

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PARABOLİK ÇANAK VE PARABOLİK OLUK KOLEKTÖR
SİSTEMLERİNİN TASARLANMASI VE DENEY
SONUÇLARININ YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE
MODELLENMESİ

Atılgan TEMİR

Danışman
Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI

II. Danışman
Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

ISPARTA - 2025



© 2025 [Atılğan TEMİR]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

10/07/2025

Atılgan TEMİR

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Termal Güç Sistem Çeşitleri.....	6
1.1.1. Yoğunlaştırmayan sistemler.....	7
1.1.2. Yoğunlaştıran sistemler.....	9
1.1.2.1. Fresnel ayna sistemleri.....	14
1.1.2.2. Parabolik oluk kolektör	18
1.1.2.3. Güneş güç kulesi	24
1.1.2.4. Parabolik çanak sistemler.....	24
1.2. Güneş Takip Eksen Çeşitleri.....	25
1.3. Güneş Takip Sistemi Sürücü Tipleri	27
1.3.1. Aktif takip	27
1.3.2. Kronolojik takip	28
1.3.3. Pasif ve yarı pasif takip	28
1.3.4. Manuel takip.....	29
1.4. Güneş Takip Sistemi Kontrol Çevrim Tipleri.....	30
1.4.1. Açık çevrim kontrol sistemi	30
1.4.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi	31
1.4.3. Hibrid çevrim kontrol sistemi	33
1.5. Güneş Enerjisi	34
1.5.1. Dünya güneş enerji potansiyeli	35
1.5.2. Türkiye güneş enerji potansiyeli	42
1.5.3. Isparta güneş enerji potansiyeli.....	50
1.5.4. Güneş radyasyonu	53
1.5.5. Güneş açı ve hesapları.....	56
1.5.5.1. Enlem açısı	56
1.5.5.2. Boylam açısı.....	57
1.5.5.3. Saat açısı.....	58
1.5.5.4. Deklinasyon açısı	58
1.5.5.5. Azimut açısı	61
1.5.5.6. Güneş yükseklik açısı.....	62
1.5.5.7. Zenit açısı	63
2. KAYNAK ÖZETLERİ	66
2.1. Parabolik Oluk Kolektör ile İlgili Çalışmalar	66
2.2. Parabolik Çanak Kolektör ile İlgili Çalışmalar.....	76
2.3. Parabolik Oluk (PTC) ve Parabolik Çanak (PDC) Sistemlerinde Yapay Zekâ Modelleme Çalışmaları	90
3. MATERYAL VE YÖNTEM.	99
3.1. Parabolik Oluk Kolektör Sistemi	99
3.1.1. Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sistemi.....	99
3.1.2. Parabolik oluk kolektörün mekanik tasarımı	111

3.1.2.1. Parabolik oluk kolektör tasarım ilkeleri	112
3.1.2.2. Parabolik oluk kolektör alıcısı	123
3.1.2.3. Parabolik oluk kolektör montaj aşaması	128
3.1.3. Parabolik oluk kolektör güneş takip kontrol algoritması	137
3.1.4. Parabolik oluk kolektör ısı hesaplar	143
3.2. Parabolik Çanak Kolektör Sistemi	149
3.2.1. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol sistemi	149
3.2.2. Parabolik çanak kolektörün mekanik tasarımı	151
3.2.2.1. Parabolik çanak kolektör tasarım ilkeleri	152
3.2.2.2. Parabolik çanak kolektör alıcıları	155
3.2.2.3. Parabolik çanak kolektör montaj aşaması	163
3.2.3. Parabolik çanak kolektör güneş takip kontrol algoritması	168
3.2.4. Parabolik çanak kolektör ısı hesaplar	171
3.3. Sistem Deney Tasarımı	176
3.3.1. Veri kaydedici sistem ve yazılımı	176
3.3.2. Deney ölçüm sensörleri	178
3.3.2.1. Güneş ışınım sensörü	179
3.3.2.2. Ortam sıcaklık ve nem sensörü	182
3.3.2.3. Termokupl	183
3.3.2.4. Rüzgâr sensörü	185
3.4. Yapay Zekâ Algoritmaları	187
3.4.1. Polinom regresyon	191
3.4.2. Çoklu doğrusal regresyon	192
3.4.3. Destek vektör regresyonu	193
3.4.4. K-EN yakın komşular regresyonu	193
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	195
4.1. Sistemlerin Isıl Performans Analizleri	195
4.1.1. Parabolik oluk kolektör ısı performans analizi	196
4.1.2. Parabolik çanak kolektör ısı performans analizi	197
4.2. Termal Analiz Modellemeleri	201
4.2.1. Parabolik oluk kolektör alıcı modellemesi	202
4.2.2. Parabolik çanak kolektör kavite tüp alıcı modellemesi	210
4.2.3. Parabolik çanak kolektör konik spiral alıcı modellemesi	213
4.2.4. Parabolik çanak kolektör kavitesiz tüp alıcı modellemesi	217
4.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	220
4.4. Yapay Zekâ Model Analizleri	235
4.4.1. Polinom regresyon modellemesi	236
4.4.2. Çoklu doğrusal regresyon modellemesi	239
4.4.3. Destek vektör regresyon modellemesi	242
4.4.4. K-EN yakın komşular regresyon modellemesi	244
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	254
KAYNAKLAR	257
EKLER	271
EK A. Elektronik Kontrol Devre Şemaları	272
EK B. Algoritmalar	273
ÖZGEÇMİŞ	277

ÖZET

Doktora Tezi

PARABOLİK ÇANAK VE PARABOLİK OLUK KOLEKTÖR SİSTEMLERİNİN TASARLANMASI VE DENEY SONUÇLARININ YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ

Atılgan TEMİR

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI

II. Danışman: Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji teknolojilerinden yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri olan parabolik oluk kolektör (PTC) ve parabolik çanak kolektör (PDC) sistemlerinin tasarımı, teorik analizleri, deneysel testleri ve yapay zekâ yöntemleriyle performanslarının modellenerek karşılaştırılması amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında, PTC ve PDC sistemlerinin mekanik tasarımları, elektronik kontrol birimleri, güneş takip algoritmaları, optik yansıtıcıları ve alıcı sistemleri detaylı olarak geliştirilmiştir. Sistemlerin teorik analizlerinde enerji dengesi denklemleri ve ısı transfer mekanizmaları detaylı incelenmiş, sistemlerin verimlilik ve performansını etkileyen faktörler kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır. Teorik analizlerde, PTC sisteminde farklı alıcı boru çapları (10 mm, 20 mm, 30 mm) ve debi değerlerinin (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) termal performans üzerindeki etkileri incelenmiş; ANSYS analizleri sonucunda optimum performansın 20 mm çaplı alıcı boru ve 0.02 kg/s debide gerçekleştiği belirlenmiştir. PDC sisteminde üç farklı alıcı tasarımı (konik spiral, kavite tüp ve kavitesiz tüp) karşılaştırılmış ve konik spiral alıcının daha yüksek termal verimlilik sağladığı ortaya konmuştur. Son aşamada deneysel veriler yapay zekâ teknikleriyle modellenmiştir. Bu model sonuçları literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve optimizasyon süreçlerinde önemli bir referans oluşturmakta, ayrıca farklı coğrafi bölgelerde ve çeşitli çevresel koşullarda benzer sistemlerin performansının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların yapılmasına öncülük edecektir. Bu bağlamda, ekonomik analizlerle desteklenecek çalışmaların, sistemlerin geniş çapta uygulama potansiyelini ortaya koyacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Parabolik güneş sistemleri, Güneş takip sistemleri, Akıllı enerji sistemleri, Yapay zekâ, Sonlu elemanlar yöntemi

2025, 277 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Dissertation

DESIGN OF PARABOLIC DISH AND PARABOLIC TROUGH COLLECTOR SYSTEMS AND MODELING OF EXPERIMENTAL RESULTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Atılğan TEMİR

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI

Co-Supervisor: Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

This study focuses on the design, theoretical analysis, experimental testing, and performance modeling through artificial intelligence methods of concentrated solar power (CSP) systems—specifically parabolic trough collector (PTC) and parabolic dish collector (PDC) systems—were conducted and comparatively evaluated. Within the scope of the research, the mechanical designs, electronic control units, sun-tracking algorithms, optical reflectors, and receiver systems of both PTC and PDC were comprehensively developed. Theoretical analyses focused on energy balance equations and heat transfer mechanisms, thoroughly examining the factors influencing the efficiency and performance of the systems. For the PTC system, the effects of different receiver tube diameters (10 mm, 20 mm, 30 mm) and mass flow rates (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) on thermal performance were investigated. ANSYS simulations demonstrated that optimum performance was achieved with a 20 mm receiver tube diameter at a mass flow rate of 0.02 kg/s. In the case of the PDC system, three different receiver designs (conical spiral, cavity tube, and non-cavity tube) were compared, and the conical spiral receiver was found to provide higher thermal efficiency. In the final stage, the experimental data were modeled using artificial intelligence techniques. The model outputs were validated through comparison with similar studies in the literature. The findings of this study provide a valuable reference for the design and optimization processes of solar energy systems, while also paving the way for further research on evaluating the performance of similar systems under diverse geographical and environmental conditions. In this context, studies supported by economic analyses are expected to reveal the large-scale application potential of such systems.

Key Words: Solar energy, Parabolic solar systems, Solar tracking systems, Smart energy systems, Artificial intelligence, Finite element method

2025, 277 pages

TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, sabrı, desteği ve yol göstericiliğiyle her daim yanımda olan çok değerli danışmanım Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI'ya, çalışmamın yürütülmesi sırasında YEKARUM'da bana çalışma ve laboratuvar imkânları sağlayarak deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmeme olanak tanıyan, değerli katkıları ve desteğiyle her zaman yanımda hissettiğim ikinci danışmanım Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL'e gönülden teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde yer alarak çalışmamın her aşamasını titizlikle takip eden, değerli yorumları, yol gösteren önerileri ve içten yaklaşımlarıyla tezimin gelişmesine büyük katkı sunan saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Ahmet ÖZSOY'a ve Doç. Dr. İbrahim KIRBAŞ'a yürekten teşekkür ederim.

Tez savunma jürimde yer alarak çalışmamı dikkatle inceleyen, kıymetli değerlendirmeleri ve yapıcı eleştirileriyle tezime son şeklini vermemde önemli katkılar sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ahmet KABUL'e ve Doç. Dr. Tansel KOYUN'a da teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu süreçte tezimi gerçekleştirmemdeki teknik destekleri, emeği ve samimi yardımlarıyla bana büyük kolaylık sağlayan sevgili Berat UÇAR abime de ayrıca teşekkür ederim. 2022-D1-0176 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na ve 100/2000 YÖK Doktora Burs Programına teşekkür ederim.

Bu uzun ve zaman zaman oldukça yorucu süreçte, en büyük destekçim, hayat arkadaşım, sevgisi, sabrı ve anlayışıyla her daim yanımda olan canım eşim Zehra TEMİR'e gönülden teşekkür ediyorum. Varlığın, inancın ve desteğin bu süreci benim için çok daha anlamlı ve değerli kıldı. Hayatım boyunca sevgisi, duaları ve sonsuz desteğiyle bana güç veren annem Münevver TEMİR'e, her zaman yanımda olup güveni ve desteğiyle bana inanan babam Sedat TEMİR'e en derin şükranlarımı sunuyorum. Her zaman iyi günde kötü günde yanımda olan, sevgileriyle hayatımı güzelleştiren canım kardeşlerim Zeynep Miray TEMİR, Serhan TEMİR ve Oğuzhan TEMİR'e teşekkür ediyorum. Sevgileri, duaları ve içten destekleriyle bana çocukluğumdan itibaren her zaman güç veren anneannem Dudu YILMAZ'a ve bu süreçte kaybettiğim, sevgisini ve desteğini her daim kalbimde hissettiğim dedem Ahmet YILMAZ'a en içten minnet ve teşekkürlerimi iletiyorum.

Bu çalışmayı, bana her zaman inanan, sevgisi ve değerleriyle yolumu aydınlatan dedem, arkadaşım ve sırdaşım olan Ahmet YILMAZ'ın aziz hatırasına ithaf ediyorum.

Atılğan TEMİR
İSPARTA, 2025

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları	3
Şekil 1.2. Solar termal enerji dönüşüm diyagramı	6
Şekil 1.3. Güneş termal güç sistem tipleri	7
Şekil 1.4. Düz yüzey (sol) ve vakum tüplü alıcı (sağ) modeli	9
Şekil 1.5. Yoğunlaştıran sistem çeşitleri	10
Şekil 1.6. Lineer fresnel yansıtıcı	15
Şekil 1.7. Fresnel lens kolektörü (a) ve lineer fresnel reflektör (b)	16
Şekil 1.8. Parabolik oluk kolektör ve sistem parçaları	18
Şekil 1.9. Parabolik oluk kolektör alıcı tüp ve cam kaplama	19
Şekil 1.10. Parabolik oluk kolektör sistem temel kısımları	21
Şekil 1.11. Parabolik oluk kolektör gündüz çalışma diyagramı	22
Şekil 1.12. Parabolik oluk kolektör gece çalışma diyagramı	23
Şekil 1.13. Tek eksen (sol) ve çift eksen (sağ) güneş takip sistemleri	26
Şekil 1.14. Açık çevrim sistemi blok diyagramı	31
Şekil 1.15. Kapalı çevrim sistemi blok diyagramı	32
Şekil 1.16. Hibrid çevrim sistemi blok diyagramı	33
Şekil 1.17. Dünya global radyasyon haritası	36
Şekil 1.18. Ülkelerin potansiyel-teorik PV güç çıkış karşılaştırması	41
Şekil 1.19. Türkiye güneş enerji potansiyel haritası	43
Şekil 1.20. Türkiye global güneş radyasyon ve güneşlenme süresi	44
Şekil 1.21. Avrupa ve Orta Asya global güneş radyasyon değerleri	44
Şekil 1.22. Türkiye seviye 0 PV güç çıkış haritası	46
Şekil 1.23. Deney sisteminin konumu	50
Şekil 1.24. Deney konumunda güneş yükseklik ve azimut açısı değişimi	51
Şekil 1.25. Isparta ilinin aylık direkt normal radyasyon değerleri	52
Şekil 1.26. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi	59
Şekil 1.27. Deklinasyon açısı formüllerinin karşılaştırılması	60
Şekil 1.28. Azimut açısının gösterimi	61
Şekil 1.29. Zenit ve güneş yükseklik açısı ilişkisi	64
Şekil 2.1. PTC performans test grafiği	69
Şekil 2.2. Alıcı geometrileri	70
Şekil 2.3. Geliştirilen PTC sistemi	75
Şekil 2.4. Geliştirilen parabolik çanak sistemi	77
Şekil 2.5. Geliştirilen parabolik çanak alıcısı	78
Şekil 2.6. Kolektör verimliliği ve yoğunlaştırıcı kalite grafiği	79
Şekil 2.7. Geliştirilen parabolik çanak (sol) ve çanak alıcısı (sağ)	81
Şekil 2.8. Tasarlanan silindirik (sol) ve konik (sağ) alıcılar	83
Şekil 2.9. Parabolik çanak sistemi kontrol blok diyagramı	85
Şekil 2.10. Tianjin’de bulunan parabolik çanak kolektörü	86
Şekil 2.11. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol diyagramı	87
Şekil 2.12. Kararlılık kontrol diyagramı	88
Şekil 2.13. Tasarlanan kavite alıcı çeşitleri	89
Şekil 2.14. Alıcı çeşitlerinin performans karşılaştırılması	90
Şekil 2.15. Yapay sinir ağı model mimarisi	94
Şekil 2.16. ANFIS model mimarisi	97
Şekil 3.1. Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyicisi	101
Şekil 3.2. NEO6MV2 GPS sensör modülü	103

Şekil 3.3. 4 Kanal röle modülü	105
Şekil 3.4. Değişken frekanslı sürücü (sol) ve giriş terminali (sağ)	107
Şekil 3.5. Asenkron elektrik motoru	109
Şekil 3.6. Proximity (yakınlık) sensörü.....	110
Şekil 3.7. Parabolik yansıtıcı tasarım ölçütleri.....	116
Şekil 3.8. Parabolik oluk kolektör gölgelenme alanları	119
Şekil 3.9. Tasarlanan kolektörün parabol parametreleri	121
Şekil 3.10. Parabolik oluk kolektör yansıtıcı yüzeyi	122
Şekil 3.11. Parabolik oluk kolektör bakır tüp alıcısı.....	123
Şekil 3.12. Parabolik oluk kolektör alıcı çizimi.....	124
Şekil 3.13. Parabolik oluk kolektör yansıtıcı (sol) ve alıcı (sağ) optik modellemesi.....	126
Şekil 3.14. Parabolik oluk kolektör temel destek yapısı	128
Şekil 3.15. Eksen motor rulman takımı.....	129
Şekil 3.16. Motor mil çeliği imalat aşamaları	130
Şekil 3.17. Parabolik oluk kolektör motor ve redüktörü.....	134
Şekil 3.18. Parabolik oluk kolektör temel yapısı	135
Şekil 3.19. Parabolik oluk kolektör alıcı ve sabitleme kolu.....	136
Şekil 3.20. Tasarlanan parabolik oluk kolektör sistemi	136
Şekil 3.21. Parabolik oluk kolektör alıcısı ısı kayıpları	144
Şekil 3.22. Parabolik çanak kolektörü tasarım parametreleri	153
Şekil 3.23. Parabolik çanak kolektörü yansıtıcı yüzeyi	154
Şekil 3.24. Kaviteli tüp alıcı 3 boyut çizimi.....	157
Şekil 3.25. Kaviteli tüp alıcı teknik çizimi.....	158
Şekil 3.26. Kavitesiz tüp alıcı 3 boyut çizimi	159
Şekil 3.27. Kavitesiz tüp alıcı teknik çizimi	160
Şekil 3.28. Konik bakır spiral alıcı 3 boyut çizimi	161
Şekil 3.29. Kavite bakır spiral alıcı teknik çizimi.....	162
Şekil 3.30. Parabolik çanak kolektör optik modellemesi.....	162
Şekil 3.31. Parabolik çanak kolektör temel destek yapısı	164
Şekil 3.32. Parabolik çanak kolektör yansıtıcısı	165
Şekil 3.33. Parabolik çanak sistemi üst gövde	165
Şekil 3.34. Parabolik çanak kolektör aktüatör sistemi	168
Şekil 3.35. ES 5590 veri kaydedicisi	177
Şekil 3.36. Veri kaydedici arayüz programı.....	178
Şekil 3.37. FLA613-GS global ışınım sensör	179
Şekil 3.38. DNI ölçüm mekanizması	181
Şekil 3.39. FHA646AG sıcaklık ve nem sensörü	183
Şekil 3.40. Akışkan sıcaklık ölçüm termokupları	185
Şekil 3.41. Ahlborn FVA 615-2 anemometre	186
Şekil 4.1. Parabolik oluk kolektör alıcı mesh modellemesi	203
Şekil 4.2. Termal analiz yakınsama kriter değişimleri.....	205
Şekil 4.3. Parabolik oluk kolektör alıcısının (10mm) akışkan çıkış analizleri....	206
Şekil 4.4. Parabolik oluk kolektör alıcısının (20mm) akışkan çıkış analizleri....	207
Şekil 4.5. Parabolik oluk kolektör alıcısının (30mm) akışkan çıkış analizleri....	208
Şekil 4.6. Parabolik çanak kavite tüp alıcı gövde mesh modeli.....	210
Şekil 4.7. Parabolik çanak kavite tüp alıcı akışkan çıkış bölgesi mesh modeli ..	211
Şekil 4.8. Parabolik çanak kaviteli tüp alıcı sıcaklık dağılımı	212
Şekil 4.9. Parabolik çanak kaviteli tüp alıcı akışkan çıkış analizi	213
Şekil 4.10. Parabolik çanak konik spiral alıcı mesh modellemesi	214

Şekil 4.11. Parabolik çanak konik spiral alıcı sıcaklık dağılımı	215
Şekil 4.12. Parabolik çanak konik spiral alıcı çıkış sıcaklık dağılımı.....	216
Şekil 4.13. Parabolik çanak kavitesiz tüp alıcı mesh modellemesi.....	217
Şekil 4.14. Parabolik çanak kavitesiz tüp alıcı sıcaklık dağılımı	219
Şekil 4.15. Parabolik çanak kavitesiz tüp alıcı çıkış sıcaklık dağılımı	220
Şekil 4.16. PDC konik spiral alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri	222
Şekil 4.17. PDC konik spiral alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi.....	224
Şekil 4.18. PDC konik spiral ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri	224
Şekil 4.19. PDC konik spiral ve PTC alıcı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri.....	226
Şekil 4.20. PDC kaviteli tüp alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri	227
Şekil 4.21. PDC kaviteli alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi.....	228
Şekil 4.22. PDC kaviteli tüp ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri	229
Şekil 4.23. PDC kaviteli tüp ve PTC alıcı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri.....	230
Şekil 4.24. PDC kavitesiz tüp alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri	231
Şekil 4.25. PDC kavitesiz alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi.....	232
Şekil 4.26. PDC kavitesiz tüp ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri	233
Şekil 4.27. PDC kavitesiz tüp ve PTC alıcı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri.....	234
Şekil 4.28. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin polinom regresyon modelleri.....	238
Şekil 4.29. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin çoklu doğrusal regresyon modelleri	241
Şekil 4.30. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin destek vektör regresyon (Laplace) modelleri.....	243
Şekil 4.31. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin KNN regresyon modelleri	245
Şekil 4.32. PTC ve PDC alıcı çıkış sıcaklık sonuçları (termal analiz).....	249
Şekil 4.33. PTC ve PDC alıcı sistem deneysel performans karşılaştırılması.....	250
Şekil 4.34. PTC ve PDC alıcı sistem R^2 performans karşılaştırılması.....	251
Şekil 4.35. Sistem alıcıları ANSYS, teorik ve deneysel sonuç karşılaştırması...	252
Şekil A.1. Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol devre şeması	272
Şekil A.2. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol devre şeması	272
Şekil B.1. Parabolik oluk kolektör güneş takip algoritması.....	273
Şekil B.2. Parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımı başlangıç tanımları	274
Şekil B.3. Parabolik oluk kolektör güneş açısı fonksiyonu	274
Şekil B.4. Parabolik oluk kolektör ana (loop) fonksiyon.....	275
Şekil B.5 Parabolik çanak kolektör yazılım algoritması.....	275
Şekil B.6. Parabolik çanak kolektör güneş takip yazılımı başlangıç tanımları...	276
Şekil B.7. Parabolik çanak kolektör ana (loop) fonksiyon	276

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Yoğunlaştırıcı güneş güç sistem çeşitlerinin performans karakteristikleri.....	10
Çizelge 1.2. Yoğunlaştırıcı güneş güç sistem çeşitlerinin teknoloji karşılaştırması.....	12
Çizelge 1.3. Takip sistemi sürücü çeşitlerinin karşılaştırılması.....	30
Çizelge 1.4. Güneş ışınlam değerleri bakımından zengin ülkeler	37
Çizelge 1.5. Türkiye'nin enerji ve sosyoekonomik parametreleri	47
Çizelge 1.6. Isparta ilinin yıllık güneş ve iklim parametreleri.....	52
Çizelge 3.1. Tasarlanan parabolik oluk kolektör parametreleri	121
Çizelge 3.2. Parabolik oluk kolektör tasarım parametreleri literatür örnekleri	125
Çizelge 3.3. Parabolik oluk kolektör kesim faktörü (γ) literatür örnekleri	127
Çizelge 3.4. AC asenkron motor teknik özellikleri.....	131
Çizelge 3.5. Parabolik oluk kolektör motor tork çıkış parametre değerleri	134
Çizelge 3.6. Parabolik çanak kolektör tasarım parametreleri	154
Çizelge 3.7. AC asenkron motor ve redüktör teknik özellikleri	166
Çizelge 3.8. Redüktör devir ve yük değerleri	167
Çizelge 4.1. Parabolik oluk kolektör ısı performans parametreleri	197
Çizelge 4.2. Konik spiral alıcı ısı performans parametreleri	199
Çizelge 4.3. Kaviteli tüp alıcı ısı performans parametreleri	200
Çizelge 4.4. Kavitesiz tüp alıcı ısı performans parametreleri	201
Çizelge 4.5. PDC ve PTC alıcıları polinom regresyon model performans metrikleri	237
Çizelge 4.6. PDC ve PTC alıcıları çoklu doğrusal regresyon performans metrikleri	239
Çizelge 4.7. PDC ve PTC alıcıları destek vektör regresyon performans metrikleri	242
Çizelge 4.8. PDC ve PTC alıcıları KNN regresyon performans metrikleri	244

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Parabol genişliği
A	Yüzey alanı (Parabol)
A _a	Toplam açıklık alanı
A _b	Kolektör engelleme alanı
A _e	Kaybedilen kolektör açıklık alanı
A _f	Kolektör sapma (geometrik) faktörü
A _g	Cam kaplama alanı
A _r	Alıcı alanı
A _l	Toplam kayıp alan
AM	Hava kütle katsayısı
ANT	Anten (GPS)
bps	Saniyedeki veri (bit) miktarı
C	Yoğunlaştırma oranı
C _p	Özgül ısı
CSP	Yoğunlaştırılmış güneş gücü
COM	Ortak temas noktası (röle)
d	Julian günü
d/d	Devir/dakika
d _p	Parabol yüzey derinliği
D	Parabol açıklık uzunluğu
DNI	Direkt normal ışıınım
D _g	Alıcı tüp cam kaplama çapı
D _i	Alıcı iç çap
D _o	Alıcı dış çap
F	Odak noktası
F _s	Ağırlık kuvveti (Redüktör)
f	Odak uzaklığı
F ¹	Kolektör verim faktörü
g	Yer çekimi kuvveti
GPS	Küresel konumlama sistemi
GHI	Global yatay ışıınım
GMT	Greenwich ortalama zamanı
GND	Topraklama pini
h _c	Doğal veya zorlanmış konveksiyon katsayısı
h _{fi}	Alıcı tüp konveksiyon katsayısı
h _k	Konvektif ısı transfer katsayısı
h _p	Parabol yüzey derinliği
h _r	Radyasyon ısı transfer katsayısı
h _w	Rüzgâr konveksiyon katsayısı
I	Kolektör yüzeyine gelen ışıınım
I _D	Direkt ışıınım
I _G	Global ışıınım
I _{redüktör}	Redüktör dönüştürme oranı
k	Isıl iletkenlik katsayısı
k _f	Termal iletkenlik
L	Kolektör uzunluğu
LO	Analog giriş pini (VFD)
LI	Dijital giriş pini (VFD)

m	Kütle
$\dot{m}$	Kütlesel debi
Nu	Nusselt sayısı
Nm	Newton metre
PDC	Parabolik çanak kolektör
PTC	Parabolik oluk kolektör
Pr	Prandtl sayısı
r	Parabol yarıçapı
r_k	Redüktör kol uzunluğu
R_x	Alıcı pini (GPS)
Re	Reynolds sayısı
SVR	Destek vektör regresyonu
SVM	Destek vektör makineleri
T_a	Ortam sıcaklığı
T_g	Cam kaplama sıcaklığı
T_i	Akışkan giriş sıcaklığı
T_x	Verici pini (GPS)
U_L	Isı kayıp katsayısı
U_o	Toplam ısı transfer katsayısı
VFD	Değişken frekanslı sürücü
VCC	Pozitif güç gerilimi
VDC	Doğru akım gerilimi
V_a	Akışkan hızı
Q	Enerji toplama kapasitesi
Q_u	Yararlı ısı
α	Güneş yükseklik açısı
α_a	Absorpsiyon katsayısı
δ	Deklinasyon açısı
Δ_T	Sıcaklık farkı
ε	Emisyon katsayısı,
ε_e	Regresyon hata katsayısı
γ	Azimet açısı
γ_k	Kesim faktörü
η	Verim
μ	Dinamik viskozite
ρ	Yansıtıcılık katsayısı
ρ_{air}	Hava özkütlesi
σ_{sb}	Stefan-Boltzmann sabiti
τ	Zenit açısı
τ_g	Geçirgenlik katsayısı
φ	Enlem açısı
Φ	Işığın parabol yüzeyine gelen açısı
Φ_r	Rim açısı
Θ_A	Kuzeye göre ölçülen azimet açısı
Θ_Z	Dikeye göre ölçülen zenit açısı
Θ_{el}	Yataya göre ölçülen güneş yükseklik açısı
θ	Eğim açısı
ω	Saat açısı

1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların sosyal, ekonomik ve çevresel kalkınmasında temel bir unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Enerjinin sürdürülebilir kalkınma için vazgeçilmez olduğu ve yaşanacak bir enerji hizmet eksikliğinin ekonomik ve sosyal gelişimin ciddi şekilde sekteye uğramasına neden olacağı bilinmektedir (Kaygusuz, 2007). Bu durum, enerjiye erişimin hem bireylerin yaşam kalitesi hem de toplumların refah düzeyi üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Sanayi devriminden bu yana enerji, ekonomik büyüme ve teknolojik ilerlemenin ana itici gücü olmuştur. Bu dönemde buhar gücüne dayalı makinelerin geliştirilmesi ve kömür gibi fosil yakıtların etkin kullanımı, üretim süreçlerinin hızlanmasını ve geniş ölçekte endüstriyel faaliyetlerin mümkün hale gelmesini sağlamıştır. Bu dönemde yaşanan enerji arzındaki artış, üretim kapasitelerini önemli ölçüde artırmış ve ekonomik faaliyetlerde büyük bir sıçramayı mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, enerjiye erişimdeki sınırlamalar, bu dönemde büyüme üzerinde ciddi kısıtlamalara neden olmuş, ancak kömür gibi fosil yakıtların yoğun ve verimli kullanımı bu kısıtlamaların aşılmasında kritik bir rol oynamıştır (Stern ve Kander, 2012).

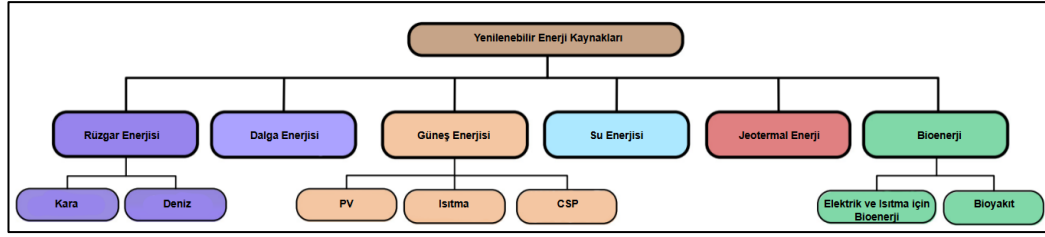
Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar sanayi devriminden bu yana ekonomik büyümenin ana enerji kaynağı olmuştur. Ancak bu kaynakların çıkarılması, taşınması ve kullanımı sırasında çevreye verdiği zararlar göz ardı edilemez boyutlardadır. Bu yakıtların yanma süreci, büyük miktarda karbondioksit ve metan gibi sera gazları salınımına neden olarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların enerji üretimi sırasında atmosfere yayılan sülfür dioksit ve nitrojen oksit gibi gazlar, asit yağmurlarına ve hava kalitesinin düşmesine yol açmaktadır. Bu etkiler hem yerel hem de küresel ölçekte ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır (Dinca vd., 2010; Atılgan ve Azapagic, 2015). Bunu yanı sıra bu fosil yakıt rezervlerinin toprak üstüne çıkarılması esnasında toprak ve su kaynakları da zarar görmektedir. Zarar gören bu kaynaklar çevresindeki biyoçeşitliliği olumsuz yönde etkilemektedir.

Fosil yakıtların çevresel zararlarının haricinde rezerv sıkıntıları da bulunmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin azalması, mevcut tüketim oranlarının devam etmesi durumunda daha karmaşık sorunlara yol açacaktır. IEA'nın World Energy Outlook

2022 raporunda, “fosil yakıtların kademeli olarak tükenmesi, maden şirketlerinin yer altındaki ulaşılması zor ve karmaşık yakıt kaynaklarına ulaşmak için daha fazla çaba göstermesini gerektirmektedir” ifadesi yer almaktadır (Agency, 2022). Bu bilgiler doğrultusunda yaşanan bu durum, yalnızca enerji arz güvenliğini değil, aynı zamanda enerji fiyatlarının dalgalanmasına da neden olmakta ve enerji kaynaklarının arz-talep dengesinde ciddi sıkıntılara yol açmaktadır.

Bu tür dengesizliklerin, enerji piyasalarında tarihsel etkilerinin en somut örneklerinden biri 1970'lerde yaşanan OPEC (Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü) enerji krizidir. 1973-1974 yıllarında yaşanan OPEC enerji krizi, dünya enerji piyasalarını kökten değiştiren tarihi bir dönüm noktasıdır. Bu dönemde OPEC ülkelerinin petrol üretimini kasıtlı olarak azaltması, arzın daralmasına ve fiyatların dört katına çıkmasına neden olmuştur. Üretim kesintileri, arz-talep dengesini önemli ölçüde bozmuş ve petrol fiyatlarındaki dramatik artış, dünya genelinde hem enflasyonu tetiklemiş hem de ekonomik büyümeyi yavaşlatmıştır. Kriz sonrası dönemde talepte bir miktar azalma gözlenmede, OPEC'in yüksek fiyat seviyelerini koruma konusundaki başarısı, örgütün petrol piyasasındaki gücünü açıkça ortaya koymuştur (Gately, 1984). Bu kriz, fosil yakıtlara olan yoğun bağımlılığın ekonomik ve politik risklerini net bir şekilde ortaya çıkarmış ve enerji politikalarının çeşitlendirilmesinin önemini gündeme getirmiştir. OPEC krizinin ardından, dünya genelinde alternatif enerji kaynaklarına yönelim hızlanmış ve enerji güvenliği konusundaki stratejiler yeniden şekillenmiştir.

Enerjiye duyulan ihtiyaç, toplumların ekonomik kalkınması, sosyal refahı ve çevresel sürdürülebilirliği için giderek daha hayati hale gelmektedir. Fosil yakıtların sınırlı doğası ve çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Yenilenebilir enerji, güneş ışığı, rüzgâr, su akışı, biyokütle ve yer altı ısısı gibi doğal süreçlerden elde edilen, sürekli yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarını ifade eder. Bu enerji kaynakları, iklim değişikliği ile mücadelede, enerji güvenliğinin sağlanmasında ve ekonomik kalkınmanın sürdürülebilir bir şekilde desteklenmesinde önemli bir role sahiptir. Şekil 1.1'de yenilenebilir enerji kaynakları gösterilmiştir (Ellabban vd., 2014).



Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları (Ellabban vd., 2014)

Enerjiye duyulan ihtiyaç, toplumların ekonomik kalkınması, sosyal refahı ve çevresel sürdürülebilirliği için giderek daha kritik bir hale gelmektedir. Ancak, geleneksel enerji kaynakları olan fosil yakıtların sınırlı doğası ve çevresel etkileri, bu kaynaklara bağımlılığın sürdürülebilir olmadığını açıkça göstermektedir. Fosil yakıtların kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına ve küresel ısınmanın hızlanmasına neden olurken, yenilenebilir enerji kaynakları sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Yenilenebilir enerji, güneş ışığı, rüzgâr, su akışı, biyokütle ve jeotermal enerji gibi doğal süreçlerden elde edilen, doğası gereği yenilenen ve çevreye zarar vermeyen enerji türlerini kapsar (Edenhofer vd., 2011).

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları, iklim değişikliğiyle mücadele ve enerji güvenliğinin artırılması gibi önemli küresel hedeflerin merkezinde yer alır. Fosil yakıt kullanımının neden olduğu karbon salınımını azaltma potansiyeline sahip olan yenilenebilir enerji, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir araçtır. Bu kaynakların kullanımı, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir ve dayanıklı hale gelmesine olanak tanır (Owusu ve Asumadu-Sarkodie, 2016).

Son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerindeki ilerlemeler, bu kaynakların benimsenmesini kolaylaştırmıştır. Sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve düşük emisyonlu enerji üretimine olan talebin artmasıyla, yenilenebilir enerji kullanımının elektrik şebekeleri için umut verici bir geleceğe sahip olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve verimliliği hem akademi hem de sanayi tarafından dikkate değer bir ilgi görmüştür. Bu gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarını yalnızca bir alternatif değil, aynı zamanda sürdürülebilir enerji geleceğinin vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir (Kuang vd., 2016).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir. Güneş, yenilenebilir enerji kaynakları arasında merkezi bir öneme sahiptir, çünkü tüm enerji kaynaklarının temel kaynağı olarak kabul edilir. Güneş enerjisi, doğrudan güneş ışınlarından fotovoltaik hücreler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir veya güneş kolektörleri yardımıyla ısı enerjisi olarak kullanılabilir. Bu enerji türü, sınırsız ve temiz bir kaynak olması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine büyük katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisinin yaygınlaştırılması, yenilenebilir enerji hedeflerinin gerçekleştirilmesi için kritik bir unsurdur.

Güneş enerjisinin bu merkezi rolü, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda enerji arz güvenliği ve ekonomik kalkınma için de büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, güneş enerjisi projelerinin yaygınlaştırılması sırasında karşılaşılan bazı ekonomik ve yapısal zorluklar dikkat çekicidir. Bu zorlukların başında Crowding-Out etkisi gelmektedir. Bu etki, kamu harcamalarının veya yatırımlarının özel sektör yatırımlarını dışladığı bir durumu ifade etmektedir. Kamu yatırımlarının, sınırlı piyasa kaynaklarını çekerek özel sektör yatırımlarını dışlama riski olduğu gibi, aynı zamanda piyasayı canlandırarak özel sektör yatırımlarını teşvik edebileceği de bilinmelidir (Deleidi vd., 2020). Kamu yatırımlarının etkisinin yönü, bu yatırımların niteliğine ve piyasa koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Enerji sektöründe crowding out etkisini azaltmanın bir yolu, kamu desteğinin doğrudan teşvikten ziyade araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yönlendirilmesidir. Ar-Ge teşvikleri, bu sistemlerde verimi atıracak ve enerji teknolojilerinin maliyetlerini düşürerek özel sektörün daha fazla yatırım yapmasına olanak sağlayacaktır.

Güneş enerji sistemlerinde verimliliği artırmaya yönelik Ar-Ge faaliyetleri Şekil 1.1'de gösterilen ısıtma, PV (Fotovoltaik) ve CSP (Yoğunlaştırılmış güneş gücü) teknolojileri olmak üzere üç başlıkta toplanmaktadır. Güneş enerjisiyle ısıtma sistemleri, sıcak su üretimi ve binaların ısıtılması gibi alanlarda düşük maliyetli çözümler sunarak verimliliği artırırken, PV sistemler güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürerek basit ve yaygın bir enerji üretim yöntemi sağlar. CSP sistemleri ise güneş ışığını yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklarda ısı üretir ve bu ısıyı türbinler aracılığıyla elektriğe dönüştürür. Özellikle CSP teknolojileri, enerji depolama kapasitesi sayesinde kesintisiz enerji arzı sağlamasıyla öne çıkmaktadır.

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) sistemlerinde verimliliği artırmak, enerji üretiminin sürekliliğini sağlamak ve ekonomik uygulanabilirliği artırmak için büyük önem taşır. Bu bağlamda, teknoloji geliştirme ve optimizasyon çalışmaları çeşitli alanlara odaklanmaktadır. CSP sistemlerinde kullanılan alıcı ve ayna çeşitleri, geometrik parametre düzenlemeleri, güneş takip yöntemleri (tek-çift eksen), yansıtıcı (oluk-çanak) çeşitleri vb. gibi araştırmalar bu sistemlerin verimini artırmada literatürde yapılan başlıca çalışma konularıdır.

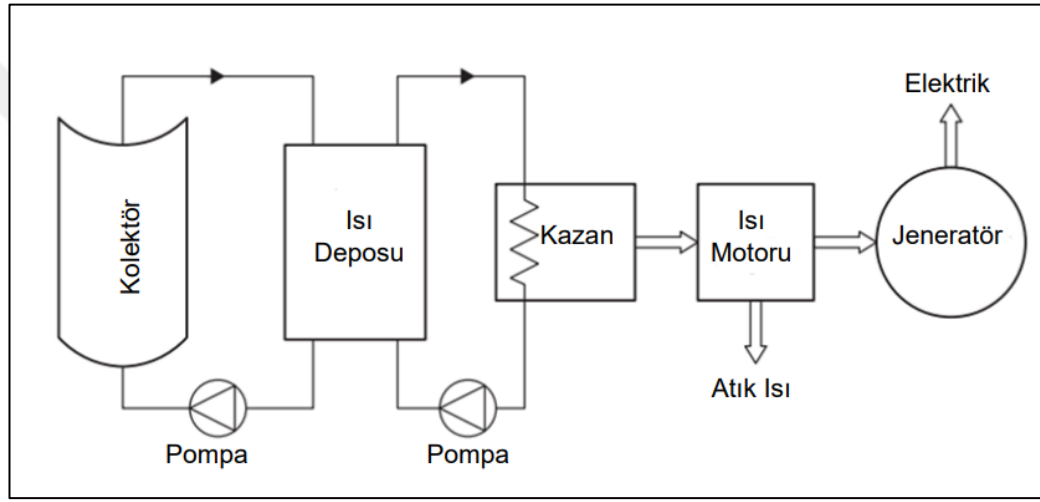
Güneş termal güç sistemleri, güneş enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Bu sistemler, genellikle büyük boyutlarda olup, güneş enerjisini yoğunlaştırarak akışkanların (genellikle su veya termal yağ) ısınmasını sağlayan güneş kolektörleri ve aynalar kullanır. Isınan akışkan, buharlaştırılabilir bir sıvı olabilir veya doğrudan bir tür türbin veya motoru çalıştırmak için kullanılabilir.

Bir güneş termal güç sistemi genellikle şu temel bileşenlerden oluşur:

- **Güneş Kolektörleri veya Aynaları:** Güneş enerjisini toplamak ve odaklamak için kullanılan bileşenlerdir. Kolektörler, güneş ışınlarını alarak akışkanı (çoğunlukla su veya termal yağ) ısıtırlar. Aynalar, güneş ışınlarını odaklayarak daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını sağlar.
- **Isı Transfer Sistemi:** Güneş kolektörlerinden gelen ısıyı taşıyan ve depolayan bir sistemdir. Bu sistem, genellikle borulardan oluşur ve ısıyı aktarırken kayıpları minimize etmek için yalıtılmış tanklar kullanılabilir.
- **Isı Depolama Sistemi:** Güneş enerjisinin depolanmasını sağlayan bir sistemdir. Bu sistem genellikle termal enerjiyi depolamak için büyük kapasiteli sıvı veya katı madde depolama tanklarından oluşur.
- **Isı Motoru veya Jeneratörü:** Isı enerjisini mekanik veya elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. Bu sistem, genellikle buhar türbinleri veya Stirling motorları gibi mekanik sistemler veya termoelektrik jeneratörler gibi termal sistemler içerebilir.
- **Soğutma Sistemi:** Isı motorundan veya jeneratöründen çıkan atık ısıyı uzaklaştıran bir sistemdir. Bu sistem, genellikle su soğutma kuleleri veya hava soğutucuları gibi yapılar kullanır.

- **Kontrol Sistemi:** Güneş enerjisi toplama ve dönüşüm süreçlerini yöneten ve optimize eden bir kontrol sistemine sahiptir. Bu sistem, güneş takip sistemlerini kontrol etmek, enerji üretimini düzenlemek ve sistemin verimliliğini artırmak için önemlidir.

Güneş termal güç sistemleri genel olarak yukarıdaki parçalardan oluşmaktadır. Ancak kullanım alanı ve tiplerine göre bunlar değişkenlik göstermektedir. Uygulama alanlarına ve çıkış sıcaklıklarına göre bu sistemler çeşitlere ayrılmaktadır. Şekil 1.2’de termal güç sistemine ait enerji dönüşüm diyagramı gösterilmiştir (Kalogirou, 2009).



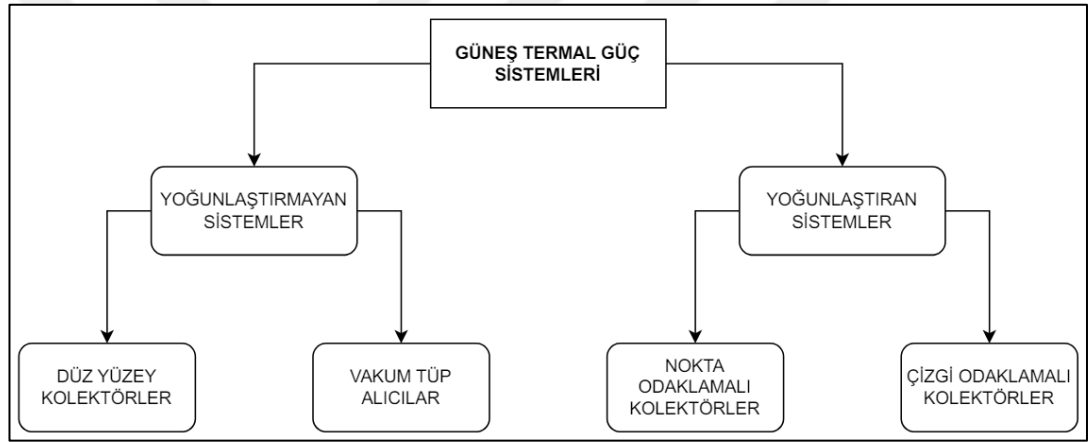
Şekil 1.2. Solar termal enerji dönüşüm diyagramı (Kalogirou, 2009)

Güneş enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi diyagramı Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Bu sistemler yoğunlaştırılmış güneş kolektörleri tarafından toplanan güneş termal enerjisinin bir ısı motorunu çalıştırmak için kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Bu sistemlerin birçoğu ayrıca ısı depolama özelliğine sahip olmakla birlikte bu depolama sayesinde güneş enerjisinin bulutlu havalarda ve gece boyunca kullanılmasına olanak tanımaktadır (Kalogirou, 2009).

1.1. Güneş Termal Güç Sistem Çeşitleri

Güneş termal güç sistemleri kullanım alanları ve çıkış güçlerine göre çeşitlere ayrılmaktadır. Güneş termal güç sistemlerinde çeşitleri oluşturan iki temel unsur sistemin güneş kolektörü ve takip tipidir.

Güneş kolektörü, güneş enerjisini toplamak ve kullanılabilir enerjiye dönüştürmek için kullanılan bir cihazdır. Verimli bir güneş kolektörü üzerine gelen güneş radyasyonunu azami düzeyde emerek çalışma akışkanına aktarırken asgari düzeyde optik ve termal kayıplara sahip olması gerekmektedir. Güneş kolektörleri genel olarak konsantre eden ve konsantre etmeyen olarak ikiye ayrılmaktadır. Konsantre etmeyen güneş kolektörleri üzerine gelen güneş ışınımını yoğunlaştırarak odaklama görevi yapmazlar. Bu sistemlerin verimleri kolektörün boyutu ile doğru orantılıdır. Konsantre eden güneş kolektörlerinde ise kolektör üzerine gelen güneş radyasyonu yoğunlaştırarak daha küçük bir alıcı üzerine yansıtılır. Alıcı içerisinde sirküle olan çalışma sıvısı veya gazı ısıtılarak dolaylı şekilde enerji üretimi gerçekleştirilir. Şekil 1.3'te güneş termal güç sistem çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Güneş termal güç sistem tipleri

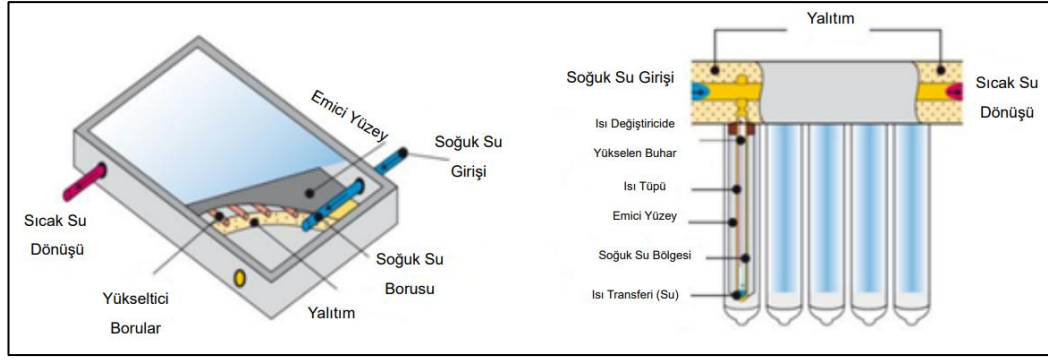
1.1.1. Yoğunlaştırmayan sistemler

Yoğunlaştırmayan güneş enerjisi sistemleri, güneş enerjisini toplamak ve kullanmak için yoğunlaştırma aynaları veya lensler kullanmayan sistemlerdir. Bu sistemler genellikle evlerde, işyerlerinde ve diğer küçük ölçekli uygulamalarda kullanılan basit ve ekonomik güneş enerjisi çözümleridir. Bu sistemler genellikle düz yüzeyli güneş kolektörlerinden oluşur. Bu kolektörler, güneş ışığını doğrudan emerek ve ısı enerjisine dönüştürerek suyu veya başka bir akışkanı ısıtır. Isınan su veya akışkan daha sonra kullanım için depolanabilir veya bir ısıtma sistemi veya sıcak su tankı gibi bir sistemde kullanılabilir.

Yoğunlaştırmayan güneş enerjisi sistemleri genellikle düşük maliyetli ve bakım gerektirmeyen çözümler sunar. Bu sistemler, güneş enerjisinden yararlanmak isteyen ancak yoğunlaştırma sistemlerinin karmaşıklığı veya maliyeti nedeniyle bu seçeneği tercih etmeyen kişiler için idealdir. Ayrıca, yoğunlaştırmayan sistemler çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi yoğunlaştırmayan sistemler, düz yüzey kolektörler ve vakum tüp alıcılar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Düz yüzey kolektör sistemlerinin tasarımı basittir. Bakır borulardan oluşan ve paralel olarak çalışan bir boru dizisine sahiptir. Sıvı, bu borular boyunca akar. Kutunun üst kısmında koyu renkli bir emici plaka bulunur ve kutunun geri kalan yüzeyleri, ısı kayıplarını önlemek için yalıtılmıştır. Güneşten gelen radyasyonu emerek, borular içinde dolaşan suyu ısıtır. Bu tür kolektörler genellikle tankların, havuzların veya küvetlerin ısıtılması gibi sıcaklığın çok yüksek olmadığı evsel amaçlar için kullanılmakta ve genellikle günısı olarak adlandırılmaktadır.

Vakum tüplü alıcılar ise güneş enerjisini emerek ve depolayarak su veya başka bir sıvıyı ısıtmak için kullanılan bir güneş enerjisi toplama cihazıdır. Bu tür kolektörler, vakum altında çalışan bir boru yapısından oluşur. Her bir boru, içinde sıvı taşıyan bir boru (ısı borusu) içerir ve bu borular genellikle siyah bir malzeme ile kaplanmıştır, böylece güneş ışığı daha iyi absorbe edilmektedir. Isı borusundaki sıvı ısındıkça, bu ısı sıvının aktığı suya aktarılır.

Vakum tüp kolektörleri, vakumun ısı kayıplarını önleyici etkisinden faydalanır. Vakum, ısı iletimini engeller, bu da kolektörün içindeki sıvının daha hızlı ve daha etkili bir şekilde ısınmasını sağlar. Bu tür kolektörler genellikle güneş enerjisiyle su ısıtmak için kullanılır, ancak bazı uygulamalarda ısıtma sistemlerinde (Parabolik oluk kolektörler vb.) de kullanılabilirler. Düz Yüzey ve vakum tüp alıcıları karşılaştırıldığında vakum tüplü alıcıların soğuk iklimlerde düz yüzey kolektörlere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bunun nedeni düz yüzey alıcılarda çalışma suyunun kolektörde daha fazla kalmasıdır. Bu nedenle soğuk havalarda ısıtılan sudaki ısı kayıpları daha fazla olmaktadır. Şekil 1.4'te düz yüzey ve vakum tüp alıcıları gösterilmiştir (Cebotari, 2015).



Şekil 1.4. Düz yüzey (sol) ve vakum tüplü alıcı (sağ) modeli (Cebotari, 2015)

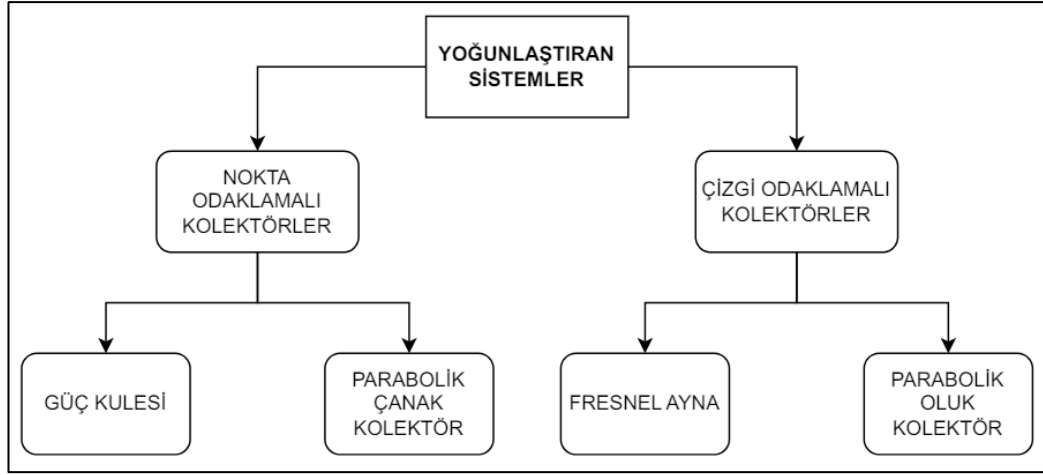
Şekil 1.4’te solda düz yüzey kolektör sağ tarafta ise vakum tüplü alıcı gösterilmiştir. Her iki sistemde de soğuk ve sıcak su girişleri bulunurken sistemleri ayıran fark ısıtıcı boruların yalıtım ve içerisinde su kalma süreleridir. Sistemlerde ısıtılan su besleme tankına gönderilerek tankta bulunan suyun ısıtılması amaçlanmaktadır.

1.1.2. Yoğunlaştıran sistemler

Yoğunlaştıran güneş enerjisi sistemleri, güneş enerjisini toplamak ve odaklamak için aynalar veya lensler gibi yoğunlaştırma cihazları kullanan sistemlerdir. Bu sistemler, güneş ışığını yoğunlaştırarak daha küçük bir alana odaklar ve bu sayede daha yüksek sıcaklıklar elde etmektedir. Elde edilen yüksek sıcaklık ise buhar üretmek veya termal enerji ile elektrik üretmek için kullanılmaktadır.

Yoğunlaştırıcı sistemler parabolik oluklu kolektörler, güneş kuleleri, parabolik çanak ve fresnel ayna gibi farklı tasarımlarda görülmektedir. Bu sistemler daha çok büyük ölçekli enerji üretimi için kullanılmaktadır.

Yoğunlaştırıcı sistemlerin avantajları arasında yüksek verimlilik, yüksek sıcaklıklarda çalışma yeteneği ve enerji depolama kapasitesi bulunmaktadır. Yoğunlaştırıcı sistemlerin maliyeti ve karmaşıklığı düşük ölçekli (yüksek sıcaklığa gerek olmayan) uygulamalar için uygun değildir. Bu nedenle, genellikle büyük ölçekli enerji santralleri veya endüstriyel tesislerde kullanılmaktadırlar. Şekil 1.5’te yoğunlaştıran sistemlerin çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Yoğunlaştıran sistem çeşitleri

Şekil 1.5'te gösterilen yoğunlaştırmalı sistem çeşitleri genel olarak termal enerjiden elektrik enerjisi üretmek amacıyla tasarlanmaktadır. Tasarlanacak sistem çeşidi, projede istenen çıkış gücü, sistemin kurulacağı alanın boyutu, bütçe vb. koşullara göre seçilmektedir. Çizelge 1.1'de yoğunlaştırmalı güneş güç sistem çeşitlerinin performans karakteristikleri verilmiştir (Kalogirou, 2009).

Çizelge 1.1. Yoğunlaştırmalı güneş güç sistem çeşitlerinin performans karakteristikleri (Kalogirou, 2009)

Sistem	Çıkış Güç Aralığı (MW)	Yoğunlaştırma Oranı (C)	Asgari Verimlilik Seviyesi (%)	Güneş-Elektrik Verimlilik Seviyesi (%)	Kullanılan Alan (m ² / MWh a)
Parabolik Oluk	10-200	70-80	21	10-15	6-8
Fresnel Ayna	10-200	25-100	20	9-11	4-6
Güç Kulesi	10-150	300-1000	20	8-10	8-12
Parabolik Çanak	0.01-0.4	1000-3000	29	16-18	8-12

Çizelge 1.1'de verilen çıkış güç aralığı (MW), sistemin kurulu güç kapasitesinin bir aralığını ifade eder. Bu değer, güneş enerjisini odaklayarak yüksek sıcaklıklar elde eden ve bu sıcaklıkları elektrik enerjisine dönüştüren sistemler için kullanılır. Yoğunlaştırma oranı, güneş ışınlarını odaklamak için kullanılan aynalar veya lenslerin ne kadar güçlü bir şekilde odaklandığını ifade eder. Bu sistemler, güneş ışınlarını daha küçük bir alana yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklar elde etmeyi amaçlar. Bu oran kolektör alanı ile alıcı alanı arasındaki bağıntı ile hesaplanmaktadır. Asgari verimlilik seviyesi (%), güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin maksimum verimlilik seviyesini ifade eder. Bu değer, bir güneş enerjisi sisteminin güneş ışığını elektriğe veya ısıya

dönüştürme yeteneğinin en üst düzeyde olduğu noktayı gösterir. Genellikle yüzde cinsinden ifade edilir. Güneş-Elektrik Verimlilik Seviyesi ise güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan sistemlerin verimlilik seviyesini ifade eder. Bu değer, bir güneş enerjisi sisteminin gelen güneş enerjisini elektrik enerjisine ne kadar verimli bir şekilde dönüştürebildiğini gösterir. Genellikle yüzde cinsinden ifade edilir. Asgari verimlilik Seviyesi ile Güneş-Elektrik verimlik seviyesi sıkça birbirleri ile karıştırılmaktadır. Bu terimlerden asgari verimlilik seviyesi, bir güneş enerjisi sisteminin maksimum verimlilik seviyesini ifade eder. Bu değer, sistemin güneş enerjisini toplamak ve kullanmak için tasarlandığı en iyi koşullarda elde edilebilecek en yüksek verimliliği gösterir. Güneş-Elektrik verimlik seviyesi terimi ise, bir güneş enerjisi sisteminin elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğini ifade eder. Bu değer, sistemin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğini gösterir. Asgari verimlilik seviyesi terimi sistemin genel verimliliğini, Güneş-Elektrik verimlik seviyesi terimi ise elektrik üretme verimliliğini belirtir. Her iki terim de güneş enerjisi sistemlerinin performansını değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Son olarak Çizelge 1.1’de verilen kullanılan alan ($m^2/MWha$) ise bir enerji üretim yönteminin belirli bir enerji miktarını üretmek için gereken toplam arazi miktarını ifade eder. Bu değer, megavatsaat başına yılda kullanılan alanı ölçer ve genellikle çevresel etkilerin değerlendirilmesinde ve enerji karşılaştırmalarında kullanılır.

Çizelge 1.1’de bulunan sistem çeşitlerinin performans karakterleri incelendiğinde parabolik oluk, fresnel ayna ve güç kulesi sistemlerinin çıkış güç aralıkları ortalama 10-200 MW aralığında olduğu görülmektedir. Parabolik çanak sisteminin ise çıkış güç aralığı 0.01-0.4 değeri ile karşılaştırılan diğer sistemlere göre düşük kalmaktadır. Buna rağmen parabolik çanak sistemlerinin yoğunlaştırma oranının yüksek olmasından kaynaklı asgari verimlilik seviyesi % 29 ile diğer sistemlerin üstündedir. Sonuç olarak yüksek güç aralığı gerektiren projeler için parabolik oluk kolektör, fresnel ayna ve güç kulesi sistemleri daha uygun iken küçük güç ölçekli sistemler için parabolik çanak sistemlerinin kullanılması daha uygundur. Ancak parabolik çanak sistemlerinin çoğaltılması sonucunda yüksek güç çıkış aralıkları da elde edilebilir. Çizelge 1.2’de yoğunlaştırıcı güneş güç sistem çeşitlerinin ayrıntılı karşılaştırması verilmiştir (Jradi ve Riffat, 2014).

Çizelge 1.2. Yoğunlaştırıcılı güneş güç sistem çeşitlerinin teknoloji karşılaştırması (Jradi ve Riffat, 2014)

Parametre	Parabolik Oluk	Fresnel Ayna	Güç Kulesi	Parabolik Çanak
Odaklama Tipi	Çizgisel	Çizgisel	Noktasal	Noktasal
Emici Alıcı Tipi	Hareketli	Sabit	Sabit	Hareketli
Optik Verim	70-80 %	<70 %	<70 %	75-85 %
Çalışma Akışkanı	Su, Buhar, Yağ	Su, Buhar	Su, Buhar, Hava	Hava
Çıkış Isı Sıcaklığı	400 °C Üstü	400 °C Üstü	500 °C Üstü	900 °C Üstü
Yoğunlaştırma Oranı	50-90	35-170	600-1000	3000 Üstü
Geliştirme Durumu	Ticari	Ticari	Yarı Ticari	Prototip
Malzeme Gereksinimi (kg/m ²)	120-140	30-130	100-250	300-400
Arazi Kullanım Faktörü	0.25-0.4	0.6-0.8	0.2-0.25	0.2-0.25
Entegre Depolama Seçenekleri	Su, Eriyik Tuz, Faz Değiştiren Malzeme	Faz Değiştiren Malzeme, Su	Eriyik Tuz, Karışım, Faz Değiştiren Malzeme	-

Çizelge 1.2’de verilen farklı yoğunlaştırıcılı güneş güç sistemlerine ait teknoloji parametrelerinden odaklama tipi, sistem kolektörünün güneş radyasyonunu alıcıya nasıl odakladığını belirtirken, emici alan tipi, güneş ışınlarını emerek enerjiyi absorbe eden ve bu enerjiyi çalışma akışkanına ileten alıcıların tipini belirtir. Güneş kolektörlerinde kullanılan alıcılar hareketli veya sabit olmak üzere iki çeşittir. Hareketli alıcılar, güneş ışınlarının hareket ettiği bir yörüngede izler ve güneş ışınlarını en verimli şekilde toplamak için hareket eder. Sabit alıcılar ise güneş ışınlarının yoğun olduğu bir açıda sabitlenerek güneş ışınlarını toplarlar. Emici alan tipi, güneş kolektörlerinin tasarımında ve performansında önemli bir rol oynar, çünkü alıcı tipi, güneş enerjisinin toplanması ve verimli bir şekilde kullanılmasında büyük etkiye sahiptir. Diğer bir faktör olan optik verimlilik ise bir güneş enerjisi toplayıcısının güneş ışınlarını toplama ve odaklama yeteneğini belirtir. Optik verimlilik, toplanan ışık miktarının (alıcı üstüne yansıtılan) toplama yüzeyine düşen ışık miktarına (kolektöre düşen ışık) oranı olarak ifade edilir. Yani, ne kadar çok güneş ışığı toplanırsa, optik verimlilik o kadar yüksek olur. Optik verimlilik, genellikle yüzde olarak ifade edilir ve yüksek optik verimliliğe sahip bir sistem, daha fazla güneş enerjisi toplar. Geliştirme durumu ise bir ürünün veya teknolojinin geliştirme sürecindeki konumunu ifade eder. Çizelgede belirtildiği üzere üç farklı aşaması bulunmaktadır. Bunlar;

- **Ticari:** Bu aşamada ürün veya teknoloji, piyasada mevcut ve ticari olarak satın alınabilir durumdadır. Üretim ve dağıtım süreçleri tamamlanmış ve kullanıcılar tarafından satın alınabilir durumdadır.
- **Yarı-ticari:** Bu aşamada ürün veya teknoloji, ticari olarak mevcut olmasa da bazı pazarlarda sınırlı bir şekilde kullanılmakta veya satılmaktadır. Üretim süreci belirli bir seviyede tamamlanmış olsa da genellikle hala geliştirilmeye devam edilmektedir.
- **Prototip:** Bu aşamada ürün veya teknoloji, prototip aşamasındadır ve genellikle daha geniş bir kitleye tanıtılmak ve geri bildirim almak amacıyla gösterimler yapılmaktadır. Ürün veya teknoloji hala geliştirme aşamasındadır ve ticari olarak satışa sunulmamıştır.

Diğer bir parametre de malzeme gereksinimidir. Malzeme gereksinimi, sistemlerin kurulumu ve yapılandırılması için gereken malzeme miktarını belirtir. Bu sistemler genellikle büyük ölçekli olduğundan, kurulum aşamasında ihtiyaç duyulan malzemelerin miktarı önemli olabilir. Bu terim, güneş kolektörlerinin, aynaların, destek yapılarının ve diğer bileşenlerin kurulumu için gereken malzeme miktarını ifade eder. Arazi kullanım faktörü ise bir güneş enerjisi tesisinin kurulumunda kullanılan alanın, toplam arazi alanına oranını ifade eder. Bu faktör, güneş enerjisi tesislerinin ne kadar yer kapladığını ve arazi kullanımını ne kadar etkilediğini gösterir. Özellikle büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri için önemli olan bu faktör, tesislerin planlanması ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Daha yüksek bir arazi kullanım faktörü, daha fazla arazi kullanımı anlamına gelirken, daha düşük bir faktör daha az arazi kullanımı anlamına gelmektedir. Bu faktör, güneş enerjisi tesislerinin sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Örneğin, bir güneş enerjisi tesisi planlanırken, kullanılacak arazi miktarı ve çevresel etkileri dikkate alınarak faktör oranı hesaplanabilir. Bu sayede, tesisin çevresel etkileri en aza indirgenerek optimum arazi kullanımı sağlanabilir.

Son olarak entegre depolama sistemleri terimi, güneş enerjisi sistemlerinde ısı veya elektrik enerjisinin depolanması için kullanılan entegre depolama çözümlerini ifade etmektedir. Bu seçenekler, güneş enerjisi tesislerinde üretilen enerjinin depolanmasını ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda kullanılmasını sağlar. Güneş enerjisi

sistemlerinde entegre depolama seçenekleri termal veya elektrik enerjisi depolama sistemlerini içerir. Termal depolama seçenekleri arasında eriyik tuzlar, su tankları veya faz değıştiren malzemeler gibi malzemelerle çalışan termal depolama sistemleri bulunur. Bu sistemler, güneş enerjisi tesislerinden elde edilen ısı enerjisini depolayarak, gece veya bulutlu günlerde enerji talebini karşılamak için kullanılır.

Çizelge 1.2’de verilen farklı teknolojilere ait güneş güç sistemleri incelendiğinde optik verim oranları en yüksek olan parabolik oluk ve parabolik çanak sistemler olduğu görülmektedir. Bunun nedeni söz konusu sistemlerin emici alan tiplerinin hareketli olmasından kaynaklıdır. Hareketli bir alıcıya sahip sistemler yani güneş tek veya çift ekseninde takip eden sistemler güneş ışınımını daha fazla absorbe ettiğinden optik verim oranları diğer sistemlere göre daha yüksek olmaktadır.

Malzeme gereksinimi açısından bakıldığında en düşük gereksinime sahip sistem fresnel ayna iken en yüksek ise parabolik çanak sistem olmaktadır. Ancak arazi kullanım faktör oranı en yüksek fresnel ayna sistemi olurken en az faktör ise parabolik çanak sistemlere aittir. Arazi kullanımı olarak fresnel aynalı sistemler arazinin ortalama %70’i kullanırken bu oran parabolik çanakta %22 olmaktadır. Her ne kadar malzeme gereksinimi olarak fresnel sistemlerin avantajı olsa da gerek arazi kullanım faktörü gerek Çizelge 1.1’de verilen verimlilik faktörü açısından parabolik çanak sistemler daha avantajlı olmaktadır.

