uzaklık (m)	Kuzey-güney hattına yerleştirilecek çanak merkezleri arası uzaklıktır.	15	15
Doğu-Batı hattında bulunan çanak merkezleri arası uzaklık (m)	Doğu-batı hattına yerleştirilecek çanak merkezleri arası uzaklıktır.	15	15
Güneş Tarlası Alanı (m ²)	Toplam sistem sayısı, kuzey-güney hattına yerleştirilecek çanak merkezleri arası uzaklık ve doğu-batı hattına yerleştirilecek çanak merkezleri arası uzaklık değerlerinin çarpımıdır.	900000	900000
Sistem Özellikleri			
Sistemin Kapanacağı Rüzgar Hızı (m/s)	Burada verilen rüzgar hızı değeri ve üzerindeki değerlerde sistem zarar görmemesi için kapanma/bekleme konumuna geçer.	16	16
Toplam Kapasite (kW)	Toplam yansıtıcı/sistem sayısı ile bir sistemin güç çıktısının çarpımıdır.	100000	40000

Parabolik Çanak		SES	WGA
Çanak Parametreleri			
Yansıtıcı Çanak Alanı (m ²)	Yoğunlaştırıcı üzerinde bulunan yansıtıcı yüzeyin alanıdır. Alıcıya gelen yararlı enerjinin hesaplanmasında kullanılır.	87,7	41,2
Toplam Çanak Alanı (m ²)	Yoğunlaştırıcının toplam alanıdır. Kenar açısı ve gölge hesabında kullanılan yoğunlaştırıcı çapının bulunmasında kullanılır.	91,0	42,9
Yansıtma oranı	Yoğunlaştırıcı üzerinde bulunan yansıtıcı yüzeyin yansıtma oranıdır.	0,94	0,94
Alıcı		SES	WGA
Alıcı Açıklığı			
Alıcı Açıklık Çapı (m)	Yoğunlaştırıcıdan gelen güneş ışınımının girdiği açıklığın çapıdır.	0,184	0,14
Alıcı Yalıtımı			
Alıcı Yalıtım Kalınlığı (m)	Alıcı yalıtımının kalınlığıdır. İletim ile ısı kaybı hesabında kullanılır.	0,075	0,075
Alıcı Yalıtımının Isıl İletkenliği (W/mK)	Alıcı kovuk iç yüzeyinin (duvarının) 550°C'deki ısı iletkenliğidir. İletim ile ısı kaybı hesabında kullanılır.	0,06	0,06
Soğurucu			
Soğurucu Soğurma Oranı	Soğurucuya gelen güneş ışınımının, soğurucu tarafından soğrulan enerji kesridir. Işıma ile kayıpları hesaplanmasında kullanılır.	0,90	0,90
Soğurucu Yüzey Alanı (m ²)	Soğurucunun yüzey alanıdır. İç kovuk alanı hesabında kullanılır.	0,6	0,15
Kovuk			
Kovuk Soğurma Oranı	Kovuk tarafından soğrulan enerji miktarının kovuğa gelen güneş ışınımı miktarına oranıdır. Işıma ile kayıpların hesaplanmasında kullanılır.	0,6	0,6

Kovuk Yüzey Alanı (m ²)	Kovuk duvar yüzeyinin alanıdır. İç kovuk alanının hesaplanmasında kullanılır.	0,6	0,15
Kovuk Çapı (m)	Kovuğun ortalama iç çapıdır. Kovuk alanının hesaplanmasında kullanılır	0,46	0,35
Kovuk derinliği (m)	Kovuğun karakteristik uzunluğuna eşittir. Taşınım ile ısı kaybı hesabında kullanılır.	0,46	0,35
Stirling Motoru			
Hesaplanan Üretim		SES	WGA
Tek bir birimin nominal kapasitesi (kW)	Tek bir çanak-stirling sisteminin elektriksel güç çıktısıdır.	25	10
Motor Parametreleri			
Genişleme Bölgesi sıcaklığı	Genişleme bölgesi ayar sıcaklığıdır.	993	903
Motor Çalışma Hızı (dev/dak)	Motor döndürme milinin dönüsel hızıdır. Motor çıkış gücü hesabında kullanılır.	1800	1800
Yer Değiştirme Hacmi (m ³)		0,00038	0,00016
“Parasitics”			
“Parasitic Parameters”		SES	WGA
Kontrol Sisteminin Harcadığı Ortalama Güç (W)	Güneş takip sistemi tarafından harcanan ortalama güç miktarıdır.	150	100
Soğutma Sistemi Pompası Hızı (dev/dak)	Soğutma akışkanı pompasının çalışma hızıdır. Soğutma akışkanı pompalama sırasında harcanan güç hesabında kullanılır.	1800	1800
Soğutma Sistemi Fan Hızı 1 (dev/dak)	Soğutma akışkanı sıcaklığı fan hızı 2'nin devreye girme sıcaklığından düşük olduğunda soğutma fanının çalışma hızıdır.	400	400
Soğutma Sistemi Fan Hızı 2 (dev/dak)	Soğutma akışkanı sıcaklığı, fan hızı 2'nin devreye girme sıcaklığından yüksek, fan hızı 3'ün devreye girme sıcaklığından düşük olduğunda soğutma fanının çalışma hızıdır.	550	550
Soğutma Sistemi Fan Hızı 3 dev/dak)	Soğutma akışkanı sıcaklığı fan hızı 3'ün devreye girme sıcaklığından yüksek olduğunda soğutma fanının çalışma hızıdır.	650	650

Fan Çalışma Hızı 2'nin Devreye Gireceği Sıcaklık Değeri (°C)	Soğutma suyu sıcaklığı set değeridir. Fan çalışma hızının ayarlanmasında kullanılır.	20	20
Fan Çalışma Hızı 3'ün Devreye Gireceği Sıcaklık Değeri (°C)	Soğutma suyu sıcaklığı set değeridir. Fan çalışma hızının ayarlanmasında kullanılır.	30	30
Soğutma Akışkanı Tipi	Soğutma sisteminde kullanılan akışkandır. Seçenekler su, %50 ethylene glycol (EG), %25 ethylene glycol, %40 propylene glycol (PG) ve %40 propylene glycoldür. Yüzdeler hacimseldir.	V50%EG	V50%EG
Soğutucu Etkinlik Kesri	Sıkıştırma bölgesi sıcaklığı hesabının bir parçası olarak, soğutma sistemi içindeki çalışma akışkanı sıcaklığının hesaplanmasında kullanılır.	0,6	0,6
Radyatör Etkinlik Kesri	Sıkıştırma bölgesi sıcaklığı hesabının bir parçası olarak, soğutma sistemi çıkışındaki soğutma suyu sıcaklığının hesaplanmasında kullanılır.	0,6	0,6

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Gülin ACAROL ZİLİANLI

Doğum Yeri : Keşan

Medeni Hali : Evli

E-posta : gulin.acarol@hacettepe.edu.tr

Adresi : Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü Yeni ve Temiz Enerji Araştırma Uygulama Merkezi, Güneş Evi ve Bahçesi, 06800, Beytepe, Çankaya, ANKARA

Eğitim

Lise : Gelibolu Anadolu Lisesi (1996-2003)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği (2004-2009)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – Çok iyi

İş Deneyimi

2009-2010 Global Analitik Laboratuvar Cihazları San. ve Tic. Ltd. Şti.
Teknik Satış Mühendisi

2011- Halen Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler A.B.D.
Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

Güneş Enerjisi Sistemleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-