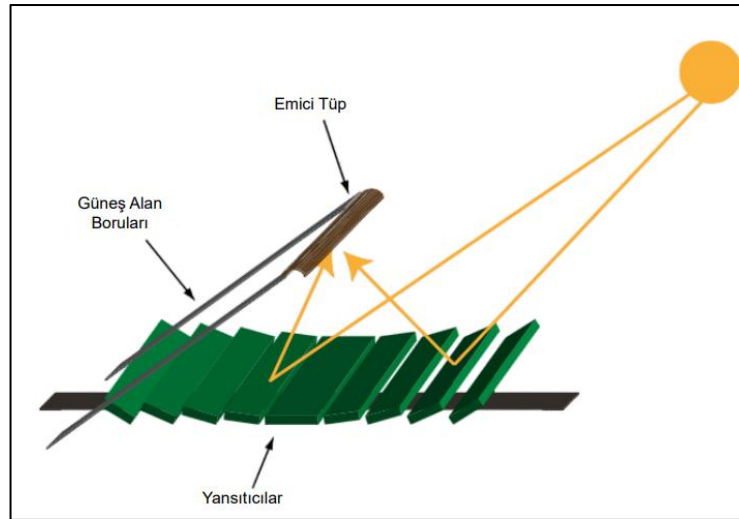
1.1.2.1. Fresnel ayna sistemleri

Linear fresnel yansıtıcılar (LFR), güneş enerjisini toplamak ve odaklamak için kullanılan bir tür güneş konsantratördür. Parabolik oluk kolektörleri gibi, güneş ışınlarını odaklamak için optik aynalar kullanır ancak parabolik oluklardan farklı olarak, bir dizi düz ayna kullanarak odaklama sağlar.

LFR, güneş ışığını yansıtıcıların ortak bir odak noktasında bulunan sabit bir alıcıya yönlendirmek amacıyla uzun, ince ayna segmentleri kullanmaktadır. Bu aynalar, güneş enerjisini normal yoğunluğunun yaklaşık 30 katına yoğunlaştırma yeteneğine sahiptir. Bu yoğunlaştırılmış enerji, alıcı vasıtasıyla bir ısı taşıyıcı akışkana aktarılır.

Akışkan daha sonra bir buhar jeneratörüne güç sağlamak için bir ısı eşanjöründen geçer (Bayraktar vd., 2023).

LFR, son yıllarda büyük ilgi gören ve orta sıcaklık güneş termal uygulamaları için oldukça etkili ve umut verici olduğunu kanıtlamış olan başka bir güneş enerjisi konsantrasyon teknolojisidir. Lineer fresnel yansıtıcılarda, PTC (Parabolic Trough Collector) (Parabolik Oluk Kolektör) kolektörlerinde olduğu gibi, sistem alıcısı en kritik bileşendir ve alıcının doğru tasarımı, etkili ve güvenilir bir yoğunlaştırma performansı için hayati önem taşır. Alıcı tüpü için seçici bir kaplama uygulamak, güneş ışınlarının emilimini artırmakta ve alıcı hattından geçen çalışma sıvısından kaynaklı termal kayıpları azaltmaktadır (Jradi ve Riffat, 2014). Alıcı için uygulanacak seçici kaplama ise güneş enerjisi kolektörlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu kaplama, güneş ışınlarını absorbe ederken uzun dalga boyuna sahip kızılötesi radyasyonu yansıtan ve emmeyen bir yüzey oluşturur. Bu sayede, absorbe edilen güneş ışınlarının neredeyse tamamı alınırken, yüzeyden yayılan ısı kaybı minimum düzeyde tutulur. Bu, kolektör verimliliğini artırır ve daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını sağlar. Şekil 1.6’da lineer fresnel yansıtıcı gösterilmiştir (GRE, 2023).



Şekil 1.6. Lineer fresnel yansıtıcı (GRE, 2023)

Şekil 1.6’da gösterildiği gibi lineer fresnel yansıtıcılar temelde üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar;

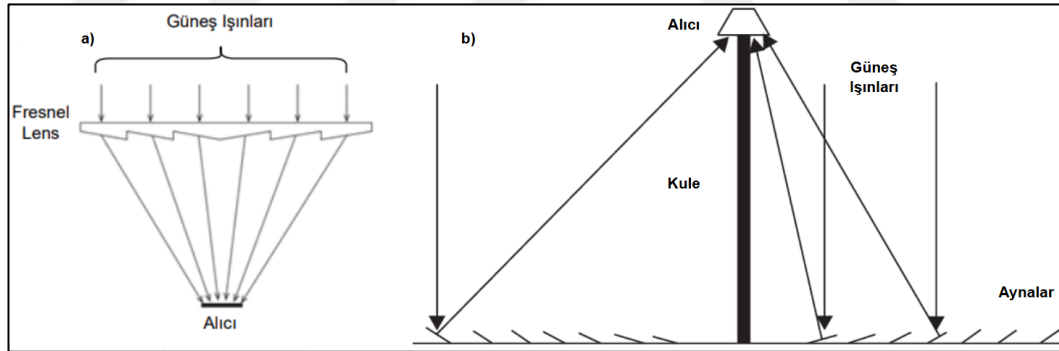
- **Düz veya hafif eğimli yansıtıcı aynalar:** Bu aynalar, genellikle cam veya alüminyum reflektif yüzeye sahip parçalardır ve güneş ışığını toplayıp

odaklamak için kullanılır. Aynalar genellikle yatay bir hatta sıralanır ve güneş ışığını alıcıya yansıtacak şekilde ayarlanır.

- **Odaklayıcı veya toplayıcı sistem:** Bu sistem, yansıtılan güneş ışığını toplar ve bir noktaya odaklar. Bu odak noktasında, genellikle bir boru veya tüp şeklinde olan alıcı bulunur.
- **Isı alıcı veya alıcı boru:** Bu bölüm, odaklanmış güneş ışığını emer ve içinden ısı transfer sıvısı geçirilerek ısı enerjisi üretilir. Isı alıcı genellikle boru veya tüp şeklindedir ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden yapılır.

Bu parçalar, güneş enerjisini toplamak ve termal enerjiye dönüştürmek için bir araya getirilir. Lineer fresnel yansıtıcılar, parabolik oluklu kolektörlere kıyasla daha basit yapılara sahip olup, genellikle orta ölçekli güneş termal enerji santrallerinde kullanılır.

Fresnel kolektörlerin, fresnel lens kolektörü (FLC) ve LFR olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Şekil 1.7’de fresnel lens kolektörü (FLC) ve lineer fresnel yansıtıcı (LFR) gösterilmiştir (Kalogirou, 2009).



Şekil 1.7. Fresnel lens kolektörü (a) ve lineer fresnel reflektör (b) (Kalogirou, 2009)

Fresnel lens kolektörü (FLC), güneş ışınlarını toplamak için özel olarak tasarlanmış bir lens kullanır. Bu lens, ışığı bir odak noktasına yoğunlaştırmak için yüzeyindeki özel şekiller ve yarıklarla yapılmıştır. Lensin arkasında genellikle bir emici bulunur, bu da güneş ışınlarını emer ve kendisini ısıtır. FLC'ler genellikle bir nokta alıcıyı ısıtmak için kullanılır ve genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilir.

Lineer fresnel yansıtıcı (LFR) ise güneş ışınlarını toplamak için bir dizi lineer aynadan oluşur. Bu aynalar, güneş ışınlarını bir lineer alıcıya odaklamak için tasarlanmıştır. LFR sistemleri genellikle daha büyük alanlara yayılmıştır ve daha düşük sıcaklıklarda

alışan sistemler için kullanılır. Her iki sistem de güneş enerjisini toplamak için etkili ve verimli bir şekilde kullanılabilmekte ve diğeryoğunlaştırıcıli sistemlere göre avantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- **Maliyet:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, parabolik aynalara göre daha düşük maliyetlidir. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin kurulum ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır.
- **Daha Kolay retim ve Montaj:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, karmaşık eğimli yüzeyle sahip parabolik aynalara göre daha kolay üretilbilir ve monte edilebilir.
- **Yerleşim Esnekliğı:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, genellikle düz veya hafif eğimli zeminlere monte edilebilir. Bu da daha fazla yerleşim esnekliğı sağılar.
- **Yapısal Gereksinim:** Parabolik aynalara göre, Fresnel lensleri ve lineer aynaların daha düşük yapısal gereksinimleri vardır, bu da daha az miktarda destek ve yapısal güçlendirme gerektirir.
- **İklim ve evresel Dayanıklılık:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, parabolik aynalara göre daha dayanıklıdır ve az bakım gerektirir.

Yukarıda belirtilen avantajların yanında bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlar;

- **Optik Verimlilik:** Parabolik aynalara kıyasla, Fresnel lensleri ve lineer aynaların optik verimliliğı daha düşüktür. Bu, toplanan güneş enerjisinin tam olarak kullanılmasını zorlaştırabilmektedir.
- **Bakım Gereksinimi:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, zamanla kirlenmeye ve hasara karşı daha duyarlı olmaktadır. Bu nedenle düzenli bakım ve temizlik gerektirmektedir.
- **Alan Kaplaması:** Fresnel lensleri ve lineer aynalar, izelge 1.2’de verildiğı üzere parabolik aynalara kıyasla daha geniş bir alanı kaplar. Bu da, arazinin daha fazla kullanılmasını gerektirmektedir. (Arazi kullanım faktörü)

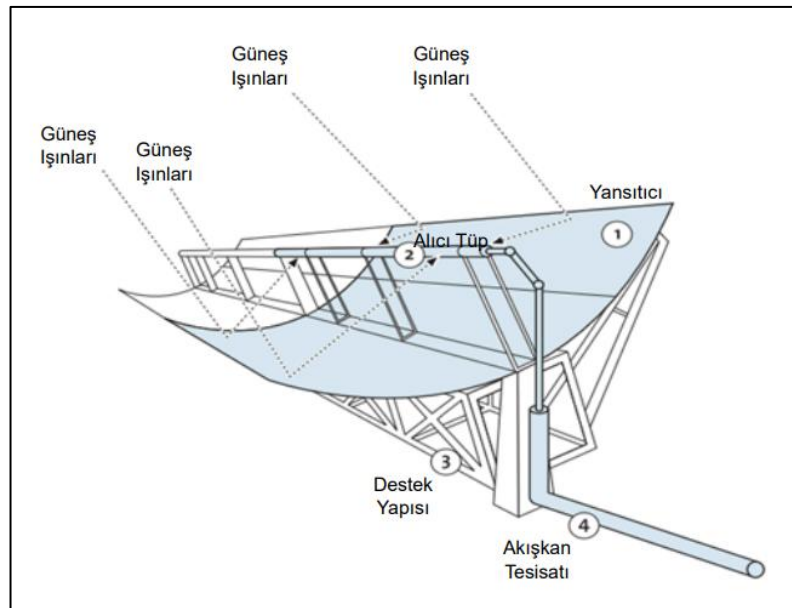
Bu dezavantajlar ve avantajlar, Fresnel lens ve lineer ayna sistemlerini seçerken dikkat edilmesi gereken faktörlerdir. Her bir sistemin avantajları ve dezavantajları,

kullanılacağı uygulamaya ve projenin gereksinimlerine bağlı olarak değerlendirilmelidir.

1.1.2.2. Parabolik oluk kolektör

Parabolik oluk kolektörü, güneş enerjisini toplamak ve kullanmak için kullanılan bir tür güneş kolektörüdür. Bu kolektörler genellikle büyük, çanak şeklinde parabolik bir ayna ile bir araya getirilmiş bir boru veya tüp içeren bir yapıdan oluşur. Parabolik ayna, güneşten gelen ışığı odaklamak için özel olarak tasarlanmıştır ve ışınları bir odak noktasına çizgisel olarak odaklar. Bu odak noktasında bulunan boru veya tüp, genellikle termal bir akışkan içerir ve güneşten gelen ışınların yoğunlaştırılmış enerjisini absorbe eder.

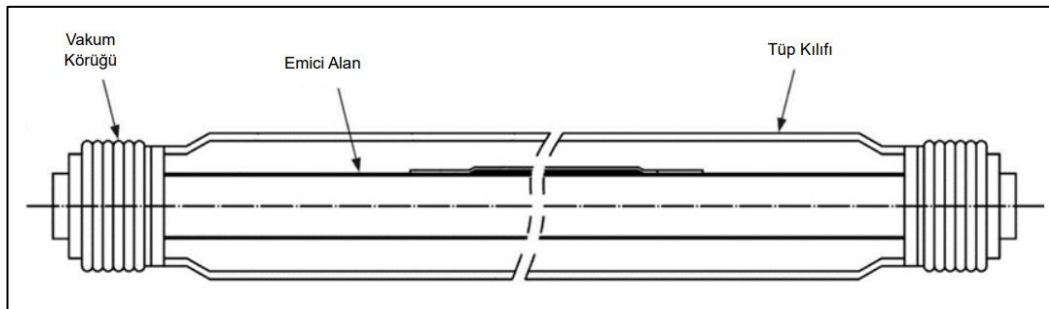
Yüksek verimlilik ile yüksek sıcaklıklar elde etmek için yüksek performanslı bir güneş kolektörüne ihtiyacımız vardır. Parabolik oluk kolektörler (PTC) ile 400 °C'ye kadar olan termal ısıtma uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. PTC'ler etkili bir şekilde 50 ila 400 °C arasındaki sıcaklıklarda ısı üretebilirler. Parabolik oluk kolektörleri, yansıtıcı bir malzeme levhasının parabolik bir şekle bükülmesiyle yapılmaktadır. Isı kayıplarını azaltmak için de vakumlu bir cam mahfaza ile kaplanmış siyah bir metal tüp, alıcı tüpün odak çizgisine yerleştirilir. Şekil 1.8'de bir parabolik oluk kolektör (PTC) ve bu kolektöre ait sistem parçaları gösterilmiştir (SolarMillennium, 2008).



Şekil 1.8. Parabolik oluk kolektör ve sistem parçaları (SolarMillennium, 2008)

Şekil 1.8’de gösterilen parabolik oluk kolektör parçalarından reflektör (yansıtıcı), güneş ışınlarını toplayıp alıcıya odaklamak için kullanılan önemli bir bileşendir. Yansıtıcı malzemeden yapılan (alüminyum, gümüş kaplama, metalik alaşımlar vb.) ve parabolik bir şekil verilmiş olan reflektörler, güneş ışınlarını toplayarak alıcıya odaklar. Bu sayede, güneşten gelen ışınlar daha fazla yoğunlaştırılır ve alıcı boru boyunca dolaşan akışkanın daha yüksek sıcaklıklara ulaşması sağlanır. Reflektörlerin iç yüzeyleri özel bir yansıtıcı kaplama ile kaplanır ve bu kaplama, güneş ışınlarını daha etkili bir şekilde yansıtarak sistem verimliliğini artırır. Reflektörlerin yapısının sağlam olması ve doğru bir şekilde hizalanması, güneş ışınlarının düzgün bir şekilde toplanmasını sağlar. Bu da kolektörün verimliliğini artırır ve daha fazla ısı üretmesini sağlar.

Parabolik oluk kolektörlerde, güneş ışınlarını toplamak ve enerjiyi emmek için kullanılan ana bileşen ise alıcı tüptür. Bu tüp genellikle borosilikat cam veya metalden yapılmış boru şeklindedir ve parabolik oluk kolektörün odak noktasında yer alır. Alıcı tüp, yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir iç yüzeye sahiptir ve güneş ışınlarını emmek için genellikle siyah bir yüzeye sahiptir. Bu siyah yüzey, güneş ışınlarını daha iyi emer ve ısıyı absorbe eder. Boru içinde dolaşan bir akışkan (genellikle su veya termal yağ) bu ısıyı alır ve bir ısı değiştirici aracılığıyla kullanılabilir ısıya dönüştürür. Alıcı tüp, parabolik oluk kolektörlerin ana performansını belirleyen bir faktördür. Tasarımı ve malzemesi, kolektörün verimliliği ve dayanıklılığı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yüksek kaliteli malzemeler ve etkili bir tasarım, daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla enerji toplamaya ve daha uzun ömürlü bir sistem sağlamaya yardımcı olabilir. Şekil 1.9’da bir parabolik oluk kolektöre ait alıcı tüp ve cam kaplaması gösterilmiştir (Forristall, 2003).



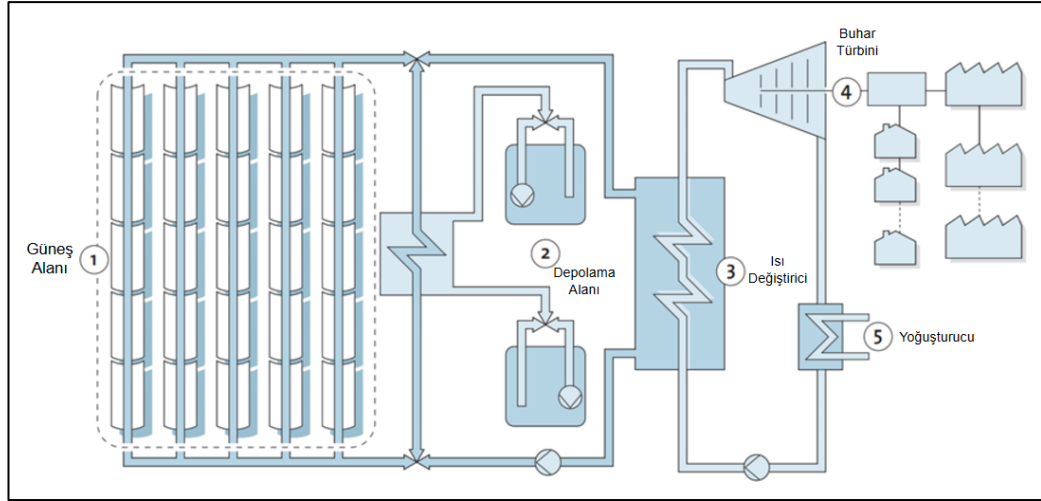
Şekil 1.9. Parabolik oluk kolektör alıcı tüp ve cam kaplama (Forristall, 2003)

Şekil 1.8’de 3 ve 4 numaralı olarak gösterilenler ise sırasıyla metal yapı ve su sistem kurulumlarıdır. Parabolik oluk kolektörler iskelet olarak metal veya daha hafif bir malzeme olan alüminyumdan yapılırlar. Sistem ne kadar hafif olursa kolektörü döndürmek için ihtiyaç olunan eksen motor tork kuvveti o kadar az olacaktır.

Parabolik oluk kolektör sistemleri genel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- **Güneş Alanı:** Solar alan veya diğer ismi ile güneş alanı, parabolik oluk kolektörlerin bulunduğu ve güneş ışığını topladığı alandır. Bu alanda, isteğe veya projeye bağlı olarak yüzlerce veya binlerce parabolik oluk kolektörü bir araya getirilir. Parabolik oluklar, güneş ışığını odaklamak için parabolik aynalarla donatılmıştır ve güneş ışığını bir absorber (alıcı) tüpüne yansıtır.
- **Depolama Sistemi:** Depolama sistemi, güneş enerjisinin toplandığı ve depolandığı bir sistemdir. Bu sistem termal enerjiyi depolamak için kullanılır. Güneş ışığından elde edilen ısı, termal yağ veya erimiş tuz gibi bir akışkan aracılığıyla bir termal depoya aktarılır. Bu depo, enerjinin ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmesi için enerjiyi depolar.
- **Güç Bloğu:** Güç bloğu, termal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yerdir. Depolanan ısı, bir ısı değiştirici aracılığıyla bir akışkan üzerinde çalışır ve bu akışkan buhar türbinlerini döndürerek elektrik üretir. Güç bloğu genellikle bir elektrik jeneratörü içerir ve elektrik enerjisini kullanıma sunar.

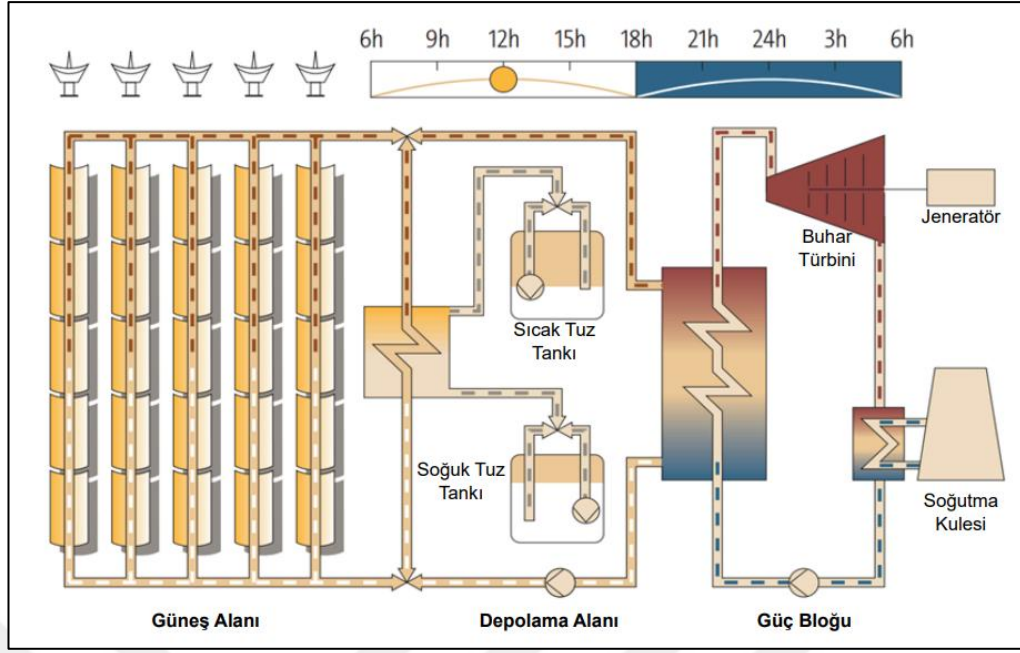
Şekil 1.10’da parabolik oluk kolektör sistemi ana kısımları gösterilmiştir (SolarMillennium, 2008).



Şekil 1.10. Parabolik oluk kolektör sistem temel kısımları (SolarMillennium, 2008)

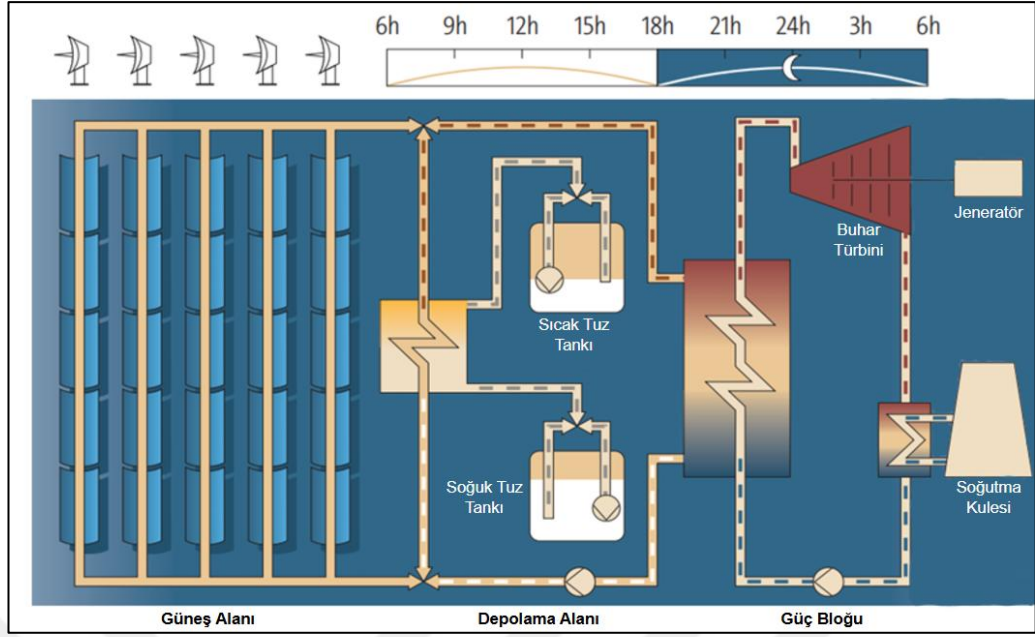
Şekil 1.10’da 1 numaralı alanda parabolik oluk kolektörlerin bulunduğu güneş alan, 2 numaralı alanda soğuk ve sıcak termal yağ veya eriyik tuz tanklarının bulunduğu depolama sistem alanı, 3 numaralı alanda ise 1. ve 2. alan arasında bir köprü görevi gören ısı değiştirici alanı bulunmaktadır. Bu ısı değiştirici, depolama alanından gelen termal ısıyı güç bloğunda bulunan buhar türbinine iletmek için aracılık görevi görmektedir. 4 numaralı sistem parçası olan buhar türbini, ısı değiştiriciden gelen termal ısı vasıtasıyla oluşturulan yüksek basınçlı buhar ile çalışmaktadır. Yüksek basınçlı buharın türbin içinde genişlemesi ve hareket etmesi, türbinin dönmesine ve mekanik enerji üretmesini sağlamaktadır. Oluşturulan mekanik enerji ise buhar türbin miline bağlı olan bir jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye aktarılmaktadır. 5 Numaralı alanda ise kondenser (yoğuşturucu) bulunmaktadır. Kondenserde buhar türbininden aktarılan buhar soğutulur ve sıvı haline geri dönüştürülür. Bu süreç sırasında, buharın içindeki ısı enerjisi soğutma suyuna veya başka bir soğutma ortamına transfer edilir.

Parabolik oluk kolektör sistemi güneş ışınımını (radyasyon) yardımı ile çalıştığından mantıken güneş ışığının olduğu zamanlarda çalışmalıdır. Ancak yukarıda verilen depolama sistemi yardımı ile güneş ışığının olmadığı saatlerde de elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu nedenle parabolik oluk kolektör sistemlerinin çalışma diyagramları gece ve gündüz olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 1.11’de parabolik oluk kolektör sisteminin güneş ışığı olduğu durumundaki çalışma diyagramı verilmiştir (SolarMillennium, 2008).



Şekil 1.11. Parabolik oluk kolektör gündüz çalışma diyagramı (SolarMillennium, 2008)

Şekil 1.11’de depolama sistemi bulunan bir parabolik oluk kolektörün gün ışığı altındaki çalışma diyagramı gösterilmiştir. Güneş alanında bulunan parabolik oluk kolektörlerinin topladığı termal ısı enerjisi buhar türbin kapasitesine göre güç bloğunda bulunan ısı değiştiriciye aktarılır. Kapasite üzerinde bulunan artan termal ısı ise depolama sisteminde bulunan bir diğer ısı değiştirici yardımı ile eriyik tuz tanklarına aktarılmaktadır. Güç bloğunda bulunan ısı değiştiriciye aktarılan termal ısı enerjisi ile buhar türbinini çalıştıracak olan yüksek basınçlı buhar elde edilerek elektrik enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Türbinden çıkan ve hala çürük buhar bulunan operasyon sıvısı ise kondenser yardımıyla soğutularak sıvı formuna dönüştürülür. Bu sayede çevrim tamamlanmış olmaktadır. Şekil 1.12’de parabolik oluk kolektör sisteminin gün ışığı olmadığı zamanlardaki çalışma diyagramı gösterilmiştir (SolarMillennium, 2008).



Şekil 1.12. Parabolik oluk kolektör gece çalışma diyagramı (SolarMillennium, 2008)

Şekil 1.12’de gösterilen sistemde Şekil 1.11’den farklı olarak gece şartlarında yani gün ışığı bulunmayan ortamın çalışma diyagramı gösterilmiştir. Bu sistemde gün ışığı olmadığı için güneş alanında bulunan parabolik oluk kolektörleri devre dışıdır. Sistemin enerji üretebilmesi için gerekli olan termal ısı enerjisi depolama sisteminde bulunan sıcak eriyik tuz deposundan sağlanmaktadır. Eriyik tuz deposundan alınan termal ısı enerjisi ısı değiştirici vasıtasıyla güç bloğuna aktarılarak buhar türbini çalıştırılmaktadır. Sistemde bulunan soğuk tuz tankı ise depolanan ısının yönetilmesini sağlamaktadır. Güneş alanından elde edilen ısı ilk olarak sıcak tuz tankında depolanır. Ancak güneş ışığı olmadığı veya enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda, depolanan ısıyı korumak ve daha sonra elektrik üretmek için sıcak tuzu soğuk tanka transfer eder. Bu sayede, tuzun sıcaklığı zamanla daha düşük bir seviyeye düşürülerek, daha fazla enerji depolanır ve daha sonra kullanılabilir hale getirilebilir. Bu nedenle sıcak ve soğuk tuz tankları arasında bir dolaşım sistemi vardır ve bu sistem depolama sürecinin verimliliğini artırmaktadır.

İspanya’nın Granada şehrinde kurulan ve Avrupa’nın en büyük güneş üretim tesisi olan Andasol tesisinde de bu sistem kullanılmaktadır. Tesiste parabolik oluk kolektör sistemi gündüz çalışmasında yaklaşık 28 500 ton potasyum, sodyum ve nitrat tuzlarını ısıtarak gece sistemin çalışması için hazırlamaktadır. Eriyen tuzların çıkış sıcaklığı 290-390 °C arasında olmaktadır. Sistem tarafından ısıtılan tuz tankı güç bloğunda

bulunan türbinin 7.5 saat boyunca çalışmasını sağlamaktadır. Bu sayede sistem yaklaşık 24 saat boyunca elektrik enerjisi üretebilmektedir (SolarMillennium, 2008).

1.1.2.3. Güneş güç kulesi

Güneş güç kulesi, güneş enerjisini odaklamak ve yüksek sıcaklıklarda termal enerji üretmek için kullanılan bir tür güneş enerjisi kolektörüdür. Genellikle büyük bir merkezi kuleye odaklanan güneş ışınları, kulede bulunan alıcıya yönlendirilir. Bu alıcı, genellikle hava veya sıvı gibi bir ısı taşıyıcısı ısıtmak için kullanılır. Isı taşıyıcısı daha sonra buhar üretmek için bir türbin ve jeneratöre yönlendirilir, böylece elektrik enerjisi üretilir. Güneş güç kuleleri genellikle termal enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılarak güneş ışığının olmadığı veya bulutlu günlerde enerji üretimini sürdürmeye olanak tanır. Bu sistemler genellikle büyük ölçekli enerji santralleri için kullanılır ve temiz ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunurlar.

1.1.2.4. Parabolik çanak sistemler

Parabolik çanak sistemler (PDC) (Parabolic Dish Collector), yenilenebilir enerji teknolojileri arasında güneş enerjisinin yoğunlaştırılarak yüksek sıcaklıklarda termal enerji elde edilmesini sağlayan etkili yöntemlerden biridir. Bu sistemler, güneş ışığını odaklayan parabolik bir reflektör, yoğunlaştırılmış ışığı termal enerjiye dönüştüren bir alıcı ve bu enerjiyi mekanik ya da elektrik enerjisine çeviren bir dönüştürücüden oluşur. Parabolik çanak sistemler, Stirling motorları veya mikro gaz türbinleri gibi termal enerji dönüştürücü mekanizmalarla entegre edilebilmeleri sayesinde, yüksek verimlilikle enerji dönüşümü sağlar. Güneş enerjisinin verimli kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve çevresel etkileri en aza indirme potansiyeliyle, sürdürülebilir bir enerji geleceğinin önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır (Barreto ve Canhoto, 2017).

Parabolik çanak sistemlerin temel çalışma prensibi, güneş ışığının parabolik biçimli bir reflektör tarafından odaklanarak tek bir noktada yoğunlaştırılması ve bu yoğunlaştırılmış enerjinin bir alıcı aracılığıyla termal enerjiye dönüştürülmesidir. Bu alıcı, termal enerjiyi taşıyan bir akışkanla çalışır ve elde edilen enerji Stirling motoru, buhar türbin vb. bir dönüştürücüye aktarılarak elektrik enerjisi elde edilmektedir.

PDC'nin en büyük avantajlarından biri, konsantre güneş enerjisi sistemleri arasında en yüksek termal verimliliğe sahip olmasıdır. Örneğin, Stirling motoru kullanan sistemlerde, motor verimliliği %23.8'e ulaşırken, sistemlerin genel verimliliği %10.4 olarak kaydedilmiştir (Barreto ve Canhoto, 2017). Ayrıca, bu sistemler hibrit uygulamalara olanak tanımaktadır. Örneğin, doğalgaz veya biyogaz gibi fosil olmayan yakıtlarla entegre edilerek gece veya düşük ışıyım koşullarında dahi enerji üretimi devam ettirilebilmektedir (Mastropasqua vd., 2020).

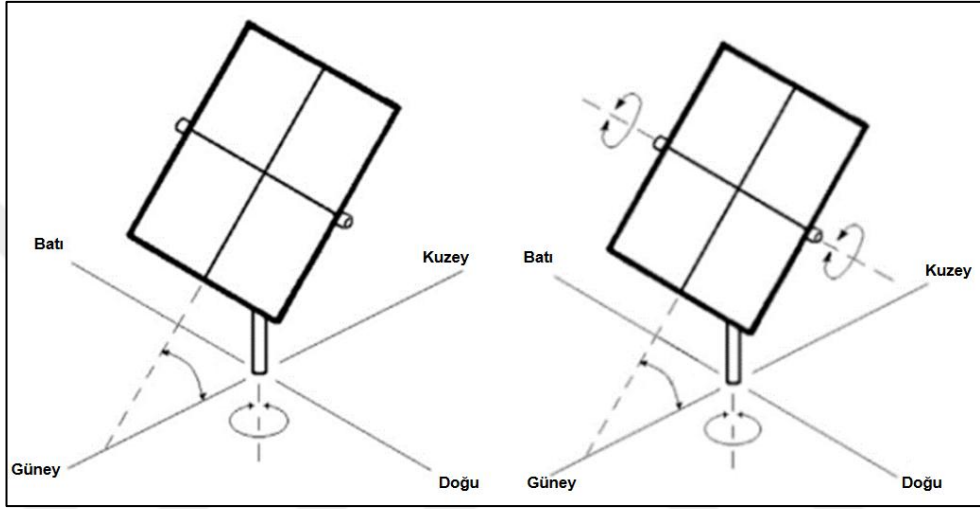
Parabolik çanak sistemler, yenilenebilir enerji teknolojileri arasında yüksek verimlilik ve esneklik sunan bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından sağladığı avantajlar, bu sistemlerin özellikle güneş ışıyımının yoğun olduğu bölgelerde enerji üretimi açısından etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, düşük maliyetli üretim yöntemlerinin ve teknolojik yeniliklerin geliştirilmesi, bu sistemlerin daha geniş bir ölçekte uygulanabilirliğini artırma potansiyeline sahip olmaktadır. Gelecekte yürütülecek araştırma ve geliştirme çalışmaları ile bu sistemlerin verimliliğinin daha da artırılacağı öngörülmektedir.

1.2. Güneş Takip Eksen Çeşitleri

Güneş takip sistemleri, güneş ışınlarını en yüksek verimlilikle toplamak ve güneş enerjisi kullanımını optimize etmek amacıyla geliştirilmiş mekanik ve elektronik sistemlerdir. Bu sistemler, güneş panellerinin veya kolektörlerinin gün içerisindeki güneş hareketine uyum sağlayarak sürekli olarak en uygun açıda konumlanmasını sağlar. Böylelikle, güneş ışınlarının panel yüzeyine en dik açıyla düşmesi sağlanarak enerji üretimi artırılır. Güneş takip sistemlerinin temel çalışma prensibi, güneşin gökyüzündeki konumunu gerçek zamanlı olarak belirlemek ve bu bilgiyi kullanarak panellerin veya kolektörlerin açısını ayarlamaktır. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda enerji kaybını minimize eder ve güneş enerjisinden elde edilen toplam verimi önemli ölçüde yükseltmektedir.

Güneş takip sistemleri, hareket kabiliyetlerine göre iki ana kategoriye ayrılır: tek eksenli ve çift eksenli sistemler. Tek eksenli sistemler, yalnızca bir eksen boyunca hareket ederek güneş ışığını takip ederken, çift eksenli sistemler iki farklı eksenle hareket ederek güneşi hem yatay hem de dikey açılarda izler. Her iki sistemin de

kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunur. Örneğin, tek eksenli sistemler düşük maliyetli ve basit yapılarıyla öne çıkarken, çift eksenli sistemler daha karmaşık mekanizmalara sahip olmalarına rağmen güneş ışığını en yüksek seviyede toplama kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, güneş takip sistemlerinin etkinliği, güneş ışınımının yoğunluğuna, iklim koşullarına ve coğrafi konuma bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 1.13'te güneş takip sistemlerinin eksen çeşitleri gösterilmiştir (Maia vd., 2014).



Şekil 1.13. Tek eksen (sol) ve çift eksen (sağ) güneş takip sistemleri (Maia vd., 2014)

Tek eksenli güneş takip sistemleri, güneş panellerini veya kolektörlerini bir eksen boyunca hareket ettirerek güneş ışınlarını takip eder. Bu eksen genellikle doğu-batı yönünde hizalanır ve güneş ışınlarının açılarına göre düzenlenir. Tek eksenli sistemler, sabit sistemlere kıyasla güneş ışınımını daha etkili bir şekilde toplar. Yapılan çalışmalar tek eksenli sistemlerin sabit sistemlere kıyasla yaklaşık %30 daha fazla enerji ürettiğini göstermektedir (Katrandzhiev ve Karnobatev, 2018).

Tek eksenli takip sistemleri, basit yapıları ve düşük maliyetli tasarımları sayesinde geniş çapta kullanılmaktadır. Tek eksenli sistemin sabit bir sisteme göre çok daha verimli enerji topladığı ve kurulumu ile bakımının kolay olduğu yapılan çalışmalar ile belirtilmiştir (Sefa vd., 2009). Ayrıca, bu sistemler az sayıda hareketli parça içerdiğinden, sistemlerin mekanik aşınması daha düşüktür ve bakım gereksinimi azdır (de Sá Campos ve Tiba, 2021). Çift eksenli güneş takip sistemleri ise güneş panellerinin veya kolektörlerinin iki eksen boyunca hareket etmesine olanak tanır. Bu sistemler, güneşin gün boyunca değişen yatay ve dikey açısını takip ederek enerji

toplama verimliliğini en üst düzeye çıkarır. Çift eksenli sistemler, sabit sistemlere kıyasla enerji toplamada %35'e kadar daha fazla verim sağlayabilmektedir (Yao vd., 2014; Vidanapathirana vd., 2021 Shang ve Shen, 2023; Ulutekin vd., 2023).

Sonuç olarak tek eksenli sistemler, düşük maliyet ve basitlik avantajları sunarken, çift eksenli sistemler, güneşi iki eksenle takip ederek sabit sistemlere göre daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Yukarıda verilen çalışmalar çift eksenli sistemlerin sabit sistemlere kıyasla %20-35 arasında daha fazla enerji üretebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, çift eksenli sistemlerin yüksek maliyet ve bakım gereksinimi gibi sınırlamaları dikkate alınmalıdır. Her iki sistem de uygulama alanına ve ekonomik koşullara bağlı olarak yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada önemli bir katkı sağlamaktadır.

1.3. Güneş Takip Sistemi Sürücü Tipleri

Güneş takip sistemleri, güneş ışınlarını en yüksek açıyla yakalamak için güneş panellerini sürekli olarak güneşe yönlendiren mekanizmalardır. Bu sistemlerde güneş enerjisi üretiminde verimliliği artırmak amacıyla çeşitli sürücü tipleri kullanılmaktadır. Sürücü tipleri, kullanılan mekanizma, kontrol yöntemleri ve enerji ihtiyaçlarına göre farklılık göstermektedir. Aşağıda, güneş takip sistemi sürücü tipleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

1.3.1. Aktif takip

Aktif takip sistemleri, güneşin hareketini hassas bir şekilde izlemek için sensörler, mikroişlemciler ve motorlar gibi elektro-mekanik bileşenler kullanır. Bu sistemler, genellikle ışık yoğunluğunu algılayan fotosensörlerle güneşin yönünü belirler ve panelleri bu doğrultuda hareket ettirmektedir. Aktif sistemlerin kullanımı, özellikle çift eksenli sistemlerde daha yaygındır ve bu sistemler büyük ölçekli fotovoltaik tesislerde tercih edilirler (Hafez vd., 2018).

Aktif takip sistemleri bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu sistemlerin çalışması için sensörler ve motorların enerjiye ihtiyaç duyması, enerji tüketimini artırabilir. Ayrıca, karmaşık mekanik ve elektronik yapıları nedeniyle kurulum ve bakım maliyetleri pasif

ve manuel sistemlere göre daha yüksektir. Hareketli parçalara sahip olmaları nedeniyle arıza riski taşıyan bu sistemler, düzenli bakım gerektirir. Yine de, enerji üretimini maksimize etmek isteyen projeler için aktif takip sistemleri etkili ve yaygın bir çözümdür (Clifford ve Eastwood, 2004).

1.3.2. Kronolojik takip

Kronolojik takip sistemleri, güneşin günlük ve yıllık hareketlerini önceden belirlenmiş astronomik verilere dayanarak izleyen mekanik sistemlerdir. Bu sistemler, güneşin dünya etrafındaki görünür hareketine uyum sağlayan zaman tabanlı bir mekanizma kullanır. Panellerin hareketini sağlamak için genellikle basit motorlar ve zamanlayıcılar kullanılır. Güneşin gökyüzündeki konumunun sabit bir hızla değişmesi, sistemin bu hareketi diğer takip tiplerine göre daha güvenilir bir şekilde takip etmesine olanak tanımaktadır (Chandrasekhar vd., 2013). Kronolojik takip sistemleri, genellikle saat mekanizmasına benzer şekilde çalışır. Motorlar, belirli bir hızda sabit bir döner hareket sağlayarak panellerin güneşin günlük rotasını izlemesine yardımcı olur. Bu sistemler, güneşin günlük 15 derece/saat hızında hareket ettiği gerçeğine dayanır ve panelleri buna uygun bir hızda döndürmektedir.

Kronolojik takip sistemlerinin önemli avantajları arasında enerji verimliliği, dayanıklılık ve düşük maliyet bulunmaktadır. Bu sistemler sensör tabanlı olmadığı için harici enerji tüketimi oldukça düşüktür ve motorların enerji gereksinimi minimum düzeydedir. Ayrıca, hareketli parçaların az olması, sistemin uzun ömürlü ve düşük bakım gereksinimiyle çalışmasını sağlar. Bunun yanı sıra, karmaşık sensörler ve elektronik bileşenlerin bulunmaması, sistem maliyetlerini önemli ölçüde azaltarak özellikle düşük bütçeli projeler için uygun bir seçenek sunar.

1.3.3. Pasif ve yarı pasif takip

Pasif takip sistemleri, güneş panellerini güneşe yönlendirmek için ısı ve fiziksel genleşme prensiplerini kullanan enerji tüketimi olmayan bir güneş takip yöntemidir. Bu sistemler, genellikle düşük kaynama noktasına sahip sıvılar veya gazlar ile çalışır. Güneş ışınlamına maruz kalan bu maddeler genleşir ve panelleri uygun açıya doğru hareket ettirmektedir.

Pasif sistemlerin çalışmasında temel prensip, ısı genleşmeye dayanır. Güneş ışığının yoğun olduğu bölgede ısınan gaz veya sıvı genleşir, bu da güneş panelinin ağırlık merkezini değiştirerek belirli bir yöne eğilmesini sağlar. Bu hareket, sıvıların genleşmesi veya gaz basıncındaki değişikliklerle sağlanır ve herhangi bir motor, sensör ya da elektrikli kontrol ünitesi gerektirmez. Hareketin kontrolü, genellikle viskoz damperler veya dengeleyici mekanizmalar ile desteklenir (Amelia vd., 2020).

Pasif takip sistemleri, enerji tüketimi gerektirmemesi ve basit tasarımı sayesinde birçok avantaj sunar. Bu sistemler, tamamen enerji bağımsız çalışarak operasyonel maliyetleri neredeyse sıfıra indirir. Ayrıca, karmaşık elektrikli veya mekanik bileşenler içermemesi, kurulum ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Bununla birlikte, bu sistemlerin performansı çevresel faktörlere bağlıdır. Güneş ışınımının az olduğu bulutlu günlerde veya rüzgarlı koşullarda etkinlikleri azalabilir.

Yarı pasif takip sistemleri ise pasif ve aktif sistemlerin bir kombinasyonudur. Bu sistemler, mekanik hareketler için sınırlı miktarda enerji kullanırken, güneşin yönlendirilmesi için pasif fiziksel süreçlerden faydalanır. Temel olarak, düşük enerji tüketimi ile birlikte güneş panellerinin hareketini optimize etmeyi hedefler. Bu özellikleri, maliyet ve enerji tüketimi açısından avantaj sağlarken, hassasiyet ve verimlilikte de pasif sistemlere kıyasla daha iyidir.

1.3.4. Manuel takip

Manuel takip sistemleri, güneş panellerinin yönünün insan müdahalesiyle periyodik olarak ayarlandığı en basit güneş takip yöntemidir. Bu sistemlerde herhangi bir sensör, motor veya kontrol mekanizması bulunmaz; paneller, genellikle operatörler tarafından günlük veya haftalık olarak güneşin pozisyonuna göre yeniden hizalanır. Manuel takip, teknolojiye erişimin sınırlı olduğu veya düşük bütçeli uygulamalarda kullanılan, maliyeti en düşük güneş takip çözümüdür. Bu yöntem, mekanik ve elektrikli bileşenlere ihtiyaç duymadığı için kurulum ve bakım açısından oldukça ekonomiktir. Ayrıca, sistemde hareketli veya karmaşık parçalar bulunmadığından, arıza riski de minimum seviyededir. Çizelge 1.3'te takip sistem sürücü çeşitlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 1.3. Takip sistemi sürücü çeşitlerinin karşılaştırılması

Takip Türü	Enerji Tüketimi	Hassasiyet	Bakım Gereksinimi	Maliyet
Aktif Takip	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Kronolojik Takip	Düşük	Orta	Düşük	Orta
Pasif Takip	Yok	Düşük	Düşük	Düşük
Yarı Pasif Takip	Düşük	Orta	Orta	Orta
Manuel Takip	Yok	Düşük	Düşük	Çok Düşük

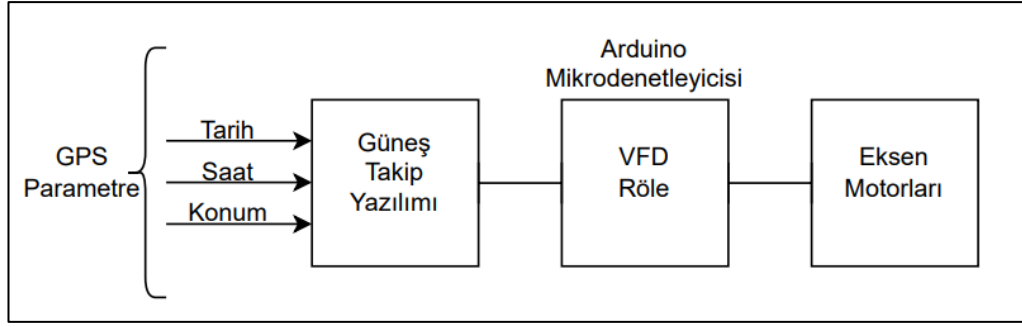
1.4. Güneş Takip Sistemi Kontrol Çevrim Tipleri

Güneş takip sistemlerinde kontrol çevrim tipleri, sistemlerin güneş ışığını en verimli şekilde yakalayabilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu çevrimler genellikle açık çevrim, kapalı çevrim ve hibrid çevrim olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir çevrim tipi, farklı prensipler ve uygulama yöntemleri ile güneş takibinde verimlilik hedeflenerek geliştirilmiştir. Aşağıda, bu kontrol çevrim tipleri detaylı olarak açıklanmaktadır.

1.4.1. Açık çevrim kontrol sistemi

Açık çevrim kontrol sistemi, güneş takip sistemlerinde güneşin hareketini önceden belirlenmiş matematiksel modeller ve algoritmalara dayalı olarak izleyen bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu yöntemde, güneşin konumu coğrafi koordinatlar, günün saati ve yılın günü gibi parametrelere göre astronomik hesaplamalarla tahmin edilmektedir. Sistem, herhangi bir geri besleme mekanizması olmaksızın, bu hesaplamalar sonucunda elde edilen verilere göre güneş panellerinin hareketini kontrol eder.

Açık çevrim sistemlerin başlıca avantajlarından biri, sensör veya diğer geri bildirim cihazlarına ihtiyaç duyulmaması nedeniyle düşük maliyetli ve basit bir tasarım sunmasıdır. Ayrıca, bu sistemler çevresel koşullara duyarlı olmadığından, sensör arızaları gibi problemlerden etkilenmez. Ancak herhangi bir geri beslemeye sahip olmadığından düşük takip doğruluğuna sahiptir. Açık çevrim sistemlerde oluşabilecek elektriksel arızalar nedeniyle sistem kararsız bir hale gelebilmektedir. Bu nedenle periyodik olarak kalibrasyona ihtiyaç duyabilirler (Fuentes-Morales vd., 2020). Şekil 1.14'te açık çevrim blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Açık çevrim sistemi blok diyagramı

Şekil 1.14’te gösterilen diyagramda GPS sensöründen veya harici bir kaynaktan alınan tarih, saat ve konum verileri güneş takip yazılımına girilmektedir. Güneş takip yazılımı aldığı bu veriler ile güneş konumunu hesaplayarak mikrodnetleyiciye göndermektedir. Mikrodnetleyici bu güneş konum bilgilerine göre sistemin eksen motorlarını döndürmekte ve sistemin güneşi takip etmesini sağlamaktadır.

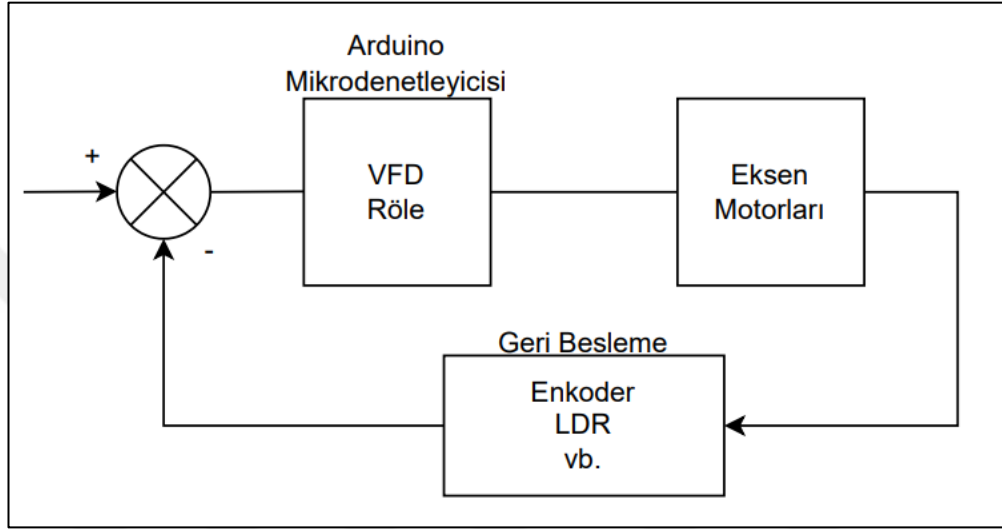
1.4.2. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Kapalı çevrim güneş takip sistemleri, geri bildirim mekanizmalarına dayalı olarak çalışan ve güneşin ışık yoğunluğunu algılayarak gerçek zamanlı pozisyon düzeltmeleri yapabilen bir kontrol sistemidir. Bu sistemlerde genellikle fotoelektrik sensörler gibi algılama cihazları kullanılarak, güneş panellerinin güneşe dik açıda konumlanması sağlanır. Kapalı çevrim kontrol sistemleri, özellikle atmosferik değişimlere duyarlı olmaları nedeniyle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin en büyük avantajlarından biri, değişken atmosfer koşullarında dahi yüksek doğruluk sağlayabilmesidir. Çift geri bildirimli bir kapalı çevrim kontrol stratejisi, fotodiyot tabanlı sensörlerle ve gölge algılama cihazlarıyla çalıştırıldığında izleme hatalarını %80 oranında azaltmış ve sistemin termal verimliliğini %15 artırmıştır (Saldivar-Aguilera vd., 2021). Ayrıca, bu sistemler güneş ışığının en yoğun olduğu açığa panelleri hizalayarak enerji üretimini önemli ölçüde artırmaktadır. Yapılan bir çalışmada, bu sistemlerin enerji verimliliğinde %28.8-43.6 arasında artış sağladığı görülmüştür (Fathabadi, 2016).

Bununla birlikte, kapalı çevrim sistemlerin bazı zorlukları bulunmaktadır. Bu sistemler, sensörlere olan bağımlılıkları nedeniyle sensör arızaları durumunda

performans kaybı yaşayabilmektedir. Sistemde kullanılan sensörlerin önüne bulut geçmesi gibi durumlarda sensörden alınan verilerde doğruluk azalarak izleme hatalarına yol açabilmektedir. Ayrıca, bu sistemlerin maliyeti açık çevrim sistemlere göre daha yüksektir. Kullanılan sensörler ve aktüatör gibi cihazlar, sistem maliyetini artırmakta ve daha karmaşık bir tasarım gerektirmektedir. Şekil 1.15'te kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Kapalı çevrim sistemi blok diyagramı

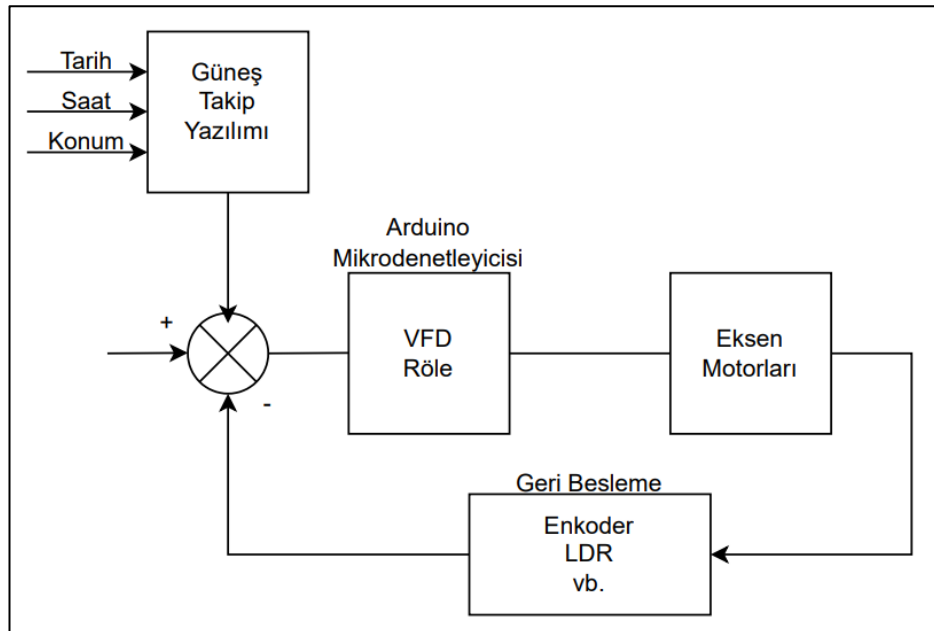
Şekil 1.15'te gösterilen diyagramda güneş takip yazılımında üretilen veriler mikrodenetleyiciye gönderilerek eksen motorlarının çalışması sağlanmış olmaktadır. Eksen motorlarının çalışması sonrasında enkoder ile döndürülen açı veya ldr gibi fotodiyotlar yardımı ile güneş sapması kontrol edilerek geri besleme sağlanmış olmaktadır.

Sonuç olarak, kapalı çevrim güneş takip sistemleri, hassasiyet ve verimlilik gerektiren uygulamalar için uygun bir çözüm sunmaktadır. Özellikle yüksek doğrulukla güneşi izleme ve enerji üretiminde optimize sonuçlar elde etme konularında etkili bir yaklaşımdır. Ancak, yüksek maliyet ve sensör bağımlılığı gibi dezavantajların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu sistemler, gelişmiş algoritmalar ve düşük enerji tüketimli sensörlerle desteklenerek daha geniş uygulama alanlarına hitap edecek şekilde optimize edilebilir.

1.4.3. Hibrid çevrim kontrol sistemi

Hibrid çevrim güneş takip sistemleri, açık ve kapalı çevrim sistemlerinin avantajlarını birleştirerek yüksek doğruluk ve enerji verimliliği sunmayı amaçlamaktadır. Bu sistemler, güneşin konumunu tahmin etmek için astronomik algoritmalara (açık çevrim) dayanırken, çevresel değişimlere ve atmosferik koşullara adapte olmak için sensörlerden alınan geri bildirimleri (kapalı çevrim) kullanmaktadır.

Hibrid çevrim sistemlerin en büyük avantajlarından biri, açık ve kapalı çevrim sistemlerin zayıf yönlerini telafi edebilmesidir. Açık çevrim algoritmalarının uzun vadeli doğruluk sunması ve kapalı çevrim sensörlerinin anlık düzeltme yapabilmesi, sistemin her iki teknolojinin de avantajlarından faydalanmasını sağlar. Ancak, bu sistemlerin uygulanmasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Hibrid çevrim sistemler, donanım ve yazılım entegrasyonu açısından açık ve kapalı çevrim sistemlere göre daha karmaşıktır. Bu nedenle, ilk kurulum maliyetleri ve bakım gereksinimleri daha yüksektir. Ayrıca, sistemin kapalı çevrim kısmındaki sensör arızaları veya açık çevrim algoritmalarındaki modelleme hataları, performans kayıplarına yol açabilmektedir. Şekil 1.16'da hibrid çevrim blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Hibrid çevrim sistemi blok diyagramı

Şekil 1.16’da gösterilen diyagramda açık ve kapalı çevrim tiplerinin sentezi bulunmaktadır. Açık çevrimden gelen güneş takip yazılımı ile kapalı çevrimden gelen sensörler yardımıyla sistem güneşi daha kararlı bir şekilde takip edebilmektedir.

1.5. Güneş Enerjisi

Tarihin ilk zamanlarından itibaren insanlık, yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek ve gelişmek için enerjiye ihtiyaç duymuştur (Arslan vd., 2019). Dünya çapında artan nüfusla doğru orantılı olarak gelişen sanayi ve kentleşme beraberinde enerjiye olan ihtiyacı getirmiştir. İhtiyaç olunan bu enerji ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Enerji tüketimindeki artışlar, varolan fosil yakıt rezervlerinin tükenmesini hızlandırması ve buna paralel olarak küresel emisyon oranlarında bir artışa sebep olması kaçınılmazdır (Temir, 2019). Bu doğrultuda karbon ayak izini artıran ve doğa biyoçeşitliliğini azaltan fosil enerji kaynakları aynı zamanda küresel iklim problemlerine de neden olmaktadır. Bu nedenle dünyanın çevreye duyarlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanması oldukça önemlidir.

Yenilenebilir enerji, doğal ortam koşulları içinde özellik ve varlıklarını koruyabilen, miktarları değişmeden sabit kalabilen kaynaklardır. Coğrafi olarak çok geniş alanlarda bulunabilmekte, yerel ve modüler olarak istenilen miktarda enerji talebini karşılayacak şekilde kullanılabilmekte ve daha çok kırsal ve dağınık yerleşim birimlerinin enerji talep yapısıyla uyum göstermektedir (Doğan, 2015).

Yenilenebilir enerji ayrıca, yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine ihtiyaç duymadan temin edilebilen, fosil kaynaklı olmayan, elektrik enerjisi üretilirken CO₂ emisyonu az bir seviyede gerçekleşen, çevreye zararı ve etkisi geleneksel enerji kaynaklarına göre çok daha düşük olan, sürekli yenilenen ve kullanılmaya hazır olarak doğada var olan hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biyogaz, dalga, akıntı ve gelgit ve hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade eder (MEGEP, 2012).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi diğer yenilenebilir kaynaklara göre potansiyeli en fazla olandır. Bunun yanında güneş enerjisi en bol, en

modern ve en fazla uygulama alanına sahip olanıdır (Chafiou ve Üçgöl, 2022). Dünyanın güneşten aldığı toplam enerji bir yılda 1.5 katrilyon MW/h'tir (Kılıç, 2015).

Güneşten açığa çıkan enerjinin (güneş radyasyonu) ancak %70'i dünyaya ulaşmakta ve kaybolan enerji haricinde atmosferin dışında ışıınım değeri 1367 W/m² olmaktadır (Acar ve Kılınçdemir, 2019).

Bu enerji miktarı, dünyada insanların 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28 000 katına eşdeğerdir. IEA, 2050 yılında küresel elektrik enerjisi üretiminin %11 gibi büyük bir oranının güneş enerjisinden sağlanacağını öngörmekte ve 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık %7.6 büyüme ile en hızlı büyüme oranına sahip enerji kaynakları olacağını söylemektedir (Kılıç, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara karşı temiz ve sürdürülebilir bir çözüm olsa da bu kaynakların doğru ve verimli kullanılması da bir o kadar önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında verim önemli bir faktördür. Günümüzde gelişen teknolojiye rağmen hala yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, yatırım ve işletme maliyetlerinden dolayı sekteye uğramaktadır.

Güneş ışıınımından elektrik enerji üretiminde verim artırıcı çözümler kullanılması gerekmektedir. Literatürde yapılan araştırmalar belirtmektedir ki güneş ışıınımlarının güneş kolektörüne dikey olarak gelmesi birim alandan sağlanan elektrik üretimini artırmaktadır. Bunun yanısıra güneş sisteminin kurulacağı yerin (bölgenin, ülkenin) güneş enerji potansiyelinin de yüksek olması gerekmektedir. Bu şartlar altında günlük ortalama 4.18 kWh/m² güneş enerji potansiyeline sahip olan ülkemiz için güneş enerjisi en önemli alternatif enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır (ETKB, 2024b).

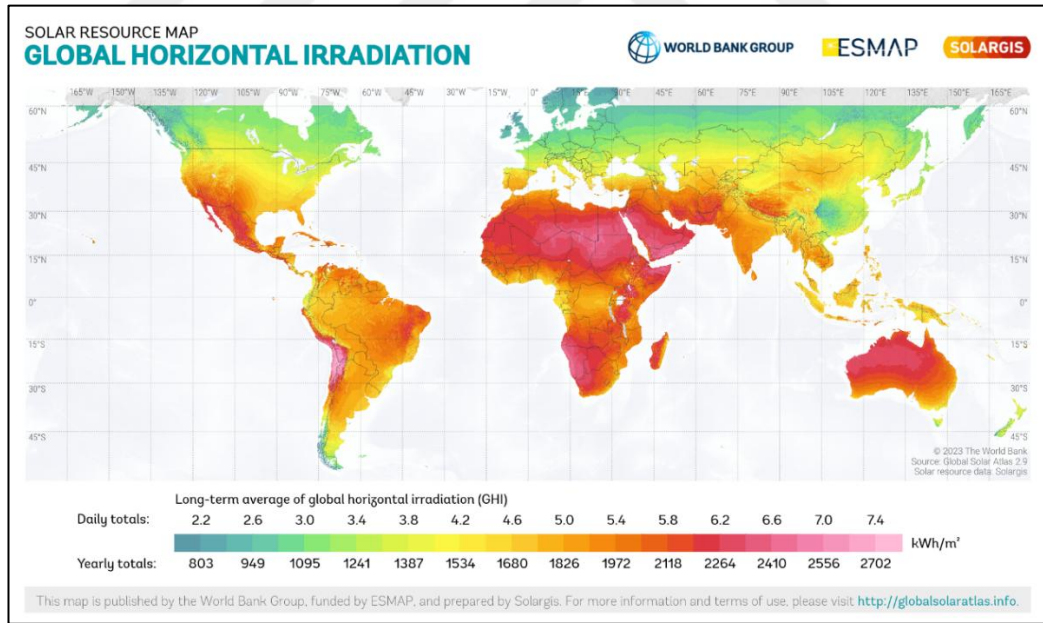
1.5.1. Dünya güneş enerji potansiyeli

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan güneş enerjisi, Güneş'in çekirdeğinde yer alan hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon süreci ile açığa çıkan ışıınım enerjisidir. Dünya'ya ulaşan Güneş enerjisinin küçük bir bölümü dahi dünya enerji tüketiminin çok üzerindedir. Güneş enerji

sistemlerinin teknolojik olarak ilerlemesi ve maliyetlerinin düşmesi, temiz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin önemini daha da artırmaktadır (ETKB, 2024a).

Dünyanın şekli ve güneş sistemi içindeki konumu, güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açısını ve süresini etkilemektedir. Ayrıca atmosferin bulutluluk derecesi, yağışlar, havadaki nem oranı, toz parçacık miktarı, morfolojik yapı, kayaçların petrografik özellikleri gibi daha pek çok coğrafi faktör de yeryüzünün her kesiminin güneş ışınlarından aynı ölçüde yararlanmasını engellemektedir.

Yeryüzünün 45 kuzey ve 45 güney eylemleri arasında kalan sahalarda güneş enerjisinden ekonomik olarak yararlanma olanağına sahiptir (Kaplukan, 2015). Bu sahada güneş ışınları yer yüzeyine dik ve dike yakın gelmekte ve yeryüzünü uzun süre etkilemektedir. Bundan dolayı bu saha “Güneş Kemer”, “Güneş Enerjisi Kuşağı”, “Güneş Kuşağı” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.17’de Dünya global radyasyon haritası verilmiştir (GSA, 2023b).



Şekil 1.17. Dünya global radyasyon haritası (GSA, 2023b)

Şekil 1.17’de görüldüğü üzere ekvatora yakın bölgelerde güneşten gelen radyasyon verimliliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Dünya yüzeyindeki ortalama yıllık güneş radyasyonu miktarı ekvator ve çevresinde 2000-2500 KWh/m² ve daha üst enlemlerde ise 1000-1500 KWh/m² arasında değişmektedir.

Güneşten dünyaya gelen ışınlamalar ne kadar dik ve kayıp olmadan gelir ise güneş enerjisinden elektrik enerji dönüşümleri o kadar verimli olmaktadır. Güneş enerji dönüşümlerindeki verim ise güneş sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin geri kazanım süresini kısaltacağından dolayı bu sistemlere olan yönelimi artıracaktır. Çizelge 1.4'te dünya genelinde güneş ışınlamaları bakımından en zengin ülkeler verilmiştir (GSA, 2024).

Çizelge 1.4. Güneş ışınlam değerleri bakımından zengin ülkeler (GSA, 2024)

Ülke	GHI(kWh/m ² /gün)	Gayri Safi Hâsıla(USD) Kişi Başı	İnsan Gelişim Indexi	Enerjiye Ulaşım(Kırsal)%	Kurulu PV Kapasitesi (MWp)
Yemen	6.47	944	0.45	57.7	150
Nabibya	6.40	5931	0.65	28.7	78.8
Sudan	6.32	977	0.5	22.2	17.6
Umman	6.28	16419	0.82	100	8.2
Mısır	6.26	2549	0.7	100	750
Nijer	6.26	412	0.35	4.7	20
Çad	6.26	730	0.4	2.2	0.2
S.Arabistan	6.21	23219	0.85	100	89.3
Libya	6.13	7235	0.71	96.4	5.1
Kiribati	6.13	1625	0.61	82.2	2.9

Çizelge 1.4'te bulunan ülkeler incelendiğinde bu ülkelerin geneli Sahra Altı Afrika (SAA) ülkeleridir. Dünyada 2020 yılında kişi başına enerji tüketimi %5.5 azalmıştır. Aynı yıl Kuzey Amerika'da enerji tüketimi Afrika'nın 10.7 kat üzerinde olmuştur. Afrika, dünyada 1987 yılından beri kişi başına enerji tüketim miktarının en az olduğu ve en az değişime uğradığı coğrafyadır. 2020 yılında küresel birincil enerji tüketiminin %13.9'unu Afrika kıtası, %6.2'sini de SAA gerçekleştirmiştir. Küresel elektrik üretiminin ise %3.1'ini Afrika kıtası, %1.1'ini SAA karşılamıştır. Bu veriler dünya enerji göstergeleri açısından önemsiz olsa da SAA'da küresel enerji üretim ve tüketim verileri karşılaştırıldığında bariz bir enerji açığına işaret etmektedir (British Petroleum, 2021). Bazı Güney Afrika ülkeleri tüketebildiğinden daha fazla enerji üretse de bölgenin geneli için bunu söylemek mümkün değildir (Güneş ve Arslan, 2018).

Çizelge 1.4'te bulunan ülkeler güneş enerji potansiyeli olarak dünya üzerinde başta olmasına rağmen çeşitli nedenlerden dolayı enerji sıkıntısı çekmektedir. Bu nedenlerin başında ülkelerde bulunan iç karışıklıklar, enerji üretim ve iletim altyapısındaki yetersizlikler ve teknolojiye ulaşmadaki zorluklar gösterilebilir. Örneğin, Yemen bölgesi incelendiğinde Global ışınlam miktarında en verimli alan olmasına rağmen

kırsalda enerjiye ulaşımında %57.7'lik bir oranı bulunmakta ve kurulu PV kapasite 150 MWp olduğu görülmektedir.

Çizelgede bulunan diğer ülkeler incelendiğinde ise birçok farklı sonuçla karşılaşılmaktadır. Sudi Arabistan örneğine göre ülkede güneş enerji potansiyeli, gelişmişlik endeksi ve gayri safi hâsıla yüksek olmasına rağmen kurulu PV kapasitesi düşüktür. Buna rağmen kırsalda enerjiye ulaşım olarak en yüksek değerlere sahiptir. Bunun nedeni ise ülkede bulunan petrol ve doğalgaz rezervleri ve bunlardan kazanılan paranın enerji altyapısı ve yatırımlara aktarılmasıdır.

Bu sonuçlardan hareketle güneş enerji potansiyeli yüksek olan ülkeler farklı nedenlerden dolayı (iç savaş, yatırım bütçe sıkıntıları, yatırım maliyeti düşük diğer kaynaklar vb.) bu enerjiden yararlanmamaktadır. Ülkelerin güneş enerji potansiyelini elektrik enerjisine dönüştürememesinin başlıca nedeni ekonomiktir. Bu sistemlerin genel olarak ilk kurulum maliyetleri yüksektir. Bu nedenle hali hazırda bulunan kısmi olarak yenilenebilir enerjiden elektrik üretimine göre maliyeti daha düşük fosil rezervlerin kullanımına öncelik verilmektedir. Ekonomik anlamda kısa vadede bu enerji kaynakları daha avantajlı olarak görülse de fosil yakıtlardan enerji üretiminde ortaya çıkan zehirli gazlar çevreye ve biyoçeşitliliğe geriye dönülmez zararlar vermektedir. Ayrıca fosil yakıtlarda yaşanan rezerv ve bu rezervlere ulaşmadaki sıkıntılar yenilenebilir enerjiye geçişin bir seçenek değil zorunluluk olduğunu vurgulamaktadır.

Yenilenebilir enerjiye geçiş süreci dünya, biyoçeşitlilik ve uzun vadede ekonomik bağlamda getiri sağlasa da yenilenebilir enerji sistemlerinin diğer enerji üretim sistemlerine nazaran daha maliyetli olması bu sistemlere yönelimin azalmasına neden olmaktadır. Sistemlerin ilk kurulum maliyetlerinin azaltılması veya sistem verimlerinin artırılarak ilk kurulum maliyetlerinin geri dönüş sürelerinin azaltılması sektöre olan yönelimi artıracak unsurlardır. Bu unsurları daha detaylı incelersek;

- **Artan güneş radyasyonu ve verimlilik:** Güneş enerji sistemi üzerine gelen güneş radyasyonu ne kadar fazla ise sistemden üretilebilecek elektrik enerjisi o kadar artacaktır.

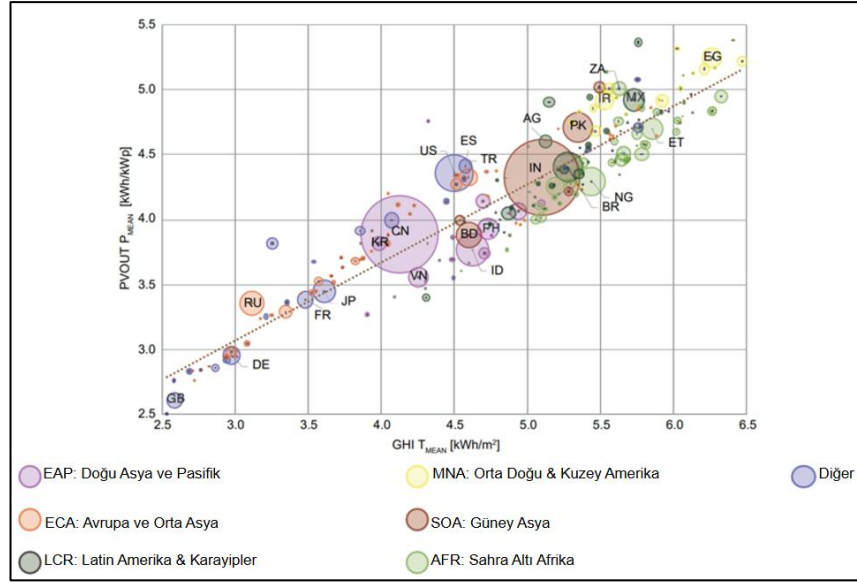
- **Artan verimlilik ve enerji üretimi:** Güneş enerji sistemlerinin verimliliğinin çeşitli yöntemler (Kararlı takip mekanizması, Kayıpların azaltılması, Çevre parametrelerinin optimize edilmesi vb.) ile artırılması sistemden elde edilecek elektrik enerji miktarını artıracaktır.
- **Artan enerji üretimi, sistem kurulum maliyet geri dönüş sürelerinin azalması:** Sistem ilk kurulum maliyeti geri dönüş süresi, bir enerji üretim sisteminin ilk kurulum maliyetinin, sistemin üreteceği enerjiden elde edilecek tasarruflar veya gelirler ile karşılanması süresini ifade etmektedir. Geri dönüş süresi, bir enerji üretim sisteminin ekonomik açıdan ne kadar verimli olduğunu değerlendirmek için önemli bir göstergedir. Daha kısa geri dönüş süreleri, yatırımın daha hızlı geri kazanılacağı ve daha uzun süreli kazançların elde edileceği anlamına gelir. Sistem verimlerinin artırılması sonucunda birim radyasyon başına elde edilecek elektrik enerji miktarı artacağından geri dönüş süreleri kısalmış olacaktır.
- **Sistem kurulum maliyet geri dönüş sürelerinin azalması, yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin yaygınlaşması:** Yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin verim faktörlerinin artırılması ve buna bağlı olarak sistemden elde edilecek elektrik enerjisindeki artış maliyet geri dönüş sürelerini kısıltacaktır. Sistem kurulum maliyet geri dönüş sürelerinin azalması, yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin yaygınlaşmasını teşvik edecektir. Ayrıca, düşen kurulum maliyetleri, yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin ekonomik açıdan daha cazip hale gelmesini sağlayarak, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltacaktır.
- **Dış faktörlerin etkisi:** Yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliği yukarıda bulunan etkenlerin yanında dış faktörlere de (çevresel etkenler) bağlıdır. Bu sistemlerin verimliliği incelenirken bu etkenlere de dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunlar;
 - **Hava koşulları:** Güneş enerjisi sistemleri için güneş ışığının varlığı önemlidir. Bulutlu günlerde veya güneş ışığının az olduğu durumlarda güneş panellerinin verimliliği düşmektedir. Benzer şekilde, rüzgâr türbinlerinin verimliliği de rüzgâr hızına bağlıdır. Hava koşullarındaki

değişiklikler, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini etkileyebilir.

- **Çevresel koşullar:** Yenilenebilir enerji sistemlerinin kurulduğu çevresel koşullar da verimliliği etkilemektedir. Örneğin, güneş panellerinin gölgelenmesi, çanak sistemlerinin yansıtıcı yüzeylerinin kirlenmesi veya paslanması durumu sistem verimliliğini azaltabilmektedir.
- **Sistem tasarımı ve bakımı:** Yenilenebilir enerji sistemlerinin doğru bir şekilde tasarlanması ve düzenli bakımının yapılması verimliliği artırmaktadır. Özellikle güneş panellerinin doğru bir şekilde konumlandırılması ve gerekli olan bakımlarının yapılması verim açısından önemlidir.
- **Enerji depolama:** Yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama sistemi kullanılması verimliliği artırmaktadır. Depolama sistemleri, enerjiyi güneş ışığının en yüksek olduğunda depolayarak daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.
- **İklim değişikliği:** İklim değişikliği, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini etkileyebilmektedir. Özellikle iklim değişikliğinin neden olduğu uç hava olayları, sistemlerin verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliği üzerinde birçok dış faktör etkilidir. Bu faktörlerin dikkate alınması, sistemlerin daha verimli bir şekilde çalışmasını ve çevresel etkilerinin azaltılmasını sağlayabilir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji sistemlerinin kurulumunda ve işletilmesinde dikkatli bir planlama ve yönetim gerekmektedir.

Yukarıda açıklanan, verimliliği etkileyen faktörlere destek olması amacıyla Şekil 1.18'de Ülkelerin potansiyel-teorik PV güç çıkış karşılaştırması gösterilmiştir. Gösterilen şekilde, dünya ülkelerinin bölgesel dağılımları farklı renkler gözetilerek sınıflandırılmış ve potansiyel-teorik PV güç çıkış değerleri verilmiştir (GSA, 2024). Bu değerler incelendiğinde aynı veya benzer GHI (Küresel Yatay Işınım) değerlerine sahip ülkelerin farklı PV güç çıkışlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklı PV güç çıkışları çevresel etkenlerden kaynaklıdır.



Şekil 1.18. Ülkelerin potansiyel-teorik PV güç çıkış karşılaştırması (GSA, 2024)

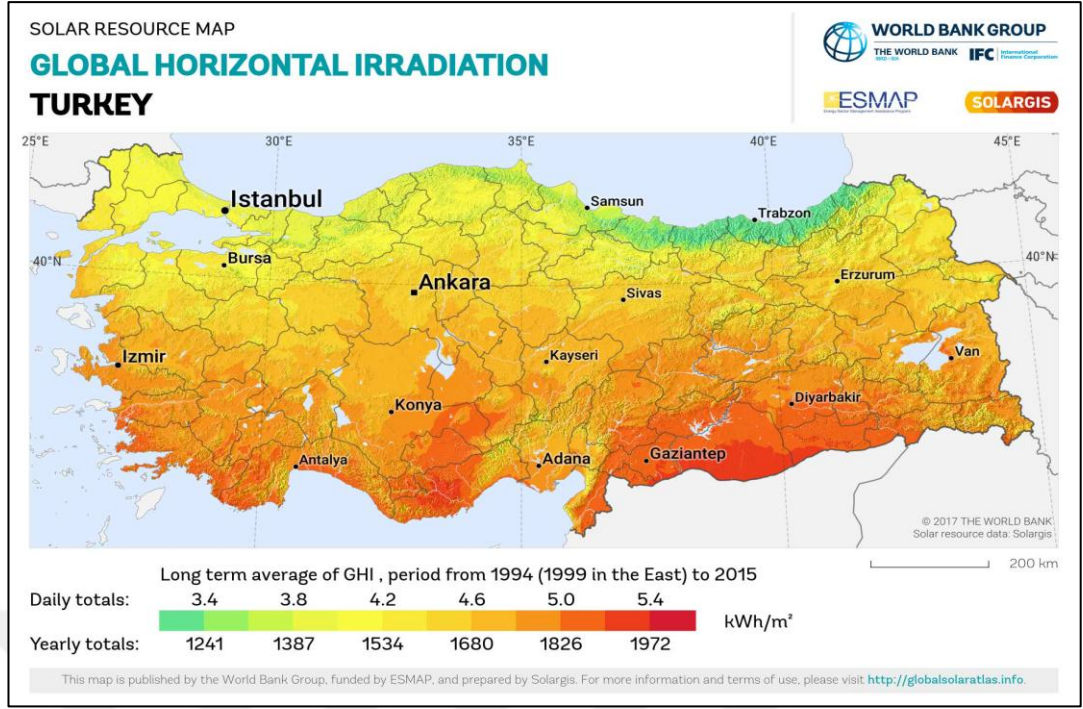
Şekil 1.18'de, güneş radyasyonundan güneş enerjisi sistemleri aracılığıyla elektrik üretiminde ülkeler arasındaki farklılıklar detaylı bir şekilde incelenmektedir. Güneş ışınlarının yoğun olduğu Güney Avrupa ülkeleri (İspanya, İtalya ve Yunanistan vd.), güneş enerjisi sistemlerini daha fazla kullanarak elektrik üretiminde önemli bir artış sağlamıştır. Ancak, ilginç bir şekilde, daha soğuk bölgelerde yer alan ülkeler (örneğin Türkiye), aynı GHI için daha yüksek “PVOUT” (pratik PV güç potansiyeli) değerleri göstermektedir. Bu durum, hava sıcaklığının fotovoltaik (PV) sistemlerinin performansını etkilediğini göstermektedir. Örneğin, Türkiye ve Endonezya gibi ülkeler arasındaki karşılaştırmada, her iki ülkenin de benzer GHI değerlerine sahip olduğu görülmektedir (sırasıyla 4.32 ve 3.77 kWh/kWp). Ancak, Türkiye'nin daha düşük GHI değerine rağmen, PVOUT değeri neredeyse %15 daha yüksektir. Bu durum, Türkiye'nin daha soğuk hava koşullarında bulunmasından kaynaklanmaktadır ve bu da PV sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Benzer şekilde, diğer ülkeler arasında da benzer durumlar gözlemlenmektedir. Nijerya ve Pakistan, Tanzanya ve Güney Afrika, Kenya ve Meksika ile Eritre ve Mısır gibi ülkelerde de benzer teorik potansiyellerin yanı sıra, PVOUT değerlerinde belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu durumlar, hava sıcaklığı gibi faktörlerin güneş enerjisi sistemlerinin performansını etkilediğini ve bu nedenle ülkeler arasında farklı PVOUT değerlerine yol açtığını göstermektedir.

Türkiye gibi daha soğuk bölgelerde yer alan ülkelerin, aynı GHI için daha yüksek pratik PV güç potansiyeli değerlerine sahip olmalarının nedenini açıklamaktadır. Bu durum, hava sıcaklığının fotovoltaiik sistemlerinin performansını etkilediğini göstermektedir. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi, ülkenin enerji bağımsızlığını artırabilir ve çevresel etkilerini azaltabilir. Bu potansiyelin daha fazla kullanılması, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir adım olabilir. Ancak, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve işletilmesinde teknolojik, ekonomik ve politik faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu faktörlerin doğru bir şekilde yönetilmesi, ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinden en iyi şekilde faydalanmasını sağlayabilir.

1.5.2. Türkiye güneş enerji potansiyeli

Güneş enerji potansiyeli, belirli bir bölgenin güneş ışınlarından elde edilebilecek enerji miktarını ifade eder. Bu potansiyel, bölgenin coğrafi konumu, iklim özellikleri, mevsimsel değişkenlikler ve çevresel faktörler gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Güneş enerji potansiyeli genellikle kilovat saat başına metre kare cinsinden ölçülür ve güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve verimliliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

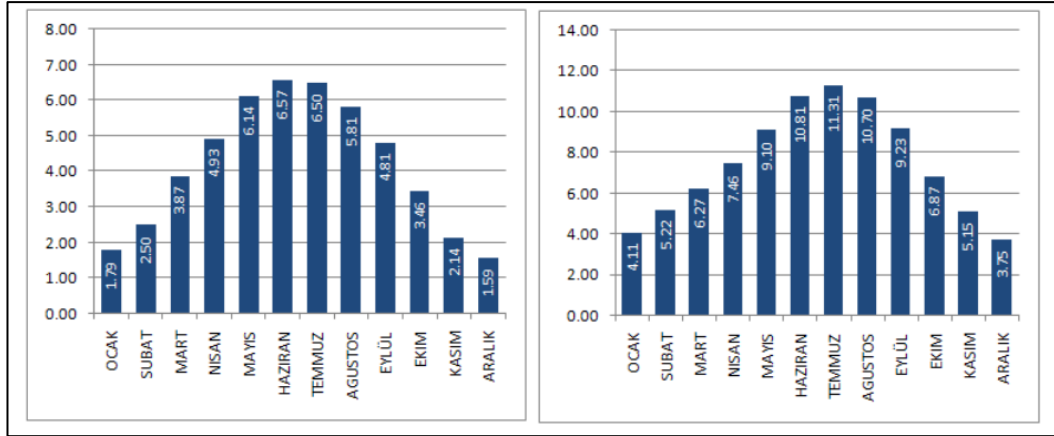
Ülkemiz açısından güneş enerji potansiyelini incelersek; Türkiye coğrafi olarak Kuzey Yarım Küre’de yer alır ve 36-42° kuzey enlemleri ile 26-45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Yapılan ölçümlere göre, ülkemizin %63’ünde 10 ay, %17’sinde 1 yıl boyunca güneş enerjisinden yararlanmak mümkündür (Çıtıroğlu, 2000). Şekil 1.19’da Türkiye global güneş radyasyonu gösterilmiştir (GSA, 2022).



Şekil 1.19. Türkiye güneş enerji potansiyel haritası (GSA, 2022)

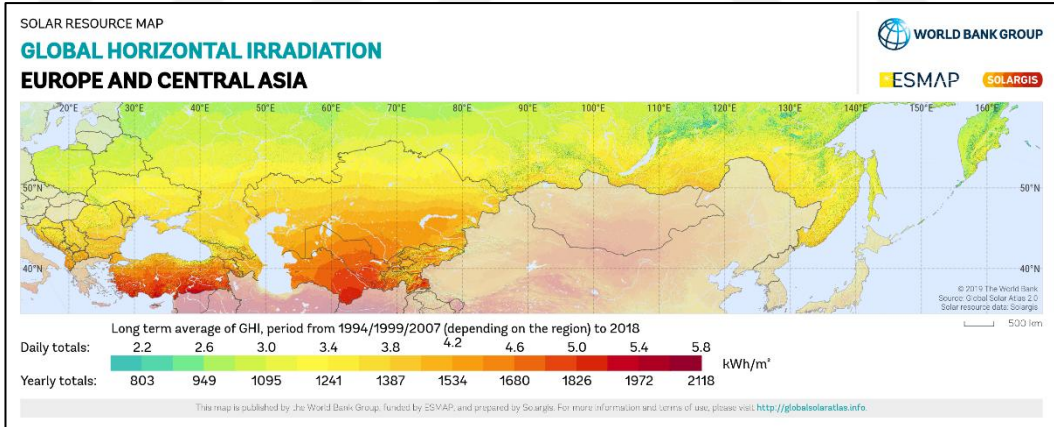
Şekil 1.19'da görüldüğü üzere ülkemizin genelinde toplam güneş radyasyonu miktarı ortalamanın üzerindedir. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlasına göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat (günlük toplamı 7.5 saattir), yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1527 kWh/m²yıl, yani günlük toplam 4.18 kWh/m² değerinde belirlenmiştir (ETKB, 2024b).

Türkiye'nin coğrafi konumu, güneş enerjisi potansiyelini büyük ölçüde etkiler. Ülkemiz, ekvatora yakın bir konumda olmasa da yıl boyunca genellikle yüksek güneşlenme sürelerine sahiptir. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği açısından önemlidir çünkü güneşlenme süresi ne kadar uzun olursa, güneş paneli sistemleri o kadar fazla enerji üretebilir. Şekil 1.20'de Türkiye global güneş radyasyon (kWh/ m²-gün) ve güneşlenme süreleri (saat) verilmiştir (ETKB, 2023).



Şekil 1.20. Türkiye global güneş radyasyon ve güneşlenme süresi (ETKB, 2023)

Şekil 1.19 ve Şekil 1.20’de ülkemiz açısından güneş radyasyon değerlerinin elektrik üretimi açısından oldukça avantajlı bir konumda olduğu görülmektedir. Bu değerler ile doğru orantılı olarak güneş ışınım miktarları da gayet iyi düzeydedir. Ülkemiz güneş ışınlarının yoğun olduğu ve genellikle güneşli gün sayısının fazla olduğu bir coğrafyaya sahiptir. Bu durum, Türkiye’nin güneş enerjisi sistemlerinden maksimum faydayı sağlayabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 1.21’de Avrupa ve Orta Asya’nın global güneş radyasyon değerleri gösterilmiştir (GSA, 2023a).



Şekil 1.21. Avrupa ve Orta Asya global güneş radyasyon değerleri (GSA, 2023a)

Avrupa ve Orta Asya’nın güneş radyasyon değerlerini inceleyerek Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmek, Türkiye’nin enerji geleceğini anlamak açısından önemli bir adımdır. Şekil 1.21’de gösterilen güneş radyasyon değerleri, Türkiye’nin güneş enerjisi üretimi için uygun bir coğrafyada olduğunu göstermektedir. Özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi, yüksek güneşlenme süreleri ve düşük bulut örtüsü ile Türkiye’nin en verimli güneş enerjisi bölgelerinden biridir.

Avrupa ve Orta Asya'daki güneş radyasyon değerleri, mevsimler ve coğrafi konuma bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Türkiye'nin bu bölgelere kıyasla daha yüksek güneş radyasyon değerlerine sahip olması, güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Bu durum, Türkiye'nin güneş enerjisi sistemlerinden daha fazla enerji üretebileceği anlamına gelmektedir. Ancak güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve işletilmesi sürecinde dikkate alınması gereken birçok faktör vardır. Özellikle Türkiye gibi bölgelerde, güneş ışığının mevsimsel değişkenliği ve hava koşulları, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini etkileyebilir. Bu nedenle, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirirken, iklim koşulları, arazi kullanımı ve teknolojik gelişmeler gibi faktörlerin dikkate alınması önemlidir.

Ülkemizin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirirken, iklim koşulları, arazi kullanımı ve teknolojik gelişmeler gibi faktörlerin dikkate alınması önemlidir. Türkiye'nin genel iklim yapısı Akdeniz iklimi özelliklerini taşımaktadır ve genellikle yıl boyunca güneşli gün sayısı oldukça fazladır. Ancak, ülkenin farklı bölgelerinde iklim koşulları önemli ölçüde değişebilir; özellikle iç ve doğu Anadolu bölgelerinde kış aylarında güneş ışığı alımı azalabilir, bu da güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini etkileyebilmektedir. Başka bir faktör ise arazi kullanımıdır. Şekil 1.19 ve Şekil 1.21'de gösterilen global güneş radyasyon değerleri güneş enerjisinden elektrik enerji üretiminde optimum olmasına rağmen bazı bölgelerde bulunan arazi kısıtlamaları (tarım arazisi, fiziksel engel barındıran arazi) nedeniyle teorik enerji çıkışlarına ulaşamamaktadır.

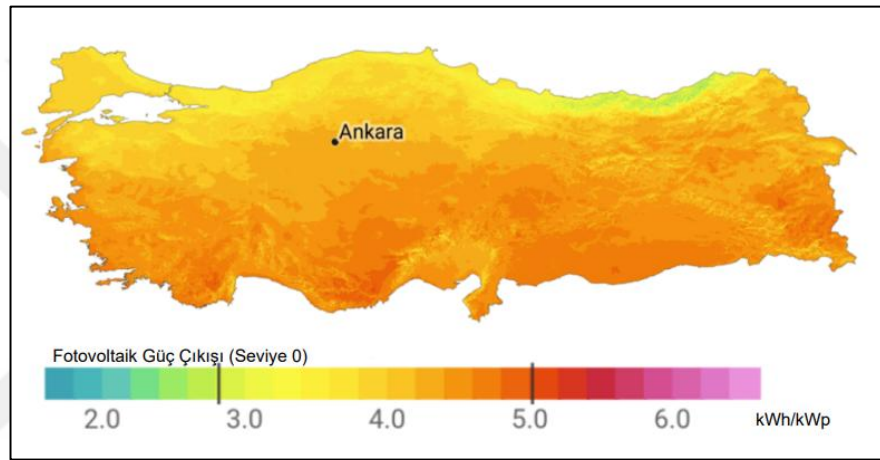
Arazi kullanımı, güneş enerjisi potansiyelini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, seviye 0, 1 ve 2 olarak sınıflandırılan arazi kullanımı kısıtlamaları dikkate alınmalıdır. Bunlar:

- **Seviye 0:** Bu seviye, herhangi bir arazi kullanımı kısıtlamasını dikkate almadan belirlenen pratik potansiyeli ifade eder. Yani, fiziksel veya yasal engeller göz önünde bulundurulmaz ve PV sisteminin maksimum güç çıkışı potansiyeli hesaplanır.
- **Seviye 1:** Bu seviyede, fiziksel engeller nedeniyle büyük ölçekli PV santralleri için uygun olmayan araziler hariç tutulur. Örneğin, arazinin yeterli güneş ışığı

alamayacağı veya altyapı veya coğrafi engellerin bulunduğu bölgeler hariç tutulabilir.

- **Seviye 2:** Seviye 2, Seviye 1'in aksine, doğal veya tarımsal arazi koruma nedenleriyle arazi kullanımı düzenlemeleri altında olan arazileri hariç tutar. Bu tür araziler, doğal habitatı korumak veya tarım arazilerini korumak amacıyla belirli düzenlemelere tabi olabilir.

Şekil 1.22'de Türkiye'nin seviye 0 yani herhangi bir arazi kullanım kısıtlaması olmadan elde edebileceği pratik PV güç çıkış değerlerini göstermektedir (GSA, 2022)



Şekil 1.22. Türkiye seviye 0 PV güç çıkış haritası (GSA, 2022)

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini analiz etmek için bir araç olan ve Şekil 1.22'de gösterilen seviye 0 için elde edilebilecek pratik PV güç çıkış değerlerini incelendiğinde, Türkiye'nin güneş enerjisi alanında sahip olduğu geniş potansiyel daha net anlaşılmaktadır. Özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi, yüksek güneş radyasyonu ve uzun güneşlenme süreleri ile Türkiye'nin en verimli bölgelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bölge, güneş enerjisi sistemlerinin kurulması ve işletilmesi için ideal koşullara sahiptir. Diğer yandan, Karadeniz Bölgesi gibi Türkiye'nin kuzeyinde yer alan bölgeler, daha düşük güneşlenme sürelerine ve dolayısıyla daha düşük PV güç çıkış değerlerine sahiptir.

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini belirlemede ve güneş enerjisi projeleri için stratejik planlamalar yapmada bu ve bunun gibi analizler önemli bir araçtır. Özellikle enerji sektörü uzmanları ve politika yapımcılar için Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmede önemli bir referans noktası sağlamaktadır. Ancak tek

başına enerji haritaları yeterli olmamaktadır. Bunların yanında sosyoekonomik ve coğrafi parametrelerinde incelenmesi gerekmektedir. Çizelge 1.5'te Türkiye'nin enerji ve sosyoekonomik alandaki parametreleri verilmiştir (GSA, 2024).

Çizelge 1.5. Türkiye'nin enerji ve sosyoekonomik parametreleri (GSA, 2024)

Parametreler	Değer
Toplam/Değerlendirilen Alan	785 350/778 921 km ²
Nüfus (2018)	82 319 724
GSYİH (2018)	9311 USD
İnsani Gelişim Endeksi (2017)	0.79/62
Kişi Başı Elektrik Tüketimi (2014)	2.847 kWh/yıl
Kurulu PV Kapasitesi (2018)	5.063 MWp
Ortalama Teorik Potansiyel (GHI)/Sıralama	4.598 kWh/m ² /138
Ortalama Pratik Potansiyel, Seviye 1/Sıralama	4.323 kWh/kWp/97
PV Eşdeğer Alanı	0.23 %
PVOUT Sezonluk Endeks (Ülke Aralığı)	2.41 (1.72 – 3.60)
LCOE Ortalaması (Ülke Aralığı)	0.08 (0.07 – 0.11)

Çizelge 1.5'te verilen toplam alan, bir ülkenin sahip olduğu toplam yüzey alanını ifade eder. Bu alan, iç su kümelerini ve bazı kıyı suyollarını da içerir. Öte yandan, değerlendirilen alan, istatistiklerin hesaplandığı gerçek alanı temsil eder. Bu değerlendirme sırasında kıyı suları dikkate alınmazken, büyük iç su kütlelerinin iç kısımları ve veri çözünürlüğünden kaynaklanan küçük sapmalar da göz önünde bulundurulabilir. Bu nedenle, değerlendirilen alan, istatistiklerin doğruluğunu artırmak ve karşılaştırmaları daha tutarlı hale getirmek için önemli bir role sahiptir. GSYİH, bir ülkenin gayri safi yurt içi hasılasının nüfusa bölünmesiyle elde edilen bir ölçümdür. Bu ölçüt, bir ülkedeki ortalama ekonomik refah düzeyini belirlemek için kullanılır. 2018 yılında Türkiye'nin GSYİH'si, 82 319 724 olan nüfusa bölündüğünde, kişi başına düşen GSYİH miktarı 9311 Amerikan Doları olarak hesaplanmıştır. Bu değer, bir ülkedeki kişi başına düşen ortalama geliri gösterir ve o ülkenin ekonomik refahını anlamak için önemli bir gösterge olarak kabul edilir. Yine çizelgede verilen insani gelişme endeksi (İGE), Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) tarafından her yıl yayımlanan bir raporla ölçülen bir göstergedir.

İnsani gelişme endeksi, ülkelerin insanların yaşam standartlarını ve refahını ölçmek için kullanılır. İGE, üç temel boyutta değerlendirme yapar: uzun ve sağlıklı bir yaşam (ortalama yaşam süresi), eğitim (ortalama eğitim süresi ve okuryazarlık oranı) ve standart bir yaşam standardı (kişi başına düşen milli gelir). Bu faktörlerin kombinasyonu ile hesaplanan İGE, ülkeleri insan gelişimi düzeylerine göre sıralar ve

karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır. Örneğin, Türkiye'nin 2017 yılında 0.79 olan İGE'si, ülkenin insanların yaşam kalitesi ve refahı konusundaki performansını gösterir ve 62. sıradaki yerini belirtir.

Ortalama teorik potansiyel (GHI), günlük yatay ışıınım anlamına gelen "global horizontal irradiance" ifadesinin kısaltmasıdır. Bu değer, bir yüzey birimine düşen güneş ışıınım enerjisinin ortalamasıdır ve kilovat saat cinsinden ölçülür. Sıralama ise, bu değer o ülke içindeki diğer ülkelere göre konumunu belirtir. Yani, Türkiye'nin GHI'si ne kadar yüksekse, güneş enerjisi potansiyeli o kadar yüksektir ve bu da Türkiye'nin güneş enerjisi üretimindeki potansiyelini gösterir.

Çizelge 1.5'te verilen başka bir parametre ise ortalama pratik potansiyel, seviye 1/sıralama'dır. Ortalama pratik potansiyel, seviye 1, güneşten gelen ışıınımın (GHI) fotovoltaik enerjiye dönüşüm oranıdır. Bu değer, bir PV sisteminin belirli bir yüzey alanı için yıllık ortalama enerji üretimini belirler. Türkiye gibi ülkelerde, pratik potansiyel genellikle teorik potansiyelden daha düşüktür çünkü çeşitli faktörler (hava koşulları, sistem verimliliği vb.) enerji üretimini etkiler. Seviye 1, arazi kullanımı ve fiziksel engeller gibi bazı kısıtlamaları dikkate alarak hesaplanan bir pratik potansiyel seviyesidir. Sıralama ise, bu değer o ülke içindeki diğer ülkelere göre konumunu belirtir. Dolayısıyla, Türkiye'nin seviye 1 pratik potansiyeli ne kadar yüksekse, güneş enerjisi sistemlerinden elde edilebilecek enerji miktarı o kadar yüksektir ve bu da ülkenin güneş enerjisi üretim potansiyelini gösterir.

PV eşdeğer alan parametresi ise fotovoltaik panellerin kurulu olduğu alanı ifade eder. Bu alan, PV panellerinin kurulduğu yüzey alanını ve bu panellerin verimliliğini hesaba katarak hesaplanır. Örneğin, bir PV sistemi için 1 kWp (kilovat pik) kurulum yapılmışsa, bu sistemin kurulu olduğu alan PV eşdeğer alanı olarak adlandırılır. PV eşdeğer alanı, güneş enerjisi sistemlerinin ne kadar yer kapladığını ve ne kadar enerji ürettiğini anlamak için kullanılan önemli bir ölçümdür.

PVOUT sezonluk endeks ise güneş enerjisi sistemlerinin yıllık enerji üretimindeki mevsimsel değişkenliği ölçen bir göstergedir. Bu endeks, bir ülkenin veya bölgenin güneş enerjisi sistemlerinden elde edilen enerjinin, yıl boyunca ne kadar dengesiz olduğunu gösterir. Endeks ne kadar yüksekse, mevsimsel değişkenlik o kadar

belirgindir. Örneğin, bir ülkenin PVOUT Sezonluk Endeksi 2.41 ise, bu ülkede güneş enerjisi sistemlerinden elde edilen enerjinin yıl boyunca mevsimsel olarak ne kadar değişken olduğunu gösterir. Endeks, 1'e ne kadar yakınsa, mevsimsel değişkenlik o kadar azdır. Yani, 1'e yakın bir değer daha istikrarlı bir enerji üretimini gösterirken, 2.41 gibi daha yüksek bir değer daha fazla mevsimsel değişkenlik olduğunu gösterir. Dolayısıyla, bir ülkenin PVOUT sezonluk endeksi ne kadar düşükse, güneş enerjisi sistemlerinin yıl boyunca daha istikrarlı bir şekilde enerji üretebildiği anlamına gelirken, endeks ne kadar yüksekse, enerji üretimindeki mevsimsel değişkenliğin o kadar fazla olduğunu gösterir.

Son olarak LCOE, İngilizce "levelized cost of energy" ifadesinin kısaltmasıdır ve Türkçe'de "enerjinin düzeylenmiş maliyeti" olarak adlandırılır. LCOE, bir enerji üretim tesisinin ömrü boyunca ürettiği elektrik enerjisinin birim maliyetini hesaplamak için kullanılan bir ölçümdür. Bu maliyet, enerji üretim tesisi için yapılan yatırımın, işletme ve bakım maliyetlerinin yanı sıra yakıt maliyetlerini de içerir. LCOE'nin ülke aralığı ise, farklı ülkelerdeki enerji üretim tesislerinin LCOE değerlerinin belirli bir aralıkta olabileceğini gösterir. Bu değerler, ülkeler arasındaki enerji politikaları, kaynakların erişilebilirliği, teknolojik altyapı ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Örneğin, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretim tesislerinin LCOE değerleri genellikle fosil yakıtlara dayalı tesislere göre daha düşüktür. Bu nedenle, LCOE değerleri, enerji üretim maliyetlerini karşılaştırmak ve enerji politikalarını değerlendirmek için önemli bir ölçüttür.

Çizelge 1.5'te verilen faktörler ışığında Türkiye'nin enerji üretim ve yenilenebilir enerji dönüşümü incelendiğinde; ülkemizin yüksek ortalama teorik potansiyele (GHI) sahip bir ülke olduğu görülmektedir. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabileceği anlamına gelmektedir. Pratik potansiyelde (seviye 1) teorik potansiyele göre bir miktar düşüş vardır, bu da çeşitli faktörlerin (örneğin, hava koşulları, sistem verimliliği) enerji üretimini etkileyebileceğini gösterir. Buna rağmen genel sıralama açısından teorik potansiyelde ülkemiz 138. sırada iken pratik potansiyelde 97. sıradadır. Bunun anlamı ülkemizin teoriden pratiğe geçişte ortam değişkenleri açısından da diğer ülkelere göre avantajlı olduğunu göstermektedir.

İnsani gelişim endeksi üzerinden baktığımızda ülkemiz 62. sıra ile orta seviyelerdedir. Bu da ülkedeki insanların yaşam kalitesinin ve refahının geliştirilebileceği anlamına gelmektedir. Türkiye'nin LCOE ortalaması düşük olduğundan enerji üretim maliyetlerinin göreceli olarak uygundur. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretiminin ekonomik açıdan mümkün ve cazip kılmaktadır. Bu sayede enerji sektöründe yapılacak iyileştirmeler, insanların yaşam standartlarını artıracığından dolayı olarak insani gelişim endeksini de artırmış olacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve ekonomik göstergeleri bir araya geldiğinde, ülkenin yenilenebilir enerjiye yönelik stratejiler geliştirme ve enerji verimliliğini artırma konusunda büyük bir fırsata sahip olduğu görülmektedir. Bu potansiyeli değerlendirmek, sadece enerji sektöründe değil, aynı zamanda ekonomik kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemlidir.

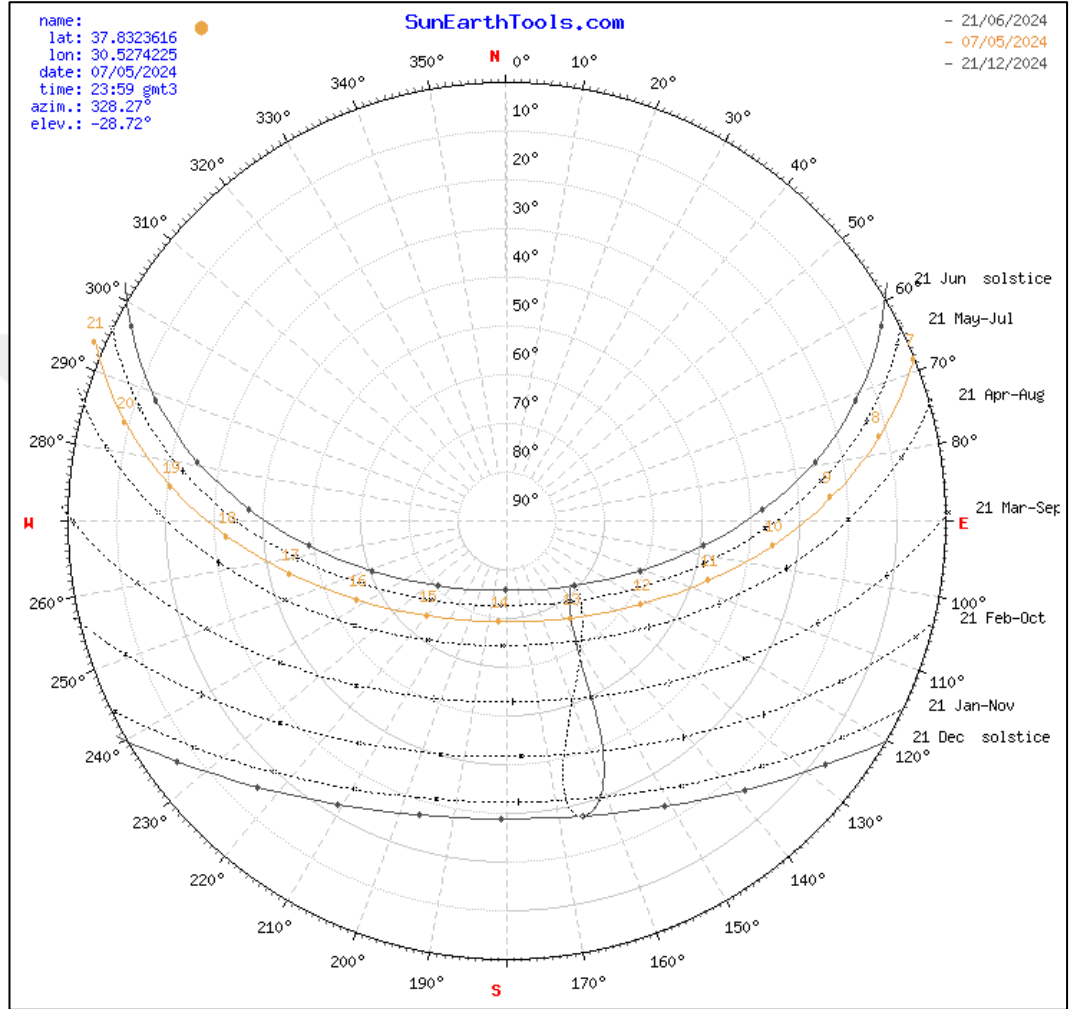
1.5.3. Isparta güneş enerji potansiyeli

Isparta, Türkiye'nin güneybatısında, Akdeniz Bölgesi'nde bulunan bir şehirdir. "Göller Bölgesi"nin merkezi konumundadır. İl, 30°20' ve 31°33' doğu boylamları ile 37°18' ve 38°30' kuzey enlemleri arasında bulunmaktadır. Ayrıca, Isparta'nın düz arazi yapısı ve engellerin azlığı da güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu için avantajlı bir durumdur. Bu sayede, güneş enerjisi panellerinin en uygun konumlandırılması ve güneş ışınlarını en verimli şekilde yakalaması mümkün olmaktadır. Şekil 1.23'te sistem deneylerinin konumu gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Deney sisteminin konumu

Şekil 1.23'te verilen konum 37.832421° , 30.527363° enlem ve boylamında ve 1039 metre rakımda bulunan Isparta Uygulamalı Bilimler Çünür Kampüsü'dür. Belirtilen deney konumunda güneşin deney konumu referans alındığında güneşin azimut ve yükseklik açı değişimi Şekil 1.24'te gösterilmiştir (SunEarthTools, 2024).



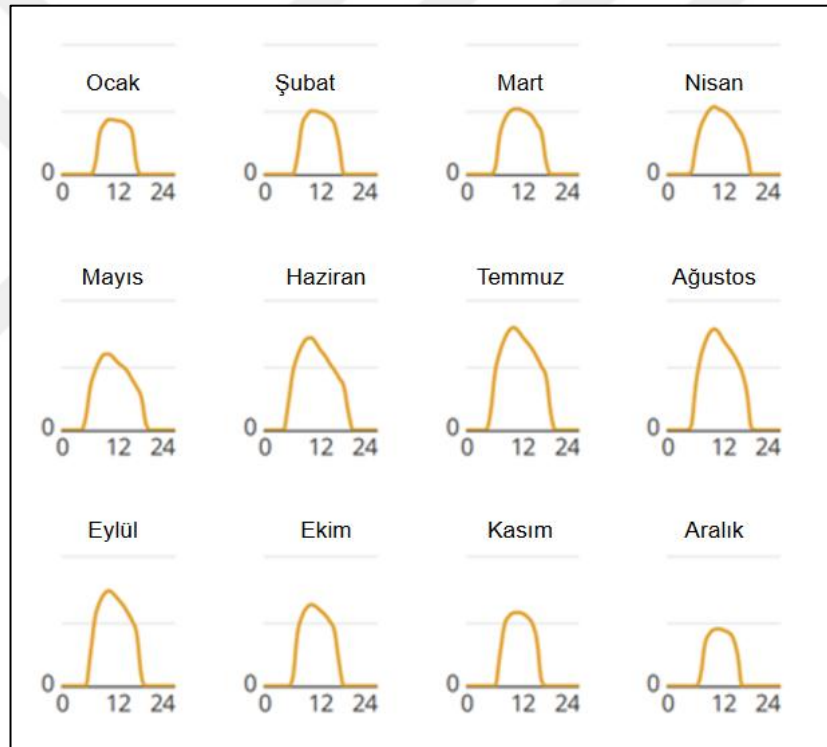
Şekil 1.24. Deney konumunda güneş yükseklik ve azimut açısı değişimi (SunEarthTools, 2024)

Şekil 1.24'te gösterilen turuncu çizgi güneşin şu anki güneş yükseklik açısını (günlük) verirken diğer çizgiler ise güneş yükseklik ve azimut açılarının yıllık değişimlerini göstermektedir. Buna göre 21 Aralık tarihinde güneş yükseklik açısı en düşük değerini alırken 21 Haziran tarihinde güneş yükseklik açısı en yüksek değerine ulaşmaktadır. Şekil 1.19'da gösterildiği üzere Isparta, ülkemizin diğer bölgelerine nazaran daha yüksek güneş enerji potansiyeline sahip bir şehrimizdir. Çizelge 1.6'da Isparta ilinin yıllık enerji, güneş ve iklim verileri verilmiştir (GSA, 2023c).

Çizelge 1.6. Isparta ilinin yıllık güneş ve iklim parametreleri (GSA, 2023c)

Parametreler	Değer	Birim
PV Güç Çıkışı	1648.9	kWh/kW _p
Direkt Normal Radyasyon	1923.5	kWh/m ²
Global Yatay Radyasyon	1774.6	kWh/m ²
Difuz Yatay Radyasyon	616.9	kWh/m ²
Optimum Kolektör Eğim Açısı	33/180	°
Hava Sıcaklığı	13.1	°C
Rakım	1039	Metre

Çizelge 1.6’da verilen Isparta iline ait direkt normal radyasyon değeri bölgede gerçekleştirilecek bir güneş enerji sisteminden optimum verim alınabileceğini göstermektedir. Şekil 1.25’te Isparta iline ait aylık direkt normal radyasyon (DNI) değerleri (Wh/m²) gösterilmiştir (GSA, 2023c).



Şekil 1.25. Isparta ilinin aylık direkt normal radyasyon değerleri (GSA, 2023c)

Şekil 1.25’te Isparta iline ait aylık direkt normal radyasyon değerlerinin mevsimsel değişkenliği görülmektedir. Bu değerler, güneş enerjisi sistemlerinin farklı aylarda nasıl performans gösterebileceği konusunda bilgiler vermektedir. Kış aylarında düşük radyasyon değerleri gözlemlenebilir. Bu durum, güneşin daha düşük açılarda olduğu ve dolayısıyla güneş enerjisi sistemlerinin daha az enerji üretebileceği anlamına gelir. Bahar aylarında radyasyon değerlerinde bir artış görülmektedir. Bu durum belirtilen tarih aralıklarında sistemlerin daha verimli çalışabileceği anlamına gelmektedir. Yaz

aylarında en yüksek radyasyon değerleri gözlemlenir. Bu dönemde güneş enerjisi sistemleri teorik olarak en verimli şekilde çalışmakta ve maksimum enerji üretme potansiyeline sahip olmaktadır. Sonbahar aylarında radyasyon değerlerinde bir azalma görülmektedir. Bu veriler, güneş enerjisi projeleri için en uygun ayların genellikle yaz ayları olduğunu göstermektedir. Ancak, sistemlerin yıl boyunca enerji üretmeye devam edebileceği ve kış aylarında da kullanışlı olabileceği görülmektedir.

1.5.4. Güneş radyasyonu

Güneş ışıınımı, güneşten yayılan elektromanyetik radyasyonun genel adıdır. Bu radyasyon, farklı dalga boylarında ve enerjilerde gelir. Güneş ışıınımı, güneşin içindeki termonükleer reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonlarda hidrojen atomları helyum atomlarına dönüşürken büyük miktarda enerji açığa çıkar. Güneş ışıınımı, uzay boşluğunda hızla yayılır ve Dünya'ya ulaşır.

Güneş ışıınımının bir kısmı atmosfer tarafından emilir, yansıtılır veya saçılır. Atmosferin dışına ulaşan güneş ışıınımı ise Dünya'nın yüzeyine ulaşır. Yüzeye ulaşan ışıınımlar direkt, difüz ve global olmak üzere 3'e ayrılmaktadır.

- **Direkt ışıınım:** Güneş'ten gelen ve atmosferde neredeyse hiç saçılmayan veya absorbe edilmeyen ışıımadır. Bulutlu olmayan bir günde, Güneş'ten gelen ışıınlar genellikle doğrudan yere ulaşır.
- **Difüz ışıınım:** Güneş'ten gelen ve atmosferde saçılan veya yansıyan ışıımadır. Atmosferdeki moleküller ve parçacıklar nedeniyle yön değiştirir ve farklı yönlerde dağılır. Bulutlu bir günde veya Güneş'in daha alçakta olduğu saatlerde gökyüzü daha fazla difüz ışııma ile parlak görünebilir.
- **Global ışıınım:** Direkt ve difüz ışıınımın toplamıdır. Yani, Güneş'ten gelen ve her iki şekilde de atmosferde dağılan veya yansıyan tüm ışıımadır. Global ışıınım, bir yüzey veya alana ulaşan toplam güneş enerjisi miktarını temsil eder.

Direkt ışıınım (I_D), güneş ışıınlarının dik olan bir düzlem üzerine düşmesiyle, o düzlem üzerinde alınan toplam güneş ışıınım miktarıdır. Direkt ışıınım yoğunluğunun birimi kW/m^2 'dir. Direkt ışıınım formülü Denklem (1.1)'de verilmiştir (Meinel ve Meinel, 1976).

$$I_D = 1.353 \cdot 0.7^{AM^{0.678}} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de 1.353 sabit sayısının birimi kW/m² 'dir. 0.7 katsayısı ise atmosfer üzerine düşen ışınının %70'i yeryüzüne aktarıldığı için alınmıştır. 0.678 ise ekstra güç terim katsayısıdır. Güneş ışığı yoğunluğu deniz seviyesi ile doğru orantılıdır. Eğer bu bilgiye göre direkt ışınım formülü revize edildiğinde Denklem (1.2)'de verilen formül elde edilmektedir (Laue, 1970).

$$I_D = 1.353 [(1 - a_h) 0.7^{AM^{0.678}} + a_h] \quad (1.2)$$

Denklem (1.2)'de verilen a, sabit katsayı ve değeri 0.14, h ise konumun deniz seviyesinden kilometre (km) cinsinden değeridir.

Difüz ışınım, güneşten gelen ışınların atmosferde saçılması veya yansımaları sonucu oluşan yayılmış ışımadır. Bu tür ışınım, atmosferdeki gaz molekülleri, su damlacıkları ve diğer partiküller tarafından saçılarak farklı yönlerde yayılır. Difüz ışınım, gökyüzünü gözlemlediğimizde güneşin konumuna bağlı olmaksızın gökyüzünde görülen genel aydınlık ve parlaklığı sağlar.

Difüz ışınımın atmosferdeki dağılımı, gökyüzünün mavi görünmesinin ana nedenlerinden biridir. Mavi ışık, diğer renklere göre daha fazla saçılır ve bu nedenle gökyüzü mavi renkte görünür. Bu saçılma, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır ve atmosferdeki gaz moleküllerinin boyutu ile ilişkilidir. Difüz ışınım, bulutlu veya puslu günlerde de gözlemlenebilir. Bulutlar veya diğer partiküller, güneşten gelen ışınları saçarak ve yansıtarak, bu ışınların doğrudan yere ulaşmasını engeller. Bu durumda, atmosferde daha fazla difüz ışınım oluşur ve güneş ışığı daha yumuşak ve dağınık bir şekilde yayılır.

Global ışınım ise güneşten gelen ve bir yüzey veya alana ulaşan toplam güneş enerjisi miktarını temsil eder. Bu enerji, direkt ve difüz ışınımın toplamıdır. Global ışınım, bir bölgenin iklimini ve çevresel koşullarını belirlemede önemli bir faktördür çünkü toplam güneş enerjisi, bitki örtüsü, su buharı, bulutlar ve diğer atmosferik koşullar tarafından etkilenir.

Global ışınlm, bir yzeyin veya alana ulaşan gneş enerjisinin olçümü için kullanılan bir terimdir. Bu olüm genellikle Watt/metrekare cinsinden ifade edilir ve belirli bir süre boyunca alana dşen ışınlm miktarını gösterir. Bu değer, gneş ışınlmının yoğunluğunu ve süresini belirleyen faktörlere bağlı olarak değişebilir. Global ışınlm, bir bölgedeki iklim ve hava koşullarını anlamak için önemlidir. Örneğin, bir bölgedeki mevsimsel değişiklikler, günlük gneşlenme süreleri ve bulut örtüsü gibi faktörler, global ışınlmı etkileyebilir. Ayrıca, global ışınlm, gneş enerjisi kullanımı için potansiyel bir gösterge olarak da kullanılabilir. Açık bir günde küresel ışınlm (I_G), dünyadaki herhangi bir düzlem üzerine dşen toplam ışınlm miktarıdır ve direkt ışınlmdan %10 daha fazladır. Küresel ışınlm formülü Denklem (1.3)'te verilmiştir (Temir, 2019).

$$I_G = 1.1 \cdot I_D \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'te verilen 1.1 değeri global ışınlm ile direkt ışınlm arasındaki oran katsayısını ifade etmektedir. Son olarak ışınlm hesaplamalarında yardımcı olan hava kütle katsayısının hesaplanması gerekmektedir.

Hava kütle katsayısı, bir yzeyin veya materyalin belirli bir kalınlıktaki hava tabakası tarafından geçirilen gneş ışınının miktarını olen bir terimdir. Bu katsayı, gneş ışınlmının bir yzey üzerine dşe me açısına ve atmosferdeki hava yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir. Hava kütle katsayısı (Air mass) "AM" olarak kısaltılır ve 1 ile 10 arasında değer alabilir. AM_1 , Güneş'in tam olarak tepeden geldiği durumu ifade ederken, AM_{10} ise güneşin çok alçakta olduğu sabah veya akşam saatlerini temsil eder. Hava kütle katsayısı, gneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak kullanılır. Daha dşeük bir hava kütle katsayısı, daha dik bir açıyla gelen gneş ışınının daha yoğun olduğu anlamına gelirken, daha yüksek bir hava kütle katsayısı, gneş ışınının daha az yoğun olduğu ve daha uzun bir yol katettiği anlamına gelir. Bu nedenle, hava kütle katsayısı, gneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek için önemli bir faktördür.

Hava kütle katsayısı, normalize edilmiş atmosferden geçen ışığın, bu geçişteki azalma oranını veren bir parametredir. Hava kütle katsayısı formülü Denklem (1.4)'te verilmiştir (PVE, 2023a).

$$AM = \frac{1}{\cos \tau} \quad (1.4)$$

Denklem (1.4)'te verilen hava kütlesi katsayısı, atmosferin yatay bir tabaka olduğu varsayılarak hesaplanmıştır. Ancak atmosferimizin eğriliğinin de hesaba katıldığı formül Denklem (1.5)'te verilmiştir (Kasten ve Young, 1989).

$$AM = \frac{1}{\cos \tau + 0.50572(96.07995 - \tau)^{-1.6364}} \quad (1.5)$$

1.5.5. Güneş açısı ve hesapları

Güneş açıları, güneşin gökyüzünde görülen konumunu tanımlayan ve birçok alanda önemli olan geometrik açılardır. Bu açılar, güneş ışınlarının dünyanın yüzeyine düşme açısını belirler ve birçok uygulamada büyük önem taşır. Güneş açılarının en önemli uygulamalarından biri güneş enerjisi sistemleridir. Güneş panellerinin verimliliği, güneş ışınlarına ne kadar dik bir açıyla yerleştirildiklerine bağlıdır. Dik açıyla yerleştirilen paneller, daha fazla güneş enerjisi emebilir ve daha verimli bir şekilde enerji üretebilir. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve kurulumunda güneş açıları büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde bu güneş açılarının ne olduğu ve nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.

1.5.5.1. Enlem açısı

Enlem açısı, bir yerin kuzey veya güney yarım küresindeki konumunu belirten bir açıdır. Dünya, kuzey-güney yönünde kutuplara doğru eğik bir eksenle döner. Bu eğiklik nedeniyle, dünya üzerindeki herhangi bir nokta, ekvator düzlemine göre belirli bir açıyla eğiktir. Bu açıya enlem açısı denir. Enlem açısı, genellikle derece cinsinden ifade edilir ve bir yerin ekvatorun kuzeyinde veya güneyinde ne kadar olduğunu belirtir. Örneğin, Ekvator'da enlem açısı 0 derecedir, Kuzey Kutbu'nda enlem açısı 90 derecedir ve Güney Kutbu'nda enlem açısı -90 derecedir.

Enlem açısı, coğrafi konumların belirlenmesinde önemli bir role sahiptir. Bir yerin enlem açısı, o yerin güneşin konumunu ve ışık alımını belirlemesine yardımcı olur. Örneğin, enleme bağlı olarak güneşin doğuş ve batış açıları, gün ışığı süreleri ve

mevsimsel değişiklikler gibi faktörlerde farklılıklar görülür. Ayrıca, enlem açısı, navigasyon ve harita yansıtımalarında da önemlidir. Haritalar, dünya yüzeyini yuvarlak bir yüzeye (harita düzlemine) yansıtmak için kullanılır. Bu yansıma işlemi, enlem açılarına ve dünya yüzeyindeki konumların belirlenmesine dayanır.

Sonuç olarak, enlem açısı, bir yerin kuzey veya güney konumunu belirten ve coğrafi, astronomik ve harita projeksiyonları gibi alanlarda önemli bir rol oynayan bir kavramdır. Enlem açısı, dünya üzerindeki konumların belirlenmesi ve güneşin konumunun hesaplanması gibi birçok uygulamada kullanılır.

1.5.5.2. Boylam açısı

Boylam açısı, bir yerin doğu veya batı yönündeki konumunu belirten bir açıdır. Dünya üzerindeki herhangi bir nokta, kuzey-güney doğrultusunda geçen bir doğru üzerinde yer alır. Bu doğruya Dünya'nın dönme eksenini denir. Boylam açısı, bu dönme eksenini etrafında bir tam turda 360 dereceye kadar değişir.

Boylam açısı, derece cinsinden ifade edilir ve bir yerin doğu veya batı boylamındaki konumunu belirtir. Greenwich, İngiltere'deki Kraliyet Gözlemevi'nin bulunduğu yer, boylamın sıfır noktası olarak kabul edilir ve bu noktadan doğuya ve batıya doğru 180 dereceye kadar artar. Doğru yönünde artan boylam değerleri doğu boylamını, batı yönünde azalan değerler ise batı boylamını temsil eder.

Boylam açısı, zaman belirleme ve yerel saatlerin hesaplanması için de önemlidir. Zaman dilimleri genellikle belirli boylam aralıklarında tanımlanır ve her boylam diliminde yerel saat farklı olabilir. Örneğin, Greenwich Ortalama Zamanı (GMT), boylam sıfırında yer alan İngiltere'nin yerel saatidir.

Sonuç olarak, boylam açısı, bir yerin doğu veya batı yönündeki konumunu belirten ve coğrafi, astronomik ve harita yansıtımları gibi alanlarda önemli bir rol oynayan bir kavramdır. Boylam açısı, dünya üzerindeki konumların belirlenmesi, zaman belirleme ve harita projeksiyonlarında kullanılır.

1.5.5.3. Saat açısı

Saat açısı (ω), güneşin gökyüzünde gözlemcinin konumuna göre ne kadar yüksek veya alçakta olduğunu gösteren açıdır. Güneşin konumu saat açısı kullanılarak belirlenir ve bu açı, güneşin doğuş ve batış zamanları gibi önemli olayları belirlemek için kullanılır.

Saat açısı, güneşin gökyüzündeki konumu ile yerel orta saat arasındaki açıdır. Yerel orta saat, bir yerdeki güneşin tam olarak güneye doğru baktığı zamandır. Saat açısı, güneşin bu konumdan ne kadar saparak doğu veya batı yönünde olduğunu gösterir. Örneğin, öğlen vaktinde güneş tam olarak güneye doğru baktığında saat açısı 0 derecedir. Öğleden sonra saat açısı artar ve güneş batarken en yüksek değere ulaşır. Saat açısı, güneşin yüksekliği ve doğu-batı yönündeki konumu hakkında bilgi sağlar. Özellikle güneş enerjisi sistemleri ve tarımda saat açısı kullanılarak güneşin en verimli bir şekilde kullanılması sağlanır. Güneşin doğuş ve batış zamanları da saat açısı ile belirlenir ve günün ne zamanının aydınlık veya karanlık olduğunu belirler.

Saat açısı(ω), yerel güneş saatinin açısal değeri olarak ifade edilebilir. Saat açısı, öğle vakti 0° 'dir. Dünya her bir saatte 15° döndüğü için gün içinde saat açısı, saat başına 15° 'er derece artmaktadır. Saat açısı, öğleden önce negatif (-), öğleden sonra ise pozitif (+)'dir. Denklem (1.6)'da saat açısının denklemi verilmiştir (PVE, 2022c).

$$\omega = 15 \cdot ((LH + (LM/60)) - 12) \quad (1.6)$$

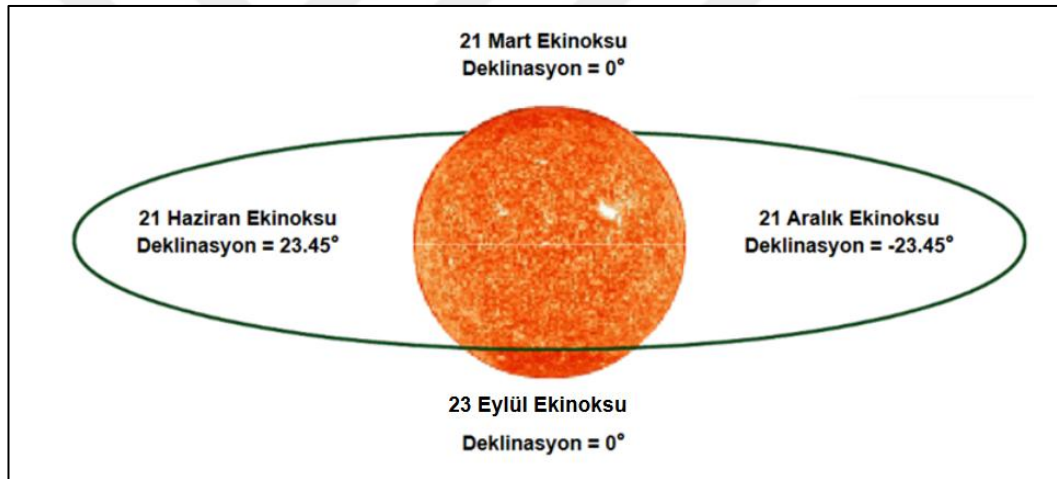
Denklem (1.6)'da verilen formülde ω , saat açısı, LH (local hour), yerel saat, LM (local minute), yerel dakikayı temsil etmektedir. Denklemde verilen yerel saat ve yerel dakika değerleri sistemimizde bulunan GPS sensörü aracılığı ile elde edilecektir.

1.5.5.4. Deklinasyon açısı

Deklinasyon açısı (δ), güneşin gökyüzündeki konumunu belirlemek için kullanılan bir açıdır. Bu açı, güneşin gök ekvatoru üzerindeki konumunu ifade eder ve güneşin yıl boyunca gökyüzündeki hareketi sırasında mevsimler arasındaki farklılıkları belirler.

Gök ekvatoru, dünya yüzeyini çevreleyen sanal bir çemberdir ve dünya eksenine paralel olarak uzanır. Güneş'in gök ekvatoru üzerindeki konumu, deklinasyon açısı olarak adlandırılan açı ile ifade edilir. Deklinasyon açısı, gök ekvatoru düzlemi ile güneşin konumu arasındaki açıdır.

Deklinasyon açısı(δ), dünya ve güneş arasındaki açının dünyanın ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Deklinasyon açısı, kuzey yarım küre için pozitif (+), güney yarım küre için negatif (-) değerlidir. Deklinasyon açısı, 21 Aralık kış gündönümünde $-23,45^\circ$ ile 21 Haziran yaz gündönümünde $+23,45^\circ$ arasında değişmektedir. Ayrıca deklinasyon, İlkbahar ekinoksunda (21 Mart) ve Sonbahar ekinoksunda (23 Eylül) 0° açısal değere sahip olur. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi Şekil 1.26'da gösterilmiştir (PVE, 2023b).



Şekil 1.26. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi (PVE, 2023b)

Deklinasyon açısı, Denklem (1.7), Denklem (1.8) ve Denklem (1.9)'da verilen Cooper denklemleri yardımıyla hesaplanabilir (Cooper, 1969).

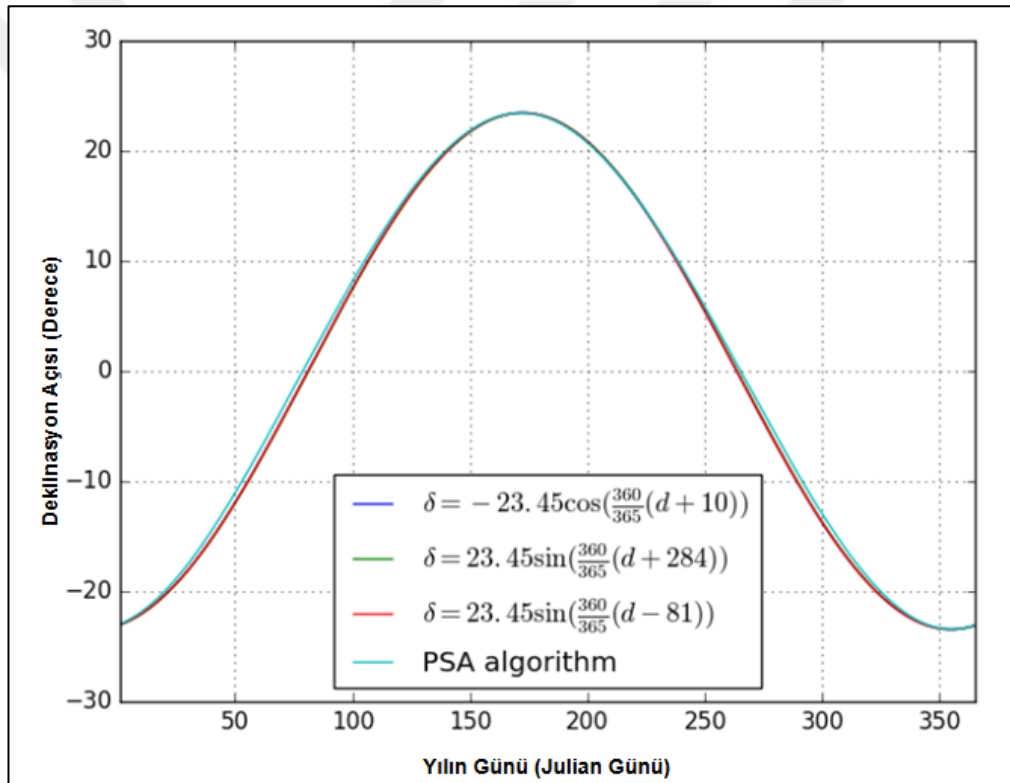
$$\delta = -23.45 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (d+10)\right) \quad (1.7)$$

Denklem (1.7)'de verilen d, 1 Ocaktan itibaren geçen gün sayısıdır. Bu değer GPS sensörü tarafından karşılanmakta ve bu sayede deklinasyon açısının hesabı yapılabilmektedir. Deklinasyon açısını bulmak için birden fazla denklem bulunmaktadır. Bu denklemler Denklem (1.8) ve Denklem (1.9)'da verilmiştir.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (d+284)\right) \quad (1.8)$$

$$\delta = 23.45 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (d-81)\right) \quad (1.9)$$

Bu denklemler haricinde deklinasyon açısının hesabı için PSA (Position Solar Algorithm) kullanılmaktadır. Denklem (1.7), Denklem (1.8) ve Denklem (1.9)'da verilen denklemler ve PSA yöntemi sonuç olarak aynı açığı vermektedir. Şekil 1.27'de deklinasyon hesap yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir (Blanco-Muriel vd., 2001).

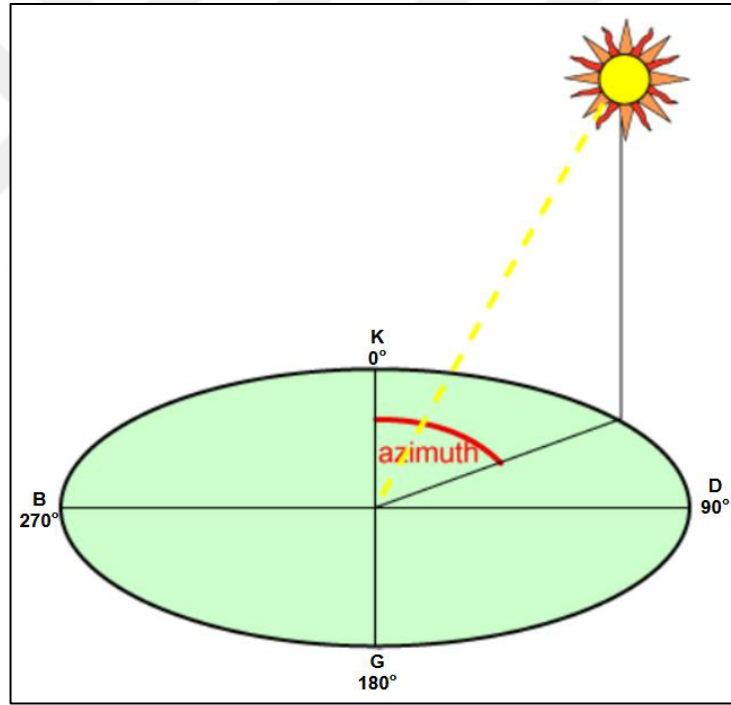


Şekil 1.27. Deklinasyon açısı formüllerinin karşılaştırılması (Blanco-Muriel vd., 2001)

Denklem (1.7), Denklem (1.8) ve Denklem (1.9)'da verilen formüller ve PSA algoritması incelendiğinde Şekil 1.27'de görüldüğü üzere deklinasyon açısının sonucu bütün yöntemlerde aynı olmaktadır. Bu nedenle deklinasyon açısı hesaplarımızda bu yöntemlerin herhangi birinin kullanılması sorun teşkil etmeyecektir.

1.5.5.5. Azimut açısı

Azimut açısı (γ), güneşin doğu veya batıya ne kadar uzakta olduğunu gösteren açıdır. Bu açı, kuzey veya güney doğrultusuna göre hesaplanır ve güneşin doğuş veya batış noktasına göre değer alır. Azimut açısı, güneşin doğu veya batı yönünde ne kadar uzakta olduğunu belirlemek için kullanılır ve özellikle güneş panellerinin optimal konumlandırılması için önemlidir. Azimut açısı hesaplarında genellikle kuzey referans olarak alınmaktadır. Bu nedenle temel olarak güneş doğarken azimut açısı 90° , güneş batarken 270° olmaktadır. Ayrıca bu açı, enleme(ϕ), deklinasyon açısına(δ), yükseklik açısına(α) ve saat açısına(ω) bağlıdır. Şekil 1.28'de azimut açısının kuzeydoğu yönünde örnekleme ve Denklem (1.10)'da formülü verilmiştir (PVE, 2022a).



Şekil 1.28. Azimut açısının gösterimi (PVE, 2022a)

Yukarıda bulunan Şekil 1.28'de gösterilen azimut açısının hesaplanması adına Denklem (1.10)'da formülü verilmiştir.

$$\gamma = \frac{\cos^{-1}[\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega)]}{\cos \alpha} \quad (1.10)$$

Denklem (1.10)'da azimut açısının hesaplanması adına gerekli olan deklinasyon, enlem, saat açısı ve güneş yükseklik açıları formüle dâhil edilmiştir. Azimut açısı, güneş panellerinin ve kolektörlerinin güneş ışınlarına ne kadar doğru bir şekilde yönlendirildiğini belirlemek için kullanılır. Güneş enerjisi sistemlerinde, güneş panellerinin azimut açısı doğru bir şekilde ayarlanmalıdır çünkü güneşin yönüne göre optimal bir açıda yerleştirilen paneller daha fazla güneş enerjisi emebilir ve daha verimli bir şekilde enerji üretebilir.

Sonuç olarak, azimut açısı güneşin doğu veya batı yönündeki konumunu belirlemek için kullanılan ve özellikle güneş enerjisi sistemleri için önemli olan bir açıdır. Güneş panellerinin ve kolektörlerinin doğru bir şekilde ayarlanması için azimut açısının doğru bir şekilde hesaplanması ve kullanılması gerekmektedir.

1.5.5.6. Güneş yükseklik açısı

Güneş yükseklik açısı (α), güneşin gözlemcinin yatay düzlemi ile yaptığı açığı ifade eder. Bu açı, güneşin gökyüzünde ne kadar yüksek veya alçakta olduğunu belirler ve güneşin dik veya yatay bir açıyla gözlemcinin üzerine düştüğünü gösterir.

Güneş yükseklik açısı derece cinsinden ifade edilir ve 0 derece ile 90 derece arasında değer alır. Güneşin doğrudan gözlemcinin üzerine düştüğü durumda güneş yükseklik açısı 90 derecedir, bu durumda güneş gözlemcinin tam üzerindedir. Güneş yükseklik açısı ne kadar büyükse, güneş gökyüzünde o kadar yüksekte yer alır ve gözlemcinin üzerine o kadar dik bir açıyla düşer.

Güneş yükseklik açısı, güneşin gökyüzünde ne kadar yüksek veya alçakta olduğunu belirlediği için birçok uygulamada önemli bir rol oynar. Özellikle güneş enerjisi sistemleri için güneş yükseklik açısı, güneş panellerinin ne kadar verimli bir şekilde güneş enerjisi topladığını belirler. Güneş panelleri, güneş ışınlarını en verimli şekilde alabilmek için güneş yükseklik açısına göre doğru bir şekilde konumlandırılmalıdır. Kısaca güneş yükseklik açısı, güneş doğarken 0° , güneş tam tepede iken 90° 'dir. Güneş yükseklik açısı, gün boyunca güneşin hareketi ile beraber sürekli değişmektedir. Ayrıca yükseklik açısı bir yerin enlemine(ϕ) ve deklinasyon açısına(δ)

göre değişmektedir. Güneş yükseklik açısı Denklem (1.11) ile hesaplanmaktadır (PVE, 2022b).

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega)] \quad (1.11)$$

Sonuç olarak, güneş yükseklik açısı, güneşin gözlemcinin yatay düzlemi ile yaptığı açıyı ifade eder ve güneşin ne kadar yüksek veya alçakta olduğunu belirler. Bu açı, güneş enerjisi sistemleri, tarım, coğrafya ve diğer birçok alanda kullanılan önemli bir kavramdır.

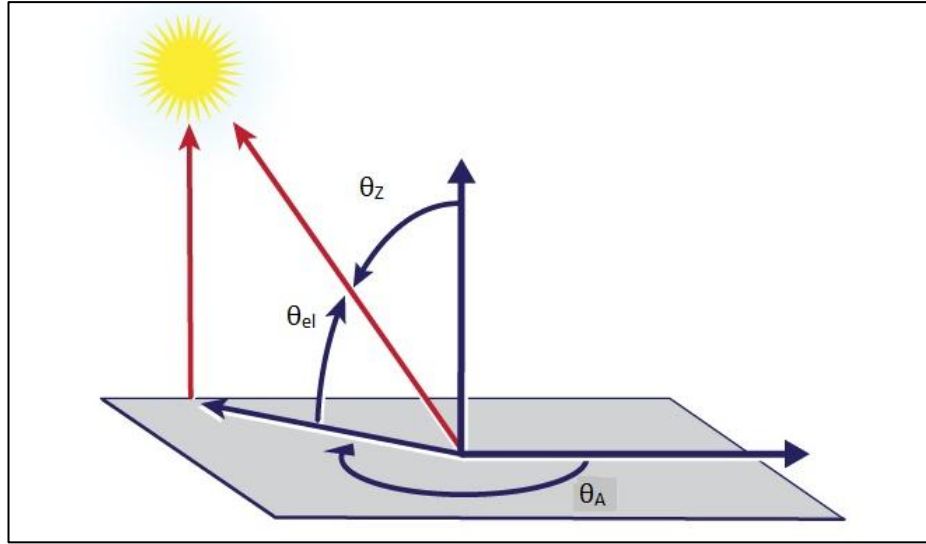
1.5.5.7. Zenit açısı

Zenit açısı, gözlemcinin konumunda gökyüzünde doğrudan başının üzerinde bulunan noktanın, yani zenit noktasının güneşin konumuna olan açısını ifade eder. Zenit açısı genellikle derece cinsinden ölçülür ve gözlemcinin tam olarak güneşe dik bir şekilde bakıp bakmadığını belirler.

Zenit açısı (τ), güneşin en yüksek noktada olduğu zamandaki açıdır ve bu durumda zenit açısı 90 derecedir. Güneşin yükseklik açısı ve saat açısı da bu durumda en yüksek değerlerine ulaşır. Zenit açısı, güneşin gözlemcinin üzerindeki konumunu belirler ve güneşin ne kadar dik bir açıyla gözlemcinin üzerine düştüğünü gösterir. Zenit açısı, yükseklik açısına benzerdir ancak yükseklik açısı yatayda ölçülürken, zenit açısı dikeyde ölçülmektedir. Bu yüzden zenit ile yükseklik açısı birbirlerini terslemektir. Zenit açısı ile güneş yükseklik açısının karşılaştırılması Şekil 1.29'da, formülü ise Denklem (1.12)'de verilmiştir (PVE, 2022b).

$$\tau = 90 - \alpha \quad (1.12)$$

Denklem (1.12)'de gösterildiği üzere zenit ve güneş yükseklik açılarının toplamı aralarında tersleme ilişkisi olduğundan 90 dereceye eşit olmaktadır.



Şekil 1.29. Zenit ve güneş yükseklik açısı ilişkisi (PVE, 2022b)

Şekil 1.29’da verilen θ_{el} , yataya göre ölçülen güneş yükseklik açısını, θ_z , dikeyde ölçülen zenith açısını, θ_A ise kuzeye göre ölçülen azimuth açısını ifade etmektedir. Zenit açısı, özellikle güneş enerjisi sistemleri ve gözlem amaçlı teleskoplar gibi uygulamalarda önemli bir rol oynar. Güneş enerjisi sistemleri için, güneş panellerinin ve kolektörlerinin en verimli şekilde çalışabilmesi için güneşin doğru açıyla alınması gerekmektedir. Bu nedenle, güneşin konumunu belirlemek ve zenit açısını hesaplamak büyük önem taşır.

Sonuç olarak, zenit açısı, gözlemcinin konumunda gökyüzünde doğrudan başının üzerinde bulunan noktanın güneşin konumuna olan açısını belirler. Bu açı, güneş enerjisi sistemleri, astronomi ve diğer gözlem amaçlı uygulamalarda önemli bir rol oynar. Zenit açısı, güneşin konumu ve hareketi hakkında detaylı bilgi sağlar ve güneşle ilgili çeşitli uygulamalarda kullanılır.

Bu tez çalışmasında, parabolik oluk (PTC) ve parabolik çanak (PDC) yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemlerinin tasarımı, deneysel performans analizleri ve yapay zekâ temelli modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde parabolik oluk kolektörler üzerine yapılan çalışmalarda genellikle tek tip geometrik yapı altında sabit parametrelerde termal verimlilik analizleri gerçekleştirilmiş olup (Bouvier vd., 2015), sistem performansına etki eden parametrelerin çok değişkenli karşılaştırmalı analizi sınırlı kalmıştır. Ayrıca, parabolik çanak kolektörlerle ilgili çalışmalarda (Barreto ve Canhoto, 2017; Bellos vd., 2019), çoğunlukla teorik modellemelere odaklanılmış,

sahada deneysel olarak test edilmiş iki eksenli izleme sistemlerine ilişkin veri sunumu yetersiz kalmıştır.

Bu çalışmada ise literatürdeki bu boşluklara doğrudan cevap verilmiş; hem PTC hem de PDC sistemleri gerçek çevresel koşullar altında tasarlanmış ve prototipleri üretilmiştir. Her iki sistem, farklı alıcı tasarımları, değişken akışkan debileri ve alıcı boru çapları gibi çok sayıda parametre altında detaylı biçimde analiz edilmiştir. Parabolik oluk kolektör sisteminde 10 mm, 20 mm ve 30 mm dış çapa sahip alıcılar ile 0.01-0.03 kg/s aralığında kütleli debiler test edilerek sistem verimliliği analiz edilmiş ve optimum tasarımlar belirlenmiştir. Bu durum ise literatürde olan tek parametrelili analizlerin ötesine geçerek çok değişkenli deneysel değerlendirme sunan özgün bir yaklaşım niteliğindedir. Ayrıca, ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen termal analizlerin sonuçları deneysel verilerle desteklenmiş ve bu şekilde simülasyon-model doğrulama ilişkisi kurulmuştur. Bu bağlamda, Behar vd. (2015) ve Kalogirou (2012) gibi çalışmalarda yer alan teorik modelleme yaklaşımları bu çalışmada pratik uygulamalarla desteklenmiş ve sahada geçerliliği test edilmiştir. Yapay zekâ modellerinin enerji sistemleri üzerine uygulandığı çalışmalarda, genellikle yalnızca performans tahminlerine odaklanıldığı görülmektedir (Ajbar vd., 2021). Bu tezde ise yapay zekâ modelleri kullanılarak farklı sistem konfigürasyonları altında termal verimlilik tahminleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri alanında hem mühendislik uygulamaları hem de bilimsel bilgi üretimi açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Aynı çevresel koşullarda eş zamanlı olarak hem parabolik oluk hem de parabolik çanak sistemlerin prototip düzeyinde tasarlanarak deneysel olarak karşılaştırılması, literatürde nadiren görülen kapsamlı bir yaklaşım ortaya koyacaktır. Farklı boru çapları ve debi değerlerine ilişkin parametre analizleri, sistem tasarımı sürecinde kullanılabilecek özgün veri setleri sunacaktır. Yapay zekâ modellerinin gerçek saha verileriyle eğitilmesi, modelleme doğruluğunu artırarak mühendislik uygulamalarında karar destek mekanizmalarına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, GPS tabanlı iki eksenli güneş takip algoritmalarının entegrasyonu, sistem verimliliğini doğrudan iyileştirecek etkiler yaratmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım; deneysel doğrulama, donanım-yazılım entegrasyonu ve yapay zekâ temelli modelleme gibi alanlarda literatüre yenilikçi bir katkı sunacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, iki eksenli parabolik çanak ve parabolik oluk kolektör sistemlerinin tasarımı, performans değerlendirmeleri ve yapay zekâ yöntemleriyle modellenmesine ilişkin mevcut literatür kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Literatür taraması, konunun daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve bu tezde gerçekleştirilecek çalışmanın dayandığı bilimsel temelleri ortaya koymak amacıyla tematik bir yaklaşımla düzenlenmiştir.

Tematik yaklaşım olarak, ilk etapta parabolik oluk kolektörlere yönelik çalışmalar ele alınmış; bu sistemlerin tasarım süreçleri ve verimlilik performansını artırmaya yönelik yöntemler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ardından, parabolik çanak kolektör sistemlerine ilişkin araştırmalar değerlendirilmiş ve bu sistemlerin yapısal tasarım prensipleri ile performans analizleri kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Son olarak, parabolik oluk ve çanak kolektör sistemlerinin yapay zekâ modelleriyle optimizasyonuna yönelik literatür ele alınmış; mevcut modelleme teknikleri ve bu tekniklerin uygulama alanları derinlemesine analiz edilmiştir.

2.1. Parabolik Oluk Kolektör ile İlgili Çalışmalar

Parabolik oluk kolektörler, yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri arasında yüksek verimlilikleri ve geniş uygulama alanlarıyla öne çıkan bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Bu kolektörler, güneş ışınlarını odaklayarak yüksek sıcaklıklara ulaşabilen bir enerji dönüşüm süreci sağlamaktadır. Literatürde, parabolik oluk kolektörlerin tasarım ve performansını iyileştirmeye yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, sistem geometrisinin optimizasyonundan malzeme seçimlerine, termal kayıpların azaltılmasından kontrol stratejilerinin geliştirilmesine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

Chafie vd. (2018), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin (PTC) alıcı tüplerinin enerji ve ekserji performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Termal verimliliğin %20-53 arasında değiştiğini ve güneş ışınlamı, akışkan giriş sıcaklığı ile kütle debisi gibi parametrelerden etkilendiğini belirlemişlerdir. Ekserji analizleriyle, geri dönüşümsüz kayıpların büyük ölçüde radyasyon ve konveksiyon kaynaklı olduğunu ve ekserji verimliliğinin %9-17 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Yüksek giriş

sıcaklıklarının, hem enerji hem de ekserji performansını olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, radyasyon kayıplarının alıcı tüp sıcaklığındaki artışla birlikte daha baskın hale geldiğini ifade etmişlerdir. Çalışmada, sistem performansını artırmak için termal yalıtımın güçlendirilmesi, yüzey kaplama teknolojilerinin geliştirilmesi ve akışkan hızlarının optimize edilmesi gerektiğini önermişlerdir.

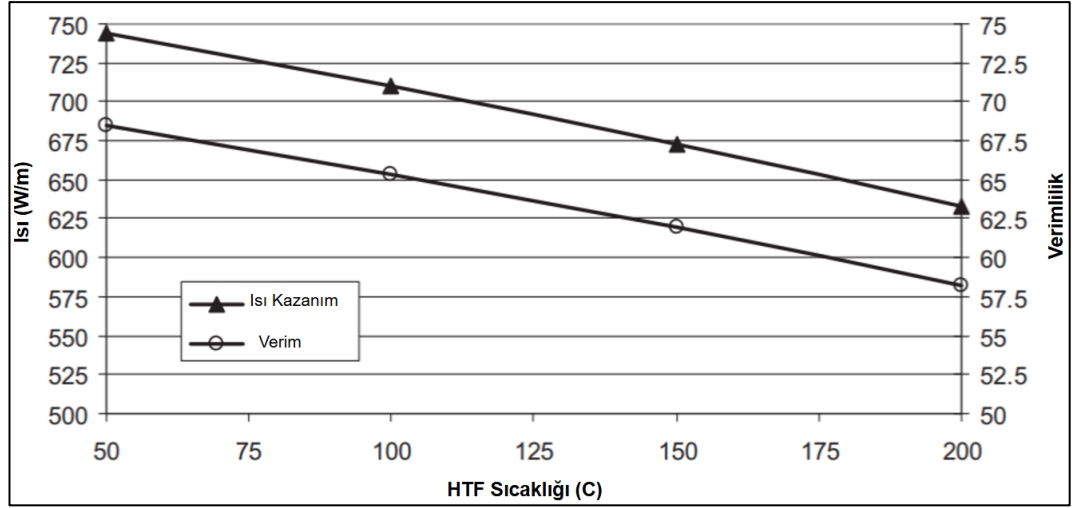
Bouvier vd. (2015), doğrudan buhar üretimi (DSG) için bir mikro-kojenerasyon (micro-CHP) sistemiyle çalışan küçük ölçekli bir parabolik oluklu güneş kolektörünü deneysel olarak karakterize etmiştir. Çalışmada, iki eksenli izleme sistemi ve 46.5 m² güneş açıklık alanına sahip kolektör, farklı çalışma koşulları altında test edilmiştir. Sistemin 10-30 bar basınç aralığında ve 20-40 kg/saat kütle debisinde, 180-250°C arasında doymuş veya aşırı ısınmış buhar üretebildiği belirlenmiştir. Özellikle güneş ışıınımı yüksek olduğu günlerde, sistemin sekiz saat boyunca buhar kalitesinin 0.6'nın üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Termal verimlilik analizlerinde, kolektörün %35-45 aralığında bir verimlilik sergilediğini tespit etmişler ve rüzgâr hızının düşük olduğu günlerde (3.1 m/s) sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı bu sayede sabit güç üretiminin izleme sistemi sayesinde sağlandığını belirtmişlerdir. Bulutlu günlerde ise buhar üretiminde ve çıkış gücünde önemli dalgalanmalar meydana gelmiş, hatta bazı durumlarda akış tamamen kesilmiştir. Ayrıca, ortam sıcaklığındaki artışın sistem verimliliğini artırdığı, ancak akışkan sıcaklığındaki artışın verimliliği düşürdüğünü gözlemlenmiştir.

Chafie vd. (2016), Tunus ikliminde kullanılmak üzere tasarlanan ve üretilen bir parabolik oluklu kolektörün (PTC) performansını deneysel olarak değerlendirmiştir. Çalışmada, 10.8 m² açıklık alanına sahip kolektörü test etmiş ve analizlerini ASHRAE 93–1986 standardına uygun şekilde gerçekleştirmişlerdir. Kolektörün geometrik ve optik parametrelerini, açıklık genişliğini 2.7 m, uzunluk 4 m, odak mesafesini 0.835 m ve konsantrasyon oranını 11.77 olarak tanımlamışlardır. Bu parametrelere göre termal performans analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bunun sonucunda maksimum kolektör verimliliği %55.1 olarak ölçmüş ve güneşli günlerde ortalama termal verimliliği %41.09, bulutlu günlerde ise %28.91 olarak hesaplamışlardır. Deneylerde, rüzgâr hızını ortalama 2.6 m/s olarak kaydetmiş, kütle debisini 0.2 kg/s seviyesinde sabit tutmuş ve güneş ışıınımı değerlerini 450-712 W/m² aralığında ölçmüşlerdir. Ayrıca, kolektörün ısıtma ve soğutma zaman sabitlerini sırasıyla 137 ve 205 saniye

olarak belirlemiş; insidans açısı modifikasyonunun performans üzerindeki etkisini detaylı şekilde analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile 4346 \$ toplam maliyetle üretilen sistemin %41.09'a kadar termal verimlilik sağlayabildiğini ve farklı iklim koşullarında optimize edilebileceğini göstermişlerdir.

Kumaresan vd. (2012), bir parabolik oluklu kolektör (PTC) ile entegre edilmiş termal enerji depolama (TES) sisteminin performansını deneysel olarak değerlendirmiştir. Çalışmayı Hindistan'ın Chennai şehrinde gerçekleştirmişler ve 7.5 m² açıklık alanına sahip PTC'i Therminol 55 ısı transfer akışkanı ile test etmişlerdir. Sistemi gün boyunca güneş ışıını kullanarak şarj etmişler ve depolama tankının enerji depolama kapasitesi ile sistemin anlık ve genel verimlilik değerlerini ölçmüşlerdir. PTC'nin maksimum anlık verimliliğini %62.5 olarak ölçmüşler ve bu değerin güneş ışıını ve ısı transfer akışkanının (HTF) sıcaklık farkına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Depolama tankında ısı kaybını analiz etmek için ise 45 saatlik bir süre boyunca sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve genel ısı kaybı katsayısının 2.55 W/m²K (120 °C) ile 1.21 W/m²K (60 °C) arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, şarj verimliliğinin deneylerin başlangıcında %60 seviyesinde, enerji kayıplarının artmasıyla günün ilerleyen saatlerinde %41'e düştüğünü belirtmişlerdir. Sonuç olarak, sistemin verimliliğini artırmak için PTC'nin depolama tankına yakın konumlandırılması ve boru hattı ile vanaların yalıtımının iyileştirilmesini önermişlerdir.

Kalogirou (2012), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) alıcı kısmı için ayrıntılı bir termal model geliştirmiştir. Çalışmada, alıcı tüpteki ısı transferi mekanizmalarını (iletim, taşınım ve radyasyon) detaylı bir şekilde ele almış ve modelin doğrulamasını Sandia Ulusal Laboratuvarları'nda test edilen mevcut kolektörlerin performans verileriyle gerçekleştirmiştir. Model, hem alıcı tüpün içindeki ısı transfer sıvısıyla hem de çevresel etkenlerle (hava ve gökyüzü) olan enerji etkileşimlerini kapsamaktadır. Şekil 2.1'de yapılan PTC performans testleri gösterilmiştir (Kalogirou, 2012).

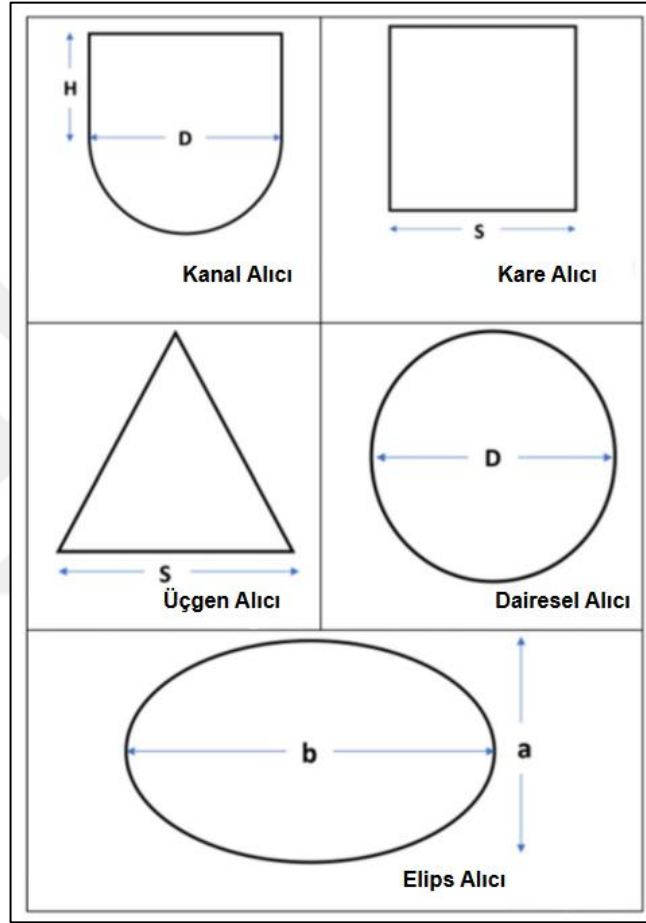


Şekil 2.1. PTC performans test grafiği (Kalogirou, 2012)

Modelin doğrulama testlerinde, kolektörün termal verimliliğinin 200°C çalışma sıcaklığında %58'e kadar ulaştığını ve 900 W/m² güneş ışınlamı altında tatmin edici sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Sistem parametreleri arasında rüzgar hızı, akışkan debisi ve optik özelliklerin (yansıtma, geçirgenlik, absorptans) verimlilik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuç olarak Kalogirou, enerji modeli ile enerji dengesi denklemlerini kullanarak alıcı tüpteki sıcaklık profillerini ve enerji kayıplarını tahmin etmiştir.

Behar vd. (2015), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin (PTC) termal ve optik performansını değerlendirmek üzere yeni bir analitik model geliştirmiş ve bu modeli deneysel verilerle doğrulamıştır. Modeli, Sandia Ulusal Laboratuvarları (SNL) ve Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından sağlanan test sonuçları ile karşılaştırılmışlardır. Çalışmada, özellikle Cermet kaplamalı alıcılar için geliştirilen modelin, NREL koduna kıyasla daha yüksek doğruluk sunduğu belirlenmiştir. Modelin ortalama belirsizlik değerini %0.64 olarak hesaplamışlardır. Deneysel analizlerde, PTC'nin optik ve termal kayıpları detaylı bir şekilde ele alınmış ve alıcı tüp için termal kayıpların, çalışma sıcaklığının artmasıyla belirgin bir şekilde yükseldiğini gözlemlemişlerdir. 300°C ve üzerindeki sıcaklıklarda, modelin tahmin ettiği verimlilik değerlerinin, ölçülen sonuçlarla %98 uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Alıcı yüzeydeki kaplama özelliklerinin ve optik sistemin performansı üzerindeki etkisini analiz etmişler ve bunun sonucunda özellikle, yansıtıcılık, geçirgenlik ve absorptans gibi optik parametrelerin sistem verimliliği üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır.

Al-Dulaimi ve Amori (2022), parabolik oluk kolektörün (PTC) optik ve termal performansı üzerindeki alıcı geometrisinin etkisini teorik olarak incelemiştir. Çalışmada, dairesel, kare, üçgen, eliptik ve kanal şeklindeki alıcı geometrilerini değerlendirmiş ve alıcı konumunun odak çizgisine göre performansa olan etkisini analiz etmiştir. Şekil 2.2’de çalışmada kullanılan alıcı geometrileri gösterilmiştir (Al-Dulaimi ve Amori, 2022).



Şekil 2.2. Alıcı geometrileri (Al-Dulaimi ve Amori, 2022)

Optik performans açısından Şekil 2.2’de verilen alıcıları incelediklerinde, kanal alıcı %84 optik verimlilik ile en iyi sonuçları verirken, eliptik alıcı %70 ile en düşük verimliliği verdiğini hesaplamışlardır. Termal performans açısından ise eliptik alıcı %85 termal verimlilik ile en iyi sonuçları elde ettiği, dairesel alıcının ise %82 ile en düşük termal verimliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Singh ve Chandra (2023), küçük boyutlu bir parabolik oluklu kolektörün (PTC) geometrik optimizasyonu ve optik analizini gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada,

Monte Carlo ışın izleme yöntemi ve SolTrace yazılımı kullanarak farklı geometrik parametrelerin (çap, açıklık genişliği, odak uzunluğu ve kenar açısı) ısı akısı profiline olan etkisini incelemişlerdir. PTC, optimize edilmiş 90° kenar açısına (rim) ve 160 mm odak uzunluğuna sahip olacak şekilde tasarlamış ve üretmişlerdir. Simülasyon sonuçlarında, kenar açısının 30° olduğu durumda ısı akısının yoğunluğu 51.3 kW/m^2 ile en yüksek değere ulaşırken, 130° kenar açısında bu değer 16.85 kW/m^2 'ye düştüğünü belirtmişlerdir. Optimum 90° kenar açısında ise 19.44 kW/m^2 pik ısı akısı ve 8.58 kW/m^2 ortalama ısı akısı elde etmişlerdir. Isı akısının alıcı tüp çevresindeki dağılımının simetrik olduğunu ve en yüksek yoğunluğun tüpün alt kısmında meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Alıcı tüpün odak noktasına hizalanma hatalarının, ısı akısı yoğunluğu ve sistemin termal performansı üzerinde önemli etkiler yarattığını belirtmişler ve ilgili deneylerle alıcı tüpün odak noktasına göre 10.5 mm yukarı veya aşağı kaydırıldığında, pik ısı akısının sırasıyla %227.44 arttığı veya %46.8 azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, alıcı tüp dış çapının artmasıyla konsantrasyon oranının düşmesi sonucu ısı akısı yoğunluğunun azaldığını bulmuşlardır.

Rabl vd. (1982), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin (PTC) optik ve termal optimizasyonunu detaylı bir şekilde ele almıştır. Çalışmada, kolektör tasarımı için evrensel grafikler ve eğri uyumları geliştirilmiş ve bu yöntemlerin kolektör performansını optimize etmede nasıl kullanılabileceğini örneklerle açıklamıştır. Araştırmada, kenar açısının optik performans üzerindeki etkilerini analiz etmişler ve kenar açısı artırıldıkça intercept (kesim) faktöründe belirgin bir azalma olduğu, ancak 80° ile 120° arasındaki kenar açıları optik performansın genel olarak yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Konsantrasyon oranının artışıyla termal kayıpların azaldığı, ancak optik yakalama oranında düşüş yaşandığını belirtmişlerdir. Ortalama gün boyu performans analizlerinde ise 27.3'lük konsantrasyon oranının optimum verimlilik için uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Hoseinzadeh vd. (2018), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) geometrik optimizasyonunu Monte Carlo Yöntemi (MCM) ile analiz etmiş ve yerel konsantrasyon oranı (LCR) kullanarak optik performansın artırılmasını hedeflemişlerdir. Yaptıkları çalışmada kolektörün açıklık genişliği, kenar açısı ve alıcı çapı gibi üç ana tasarım değişkenine odaklanmışlardır. Araştırmada, 0.6 m açıklık genişliği, 100° kenar açısı ve 0.025 m alıcı çapına sahip bir PTC için maksimum %65

optik verimlilik elde etmişlerdir. Ayrıca, 0.7 m açıklık genişliği, 90° kenar açısı ve 0.025 m alıcı çapı ile %61 optik verimlilik sağlamışlardır. Modelde, kenar açısının artmasıyla optik verimliliğin ve intercept (kesim) faktörünün yükseldiği, ancak açıklık genişliği arttıkça bu değerlerin düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca alıcı çapının azalması ile alıcıdaki sıcaklık ve ısı akısı yoğunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak PTC tasarımında LCR profilini optimize ederek optik ve termal performansı artırma potansiyelini ortaya koymuşlar ve bu tür sistemlerde Monte Carlo simülasyonunun doğruluğunu ve uygulama avantajlarını göstermişlerdir.

Ghodbane ve Boumeddane (2018), parabolik oluklu bir güneş kolektörünün (PTC) mühendislik tasarımını ve optik incelemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, odak mesafesi, açıklık genişliği, kıvrım uzunluğu gibi geometrik özellikler ve optik parametreleri analiz etmişlerdir. Yapılan analizde, konsantrasyon oranı, intercept faktörü ve insidans açısı modifikasyon faktörünü hesaplanmışlardır. Yaptıkları araştırmada, 3.76 m odak mesafesi, 90° kenar açısı ve 0.07 m dış alıcı çapı ile maksimum 68.39 konsantrasyon oranı elde etmişler ve alıcı tüp yüzeyindeki akı yoğunluğunun ortalama 20 640.5 W/m², tepe değerinin ise 44 475.7 W/m² olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, intercept faktörünün insidans açısına bağlı olarak gün boyunca %62 ile %95.6 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

El Ydrissi vd. (2020), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) optik ve termal performansını etkileyen ayna eğim hatalarının teknik ve ekonomik etkilerini incelemiştir. Araştırmada, 1 MWe kapasiteli bir enerji santralini modellemiş ve Fas'ın yarı kurak ikliminde bir yıllık meteorolojik veriler kullanılarak simüle etmişlerdir. Çalışmada, deflektometri yöntemiyle aynaların eğim hatalarını ölçmüşler ve bu hataların optik verimlilik ile ekonomik sonuçlar üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçlara göre, aynaların eğim hataları 4.59 mrad olarak ölçmüşler ve bu hataların kolektörün optik verimliliğinde %12.44 oranında bir azalmaya yol açtığını belirlemişlerdir. Yapılan simülasyonlarda ayna eğim hatalarının yıllık termal üretimde 1583 MWh/th ve elektrik üretiminde 246 MWh/e kayıplara neden olduğunu göstermişlerdir. Bu hatalar, enerji üretim maliyetini (LCOE) %14.14 artırarak 0.198 \$/kWh'den 0.226 \$/kWh'ye yükseltmiştir. Sonuç olarak aynaların optik kalitesinin artırılmasının ve hataların azaltılmasının PTC performansı üzerinde önemli bir etkisi

olduğunu ortaya koymuşlar ve bu sistemlerin kurulum ve işletme aşamalarında optik kalite değerlendirmesinin önemini vurgulamışlardır.

Tzivanidis vd. (2015), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) termal ve optik performansını incelemek için bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Çalışmada, Solidworks yazılımını kullanarak bir PTC tasarlamış ve farklı işletme koşullarında analiz etmiştir. Gerçekleştirdikleri simülasyonda, ısı transferi süreçleri (iletim, taşınım ve radyasyon) ve güneş ışınımının odaklanma özellikleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Modeli geliştirdikleri bir boyutlu bir sayısal modelle doğrulamış ve sonuçlar arasında yüksek uyum tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile 75°C'nin üzerinde termal verimlilik elde eden PTC'nin, yüksek sıcaklık seviyelerinde etkin bir şekilde çalışabildiğini ortaya koymuşlardır. Isıl kayıp katsayısı, kullanılan selektif kaplama ve vakumlu alıcı tüp sayesinde 0.6-1.3 W/m²K aralığında düşük değerlerde bulmuşlardır. Deney sırasında güneş ışınımı, alıcı tüpün alt kısmında yoğunlaşmış ve bu bölgede maksimum 27 yerel konsantrasyon oranı gözlemlemişlerdir. Ortalama konsantrasyon oranı ise 12.15 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, akışkan giriş sıcaklığı ve debisinin sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Bellos ve Tzivanidis (2018), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) termal performansını değerlendirmek ve optimize etmek için analitik bir model geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, enerji denklemlerinin doğrusal olmayan yapısını basitleştirerek hızlı ve doğru sonuçlar üretmiştir. Çalışmada kolektör tasarımında ve çalışma koşullarında etkili olan tüm parametreleri (giriş akışkan sıcaklığı, debi, çevre sıcaklığı, güneş ışınımı, örtü ve çevre arasındaki ısı transfer katsayısı) ele almışlardır. Modelin doğruluğu literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırmışlar ve termal verimlilik hesaplamalarında sapmanın %0.2, çıkış sıcaklığı hesaplamalarında ise %0.06 ile oldukça düşük olduğu hesaplanmıştır. Giriş sıcaklığı ve debi değişiklikleri gibi çeşitli parametrelerin model üzerindeki etkisini detaylı bir duyarlılık analizi ile incelemişlerdir. Düşük giriş sıcaklıklarında termal kayıpların daha az önemli olduğu, ancak verimliliğin giriş sıcaklığının artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca debi artışının performansı artırdığı ancak belirli bir noktadan sonra bu etkinin sınırlı kaldığını vurgulamışlardır.

Moloodpoor vd. (2019), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) termal performansını analiz etmek için entegre bir parçacık sürüsü optimizasyonu (iPSO) yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, PTC'nin termal davranışını bir dizi matematiksel denklem ile tanımlamışlar ve bu denklemleri tek bir hedefe yönelik kısıtlı optimizasyon problemine dönüştürmüşlerdir. Geliştirdikleri model ile sistemin enerji kayıplarını ve ısı transfer süreçlerini doğrusal olmayan denklemleri çözmek için kullanmışlardır. Yaptıkları analizlerde PTC'nin optik ve termal performansı üzerinde, alıcı tüp sıcaklığı, ortam sıcaklığı, akışkan akış hızı ve rüzgar hızı gibi çeşitli parametrelerin etkisini değerlendirmişlerdir. Aldıkları sonuçlar, sistemin termal verimliliğinin, akışkan sıcaklığı arttıkça düştüğünü, ancak akışkan akış hızının artmasının termal verimliliği artırdığını göstermiştir. Akışkan sıcaklığı 50°C iken termal verimliliği %70.11 olarak hesaplamışlar, ancak 400°C'ye çıktığında %57.17'ye düştüğünü belirtmişlerdir. Önerilen modelin sonuçlarını Sandia Ulusal Laboratuvarları'ndaki (SNL) deneysel verilerle karşılaştırmışlar ve sonuçların deneysel verilere yüksek düzeyde uyum sağladığını tespit etmişlerdir. Bu sayede iPSO yönteminin başlangıç koşullarına bağımlı olmamasının modeli farklı işletim koşulları için uygulanabilir kıldığını göstermiştir.

Xiong vd. (2013), ısı transfer yağı kullanan bir parabolik oluk kolektörün (PTC) termal performansını deneysel olarak incelemiştir. Tasarladıkları PTC, 1.71 m odak uzunluğuna, 5.77 m açıklık genişliğine ve 12 m birim uzunluğa sahiptir. Kolektörü tek eksenli bir izleme mekanizması ile donatmışlar ve Dowtherm-A ısı transfer yağı kullanarak 290°C ile 393°C arasında test etmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda PTC'nin maksimum verimliliğinin yaklaşık %70 olduğu ve bu değer ticari "eurotrough" kolektörleriyle karşılaştırılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Kolektörün izleme sisteminin yüksek hassasiyete sahip olduğu ve günlük birikimli hata oranının %0.02'nin altında olduğunu vurgulamışlardır. Yapılan testlerde güneş ışıınının ortalama 540 W/m² civarında sabit olduğunu ve kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın yaklaşık 9°C olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kolektörün uzun süre 300°C'nin üzerinde çalışmasının alıcı tüp performansını düşürdüğü ve termal verimlilikte azalmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Geliştirilen PTC sistemi Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Xiong vd., 2013).



Şekil 2.3. Geliştirilen PTC Sistemi (Xiong vd., 2013)

Sonuç olarak, çalışma kapsamında geliştirdikleri PTC'nin termal performansının yüksek olduğunu ve izleme sisteminin hata oranının düşük olduğunu kanıtlanmışlardır. Ancak, kolektörün optimum performansı koruması için alıcı tüp sıcaklıklarının 300°C 'nin altında tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Odeh vd. (1998), buhar üretimi için parabolik oluk kolektörlerin (PTC) termal performansını analiz eden bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, hem sentetik yağ (Syltherm 800) hem de su gibi farklı çalışma akışkanlarıyla çalışan kolektörlerin termal kayıpları ve verimliliklerini değerlendirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli Sandia Ulusal Laboratuvarları'ndaki deneysel verilere dayandırmışlar ve kolektörlerin ısı kayıplarını emici duvar sıcaklığı üzerinden hesaplayarak tüm akışkanlar için genellenebilir hale getirmişlerdir. Çalışmada kolektörler için farklı faz bölgelerini (sıvı, kaynama ve kuru buhar) ayrı ayrı analiz etmişlerdir. Geliştirdikleri model ile su kullanan kolektörlerin termal kayıplarının, sentetik yağ kullanan sistemlere kıyasla daha düşük olduğunu ve bu nedenle suyun ısı transfer performansını artırdığını kanıtlamışlardır. Bununla birlikte, yüksek buhar kalitesi elde edilen bölgelerde düşük termal iletkenlik nedeniyle ısı transfer katsayısında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Macedo-Valencia vd. (2014), parabolik oluklu bir kolektörün (PTC) tasarımını, yapımını ve termal performansını analiz eden bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, 0.5 m genişliğe, 0.95 m uzunluğa ve 0.112 m odak mesafesine sahip bir prototip kolektör tasarlamışlardır. Kolektör, 783 W/m² güneş ışınlamı altında 47.3°C çıkış sıcaklığına ulaşmıştır. Deneyleri 2 gün boyunca 0.2 L/dak debi ile gerçekleştirmişlerdir. İlk gün, maksimum %50.57 termal verimlilik, ikinci gün ise ortalama %36.49 verimlilik elde etmişlerdir. Sistem kolektörünü alüminyum reflektör ve karbon kaplı bir bakır boru ile tasarlamışlar, ancak yüzeydeki düzensizlikler ve kaplama özelliklerinin verimlilik üzerinde olumsuz etkiler yarattığını da belirtmişlerdir. Optik ve termal performansın atmosferik koşullara, özellikle güneş ışınlamına ve çevre sıcaklığına bağlı olduğu vurgulamışlardır.

2.2. Parabolik Çanak Kolektör ile İlgili Çalışmalar

Parabolik çanak kolektörler (PDC), güneş enerjisini odaklayarak yüksek sıcaklıklara ulaşabilen ve bu nedenle verimli termal enerji dönüşümü sağlayan ileri düzey yoğunlaştırıcı sistemlerdir. Bu kolektörler, genellikle Stirling motorları, buhar türbinleri veya diğer termal enerji dönüştürücülerle entegre edilerek elektrik üretiminde ve yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu bölümde, parabolik çanak kolektörlerin optik, termal ve yapısal performansını inceleyen literatür çalışmalarına yer verilecektir. Bu çalışmalar, kolektör geometrisi, optik verimlilik, termal kayıplar ve malzeme seçimi gibi faktörlerin sistem performansına etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ayrıca, farklı iklim ve işletme koşullarında parabolik çanak kolektörlerin uygulanabilirliği ve performansını artırmaya yönelik yenilikçi tasarımlar ve teknolojiler de ele alınmaktadır.

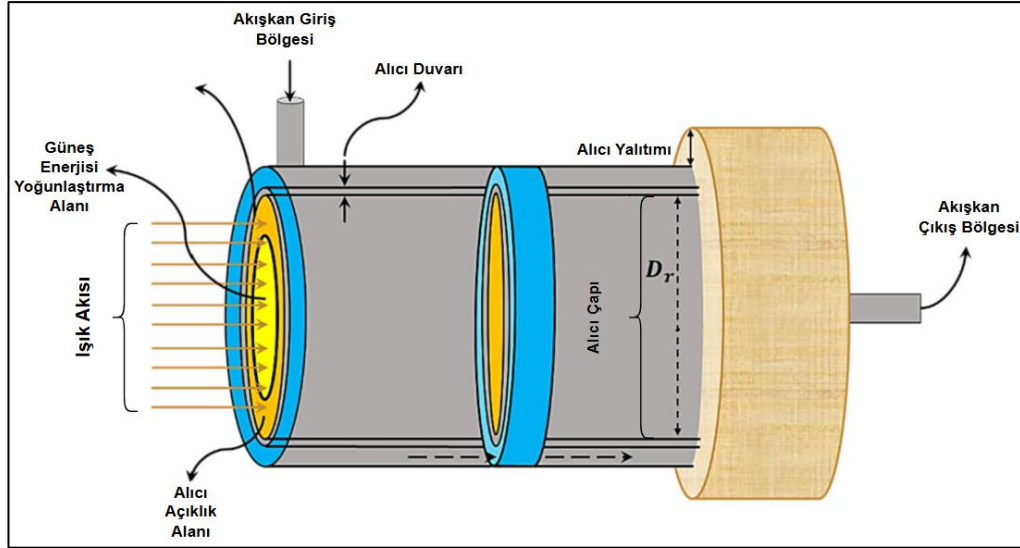
Karimi vd. (2018), bir parabolik çanak kolektör (PDC) sisteminde kullanılan silindirik boşluklu bir alıcının termal performansını analiz etmek için kapsamlı bir matematiksel model geliştirmiştir. Model, alıcı duvarlarının izotermal olmadığını varsayarak enerji dengesini diferansiyel bir yaklaşımla ele almış ve alıcı uzunluğu boyunca ısı akısı ve sıcaklık dağılımlarını hesaplamıştır. Çalışma, hem geometrik hem de optik parametreleri (yansıtıcılık, absorptivite ve emisyon katsayıları) dikkate alarak termal

kayıpları ve ısı transferini detaylı şekilde incelemiştir. Şekil 2.4'te geliştirdikleri parabolik çanak sistemi gösterilmiştir (Karimi vd., 2018).



Şekil 2.4. Geliştirilen parabolik çanak sistemi (Karimi vd., 2018)

Deneyssel doğrulamalar, modelin yüksek doğruluk sağladığını ve sonuçların deneyssel verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Simülasyon sonuçları ile alıcı giriş akışkan sıcaklığı ve debisinin, güneş ışıınımı yoğunluğunun, alıcı açıklık çapının ve uzunluğunun sistem performansı üzerindeki etkilerini detaylandırmışlardır. Bu doğrultuda 0.2 m açıklık çapına sahip bir alıcıda %90'a kadar termal verimlilik elde etmişlerdir. Alıcı uzunluğu artırıldığında, termal kayıpların azaldığı ve sistem verimliliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları analizler ile güneş ışıınımı 900 W/m^2 seviyesine çıkarıldığında çıkış akışkan sıcaklığının 420°C 'ye ulaştığını belirlemişlerdir. Ayrıca, 0.2-0.4 m açıklık çapı aralığında, termal verimlilikte belirgin bir artış sağlamışlardır. Sistem için geliştirdikleri alıcı Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Karimi vd., 2018).

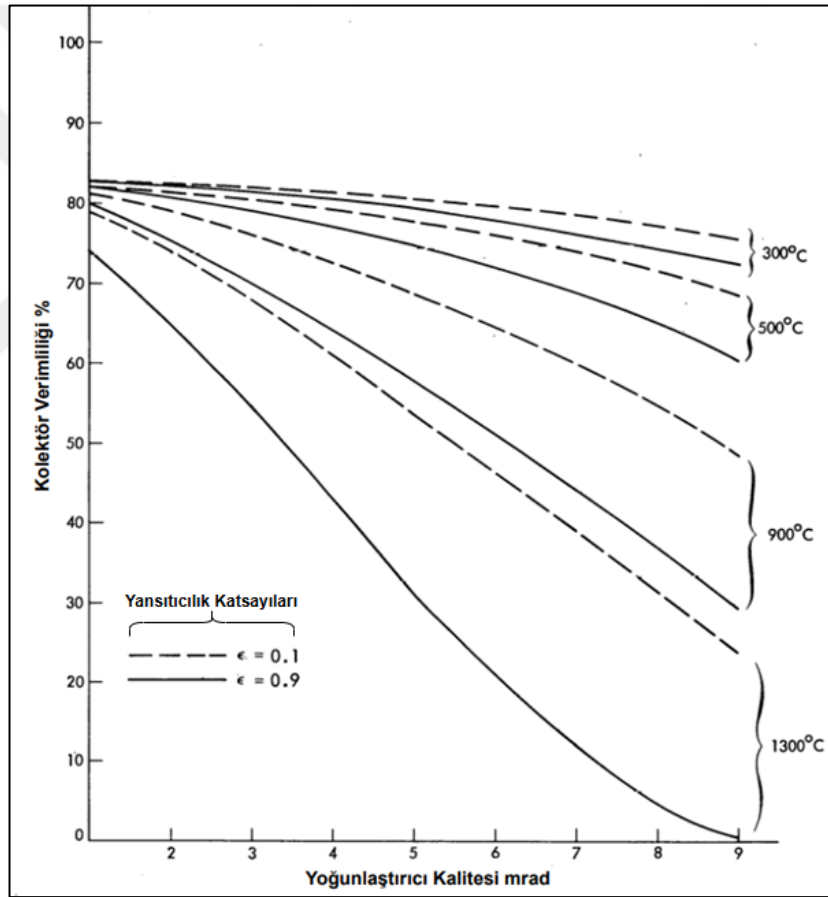


Şekil 2.5. Geliştirilen parabolik çanak alıcısı (Karimi vd., 2018)

Sonuç olarak, geliştirdikleri modelin deneysel doğruluğu ile simülasyon sonuçlarının akışkan sıcaklıkları ve alıcı termal verimliliği ile %95 uyum gösterdiğini kanıtlamışlardır. Bu sonuçlar ile PDC sistemlerinin enerji üretiminde verimliliğini artırmak için alıcı tasarımı ve çalışma parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Gholamalizadeh ve Chung (2017), İran'ın Kerman şehrinde kurulan bir pilot parabolik çanak-Stirling sistemi üzerinde kapsamlı bir tasarım ve performans analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, sistemin kolektör tasarımını optimize ederek konsantrasyon oranı, çanak çapı ve odak mesafesi gibi parametreleri ele almışlardır. 3 m çapında ve 45° kenar açısına sahip çanak kolektörün mevcut konsantrasyon oranını 625 olarak belirlemişler, ancak sistemin verimliliğini artırmak amacıyla bu oranı 2499.8'e yükseltmişlerdir. Yaptıkları deney sonuçlarına göre konsantrasyon oranının artırılması sonucunda yıllık enerji üretimini 545.8 kWh'den 1944.9 kWh'ye çıkardıklarını ve bu sayede sistemin güç çıkışını 1.66 kat artırmayı başardıklarını göstermiştir. Ayrıca, çanak çapını 3 m'den 5 m'ye yükselterek yıllık enerji üretimini 1.945 GWh'den 6.74 GWh'ye çıkardıklarını ifade etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre sistem verimliliğinin özellikle gün ortasında yüksek olduğunu, sabah ve akşam saatlerinde ise çanak çapının büyütülmesiyle verimlilikte belirgin bir artış sağlandığını ortaya koymuşlardır. Maksimum güç çıkışını öğle saatlerinde 2.86 kW olarak hesapladıklarını da belirtmişlerdir.

Truscello (1979), nokta odaklı parabolik yoğunlaştırıcı kolektörlerin optik ve termal performansını analiz etmiştir. Çalışmasında, farklı iki eksenli izleme sistemlerini, kolektör türlerini ve bu kolektörlerin verimliliklerini etkileyen optik ve termal faktörleri detaylı bir şekilde incelemiştir. Kolektörlerin 815°C ile 1093°C arasında çalışmasının optimal olduğunu, ancak daha yüksek sıcaklıklarda performans düşüşlerinin meydana geldiğini belirtmiştir. Kolektör verimliliğini yüzey yansıtıcılığı, optik kalite ve alıcı açıklık yarıçapına bağlı olarak modellemiştir. Kolektör kalitesinin (mrad cinsinden) artışıyla verimlilikteki değişimleri grafiklerle analiz etmiştir. Şekil 2.6'da kolektör verimliliği ve yoğunlaştırıcı kalite grafiği gösterilmiştir (Truscello, 1979).



Şekil 2.6. Kolektör verimliliği ve yoğunlaştırıcı kalite grafiği (Truscello, 1979)

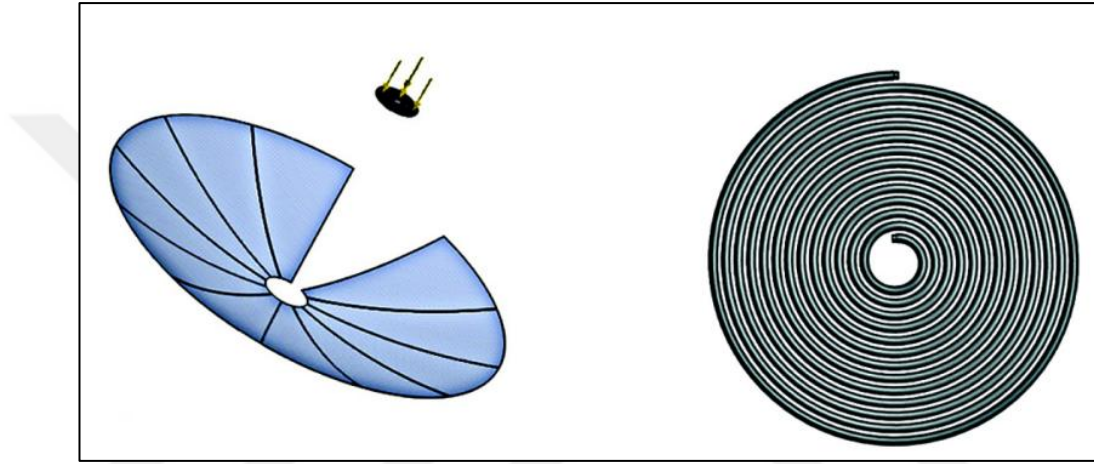
Sonuç olarak yaptığı bu çalışma ile kolektör maliyetleri ile performans optimizasyonu arasındaki dengeyi değerlendiren bir "başarı ölçütü" geliştirmiştir. Optik kalite ve yüzey yansıtıcılığının performans üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak ele almıştır.

Bahrami vd. (2019), tuzlu suyun güneş enerjisiyle damıtılması için yenilikçi bir güneş çanağı kolektör sistemi tasarlamıştır. Sisteme, çanak odak noktasına yerleştirilmiş bir güneş damıtıcısı entegre edilmiştir. Çalışmada, sistemin termal performansını değerlendirmek için kapsamlı bir matematiksel modeli geliştirmişler ve deneysel verilerle doğrulamışlardır. Geliştirdikleri model ve deneyler ile sistemin geometrik ve optik parametrelerinin performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sisteme ait 2 m açıklık çapına sahip bir çanak ile optik verimlilik %0.7'den %0.8'e artırıldığında, üretilen distile su miktarının %80 oranında arttığını ölçmüşlerdir. Ayrıca, çanak açıklık çapını 3 metreye yükseldiklerinde günlük 50 kg damıtılmış su üretimi yapmışlardır. Absorber plakasının yansıtıcılığını ise %0.7'den %0.4'e düşürdüklerinde sistemin su üretiminde yaklaşık iki kat artış sağlamışlardır. Sonuç olarak optik verimlilik ve absorber plaka tasarımının sistem performansını optimize etmede kritik faktörlerden olduğunu göstermişlerdir.

Soltani vd. (2019), parabolik çanak kolektör (PDC) sisteminde kullanılan helisel silindirik bir boşluklu alıcının termal performansını optik ve termal modelleme yöntemleriyle analiz etmişlerdir. Çalışmada, gerçek güneş ışıınımı dağılımını modellemek için SolTrace yazılımı kullanılmış ve bu veriler ANSYS Fluent ile yapılan CFD analizlerinde sınır koşulu olarak uygulanmıştır. Geliştirilen model, deneysel verilerle doğrulanmış ve %2'lik bir hata payı ile yüksek doğruluk elde edilmiştir. Yaptıkları araştırmada, sistemin performansını etkileyen geometrik ve operasyonel parametreleri incelemişlerdir. Alıcı mesafesi, açıklık çapı ve geometri oranları gibi yapısal parametrelerin termal verimlilik üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Bu bağlamda alıcı açıklık mesafesi, odak noktasına göre optimize edilerek termal performansta %65'e kadar artış sağlamışlar ve alıcı boyutu ve geometrik konsantrasyon oranının sistem performansını etkilediği ve maksimum ısı transferinin, alıcı açıklık çapının 0.2 m olduğu durumlarda sağlandığını belirtmişlerdir.

Pavlović vd. (2016), spiral sarmal ısı alıcısına sahip yenilikçi bir parabolik çanak kolektörün optik ve termal performansını analiz etmiştir. Tasarım, SolidWorks yazılımı ile oluşturulmuş ve akış simülasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Çanak kolektör, 3.8 m açıklık çapına ve 2.26 m odak mesafesine sahip olup, polimetil metakrilat ve gümüş kaplamalı aynalardan oluşan 11 kavisli yansıtıcı plakadan meydana gelmiştir. Optik analizler sonucunda alıcı ile reflektör arasındaki optimum

mesafenin 2.1 m olduğunu ve bu konumun %96'lık bir yakalama faktörü ve %67.6 optik verimlilik sağladığını belirtmişlerdir. Isı akısı dağılımını ise sarmal boru boyunca analiz etmişler ve ısı akısının bobinin merkezine yakın bir yerde maksimuma ulaştığı, ancak bu noktanın odak merkezinde olmadığını vurgulamışlardır. Çalışma sonucunda termal verimliliği yaklaşık %65 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca ekserji verimliliğinin, su giriş sıcaklığının 10°C ile 70°C arasında değişmesi durumunda %4'ten %15'e kadar artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Şekil 2.7'de geliştirilen parabolik çanak ve çanak alıcısı gösterilmiştir (Pavlović vd., 2016).



Şekil 2.7. Geliştirilen parabolik çanak (sol) ve çanak alıcısı (sağ) (Pavlović vd., 2016)

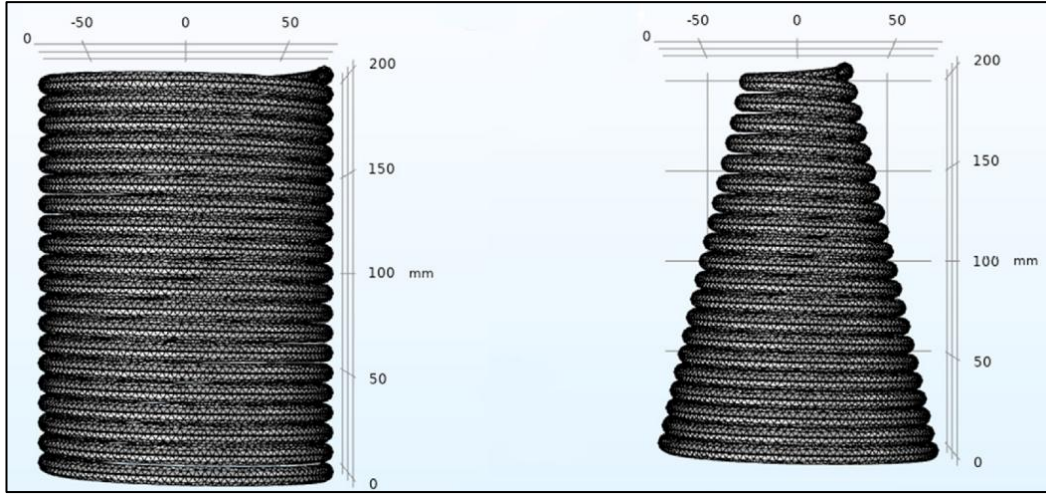
Sonuç olarak, yaptıkları çalışma ile düşük maliyetli ve yüksek verimli güneş termal sistemlerinin geliştirilmesi için bir temel sunmuşlar, tasarım ve simülasyon yöntemlerinin kolektör performansını optimize etmede kritik öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Aydin (2020), konutlarda su ısıtma uygulamaları için tasarladığı bir parabolik çanak kolektör sisteminin performansını deneysel olarak test etmiştir. Bu sistem, 800 mm çapında alüminyum bir çanak, siyah boyalı bakır sarmal borulu bir alıcı ve 50 litrelik bir su tankından oluşmaktadır. Çalışmasında, sistemi 10-13 Aralık 2018 tarihlerinde farklı debi koşulları altında değerlendirmiştir. Deney sonuçlarında, tasarladığı çanak kolektörün maksimum %76, ortalama %48 anlık termal verimlilik sergilediğini belirlemiştir. İlk gün 0.00525 kg/s su debisi ile yapılan testlerde maksimum su sıcaklığını 42.1°C olarak ölçmüştür. Üçüncü gün, su debisinin 0.00277 kg/s'ye düşürülmesiyle maksimum alıcı sıcaklığının 116°C'ye ulaştığını tespit etmiştir. Güneş ışınlamı değerlerini 809.1 W/m² ile 836.2 W/m² arasında kaydetmiştir. Sonuç olarak,

güneş ışınlamı ve su debisinin sistem verimliliği üzerindeki önemli etkilerini ortaya koymuştur. Daha düşük debilerde alıcı sıcaklığının arttığını, ancak daha yüksek debilerde verimlilikte bir artış gözlemlendiğini vurgulamıştır.

El-Ghfour vd. (2021), bir parabolik bir çanak ve kavite alıcısını temel alan bir Güneş Stirling Çanağı tasarlamış ve üç boyutlu bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Tasarım sürecinde, GPU-3 Stirling motorunu modifiye ederek çalışmaya başlamış ve üç temel aşamayı içeren bir yöntem uygulamışlardır: çanak yoğunlaştırıcıyı optimize etmişler, alıcı açıklığının odak düzlemine göre ideal konumunu belirlemişler ve kavite alıcısını yeni bir ısıtıcı boru yapısıyla yeniden tasarlamışlardır. Optik simülasyonları SolTrace yazılımını kullanarak, termal analizleri ise ANSYS Fluent CFD yazılımıyla gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri tasarımın çanak yoğunlaştırıcı ile %90.83 optik verimlilik sağladığını belirlemişlerdir. Ayrıca, kavite alıcısının %89.74 absorpsiyon verimliliğine ulaştığını tespit etmişlerdir. Stirling motorunun termal verimliliğini %38.92, sistemin toplam termal verimliliğini ise %31.8 olarak hesaplamışlardır. Tasarımda, çanak kenar açısının 45° olduğu ve 68 yüzeyden oluşan çok yüzeyli bir çanak kullanmışlardır. Kavite alıcısında ise iç yüzeyi gümüş kaplama, cam kapak ve yüksek sıcaklık seçici kaplama (Si_3N_4) kullanmışlardır.

Hassan vd. (2021), güneş enerjisiyle çalışan parabolik çanak konsantratör sistemlerinde kullanılan silindirik ve konik boşluklu bakır boru alıcılarının termal ve optik performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında, sistemin enerji, ekserji ve optik verimliliklerini değerlendirmiş ve farklı tasarım ile malzeme özelliklerinin performansa etkisini analiz etmişlerdir. Silindirik ve konik alıcı tasarımlarını bakır borular ve dış çelik kaplama ile oluşturmuşlar, bu malzemelerin termal iletkenliklerini optimize etmeyi hedeflemişlerdir. Konik alıcı tasarımının %62 ortalama termal verimlilik ve %11 ekserji verimliliğiyle en iyi performansı sergilediğini, silindirik tasarımın ise %59 termal ve %10 ekserji verimliliği sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, konik alıcının %82, silindirik alıcının ise %80 optik verimlilik sağladığını belirtmişlerdir. Maksimum yüzey sıcaklıklarını silindirik alıcıda 140°C , konik alıcıda ise 155°C olarak ölçmüşlerdir. Şekil 2.8’de tasarladıkları konik ve silindirik alıcılar gösterilmektedir (Hassan vd., 2021).



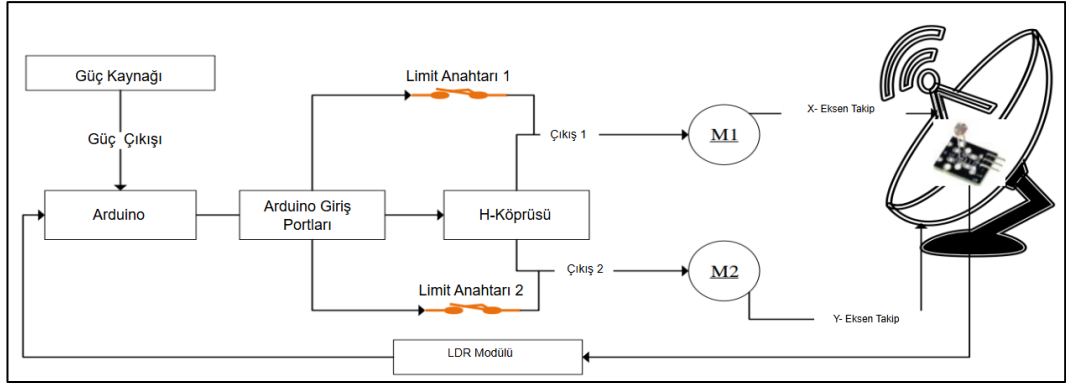
Şekil 2.8. Tasarlanan silindirik (sol) ve konik (sağ) alıcılar (Hassan vd., 2021)

Sonuç olarak, konik alıcıların geometrik avantajlarının enerji dönüşüm süreçlerinde daha yüksek verimlilik sağladığını ortaya koymuşlardır. Çalışmalarıyla, düşük maliyetli, enerji verimli ve endüstriyel su ısıtma uygulamaları için uygun sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlamış ve gelecekteki tasarım çalışmaları için bir temel sunmuşlardır.

Jilte vd. (2020), ısı borulu bir güneş kavite alıcısının güneş ışıınımı dağılımını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, odak düzlemi, alıcı konumu ve eğim hatası gibi optik ve geometrik parametrelerin etkilerini değerlendirmiş ve önerilen sistemin güneş enerjisini yakalayıp ısı boruları aracılığıyla biyokütle gazlaştırıcıya aktarmak üzere tasarlandığını ifade etmişlerdir. Isı borularını yarı silindirik bir kavite alıcısının çevresine yerleştirerek simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Bu simülasyonlarda, kavite alıcısının odak yüksekliğinden 16 mm ve 32 mm aşağıya yerleştirilmesiyle güneş ışıınının sırasıyla 1.1 kat ve 1.7 kat arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, eğim hatasının 2 mrad'den 4 mrad'e çıkması durumunda ortalama ışıınının %21.7 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Merkezdeki ısı borusunun, çevresel borulara göre daha homojen ve yüksek ışıının yoğunluğu aldığını belirlemişlerdir; maksimum ışıının değerlerini merkezi borularda 7 MW/m^2 olarak ölçerken, diğer borularda bu değerin daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, ısı borusu dizilimlerinin ve kavite alıcısının konumlandırılmasının sistem performansı üzerindeki kritik etkilerini ortaya koymuş ve güneş enerjisinden yüksek verimlilikle yararlanmak için önemli bir model sunmuşlardır.

Pavlovic vd. (2017), spiral bobinli konik alıcıya sahip parabolik çanak kolektörün optik ve termal performansını deneysel ve sayısal analizlerle incelemişlerdir. Kolektörü düşük maliyetli malzemeler kullanarak tasarlamış ve performansını farklı işletim koşulları altında değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, su, Therminol VP-1 ve hava gibi üç farklı çalışma akışkanını kullanarak enerji ve ekserji verimliliklerini analiz etmişlerdir. Deneysel bulguları incelediklerinde, kolektörün termal verimliliğinin yaklaşık %34 olduğunu ve bu düşük performansın optik verimlilik kayıplarından kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Çalışma akışkanları üzerinde yaptıkları analizlerde, düşük sıcaklık koşullarında suyun en uygun akışkan olduğunu, yüksek sıcaklık koşullarında ise Therminol VP-1'in daha iyi performans sağladığını ortaya koymuşlardır. Havanın ise düşük sıcaklıklarda yüksek ekserji verimliliği sunduğunu, ancak genel performansının diğer akışkanlardan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları optik analizlerde ise, konik spiral alıcının ışıyım yoğunluğunu homojen bir şekilde dağıttığını ve yüksek sıcaklık bölgelerinde 2.6×10^5 W/m² ışıyım akısını absorbe ettiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, alıcı yüzeyin geometrisi ve optik özelliklerinin sistem performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Ahmed vd. (2020), düşük gelirli ve elektriğe erişimi sınırlı olan kırsal bölgeler için bir parabolik çanak güneş izleme sistemi tasarlamış ve uygulamışlardır. Çalışmalarında, çift eksenli bir izleme mekanizması geliştirmişler ve bu sistemi Arduino tabanlı bir prototip kullanarak yapılandırmışlardır. Tasarımda, LDR modülleri, H-Bridge sürücü devresi ve 12V DC motorlardan faydalanmışlardır. Sistem performansını standart bir 10 W polikristal güneş paneli ile karşılaştırmışlar ve %3.43 daha yüksek enerji verimliliği elde etmişlerdir. Deneylerinde, sabah saatlerinden öğleye kadar üretilen güç değerlerini 5.54 W ile 13.8 W arasında ölçmüşlerdir. Parabolik çanak sisteminin, geleneksel PV paneline kıyasla daha verimli olduğunu belirlemişlerdir. Çanak geometrisini 4x4 ft alüminyum kaplı bir yüzeyle tasarlamış ve bu yüzeyin ışıyımı odak noktasında toplayarak maksimum enerji dönüşümünü sağladığını ifade etmişlerdir. Şekil 2.9'da parabolik çanak sisteminin kontrol blok diyagramı gösterilmiştir (Ahmed vd., 2020).



Şekil 2.9. Parabolik çanak sistemi kontrol blok diyagramı (Ahmed vd., 2020)

Şekil 2.9’da gösterilen diyagramda Arduino ile çift eksen güneş takip kontrol diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagrama göre çalışmada güneşin takibi için her eksen için bir adet olmak üzere toplamda iki adet motor kullanmışlar ve bu motorların kontrolünü ise H-köprüsü ile yapmışlardır. Sonuç olarak, kırsal bölgelerde enerjiye erişimi artırmayı hedeflemişler ve düşük maliyetli, kolay bakım yapılabilir bir güneş izleme sistemi önermişlerdir. Gelecekte, sistemin kontrol stratejilerinin iyileştirilmesi ve aşırı ısınmaya karşı koruma devresi eklenerek daha da optimize edilebileceğini vurgulamışlardır.

Savangvong vd. (2021), düşük maliyetli, hafif ve yüksek verimliliğe sahip bir parabolik çanak kolektör tasarlamış, üretmiş ve performansını değerlendirmişlerdir. Tasarımlarında, 1 metre çapında ve 45° kenar açısına sahip bir çanak kullanmışlar, kolektörü iki eksenli bir güneş izleme sistemiyle entegre etmişlerdir. Çanak için fiber cam bir yapı oluşturmuşlar ve yansıtıcı yüzey olarak acil durum battaniyesi, PET-Mirror ve ayna olmak üzere üç farklı malzemeyi test etmişlerdir. Yaptıkları deneylerde, farklı yansıtıcı yüzeylerin performansını analiz etmişlerdir. Acil durum battaniyesi kullanılan çanakta maksimum odak sıcaklığını 817°C, PET-Mirror kullanılan çanakta 724°C ve ayna kullanılan çanakta 874°C olarak ölçmüşlerdir. Sıcak su çıkışında, acil durum battaniyesi kullanılan çanakta maksimum sıcaklığı 42.4°C, PET-Mirror’da 41.5°C ve aynada 43.4°C olarak tespit etmişlerdir. Isı gücünü sırasıyla 389 W, 361 W ve 420 W olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, acil durum battaniyesi kullanılan çanağın, kütle ve maliyet başına en düşük değerleri sağladığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, önerdikleri düşük maliyetli üretim tekniğinin araştırma ve deneysel çalışmalar için ideal olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, bu tasarımın performans ve maliyet açısından etkili bir çözüm sunduğunu göstermişlerdir.

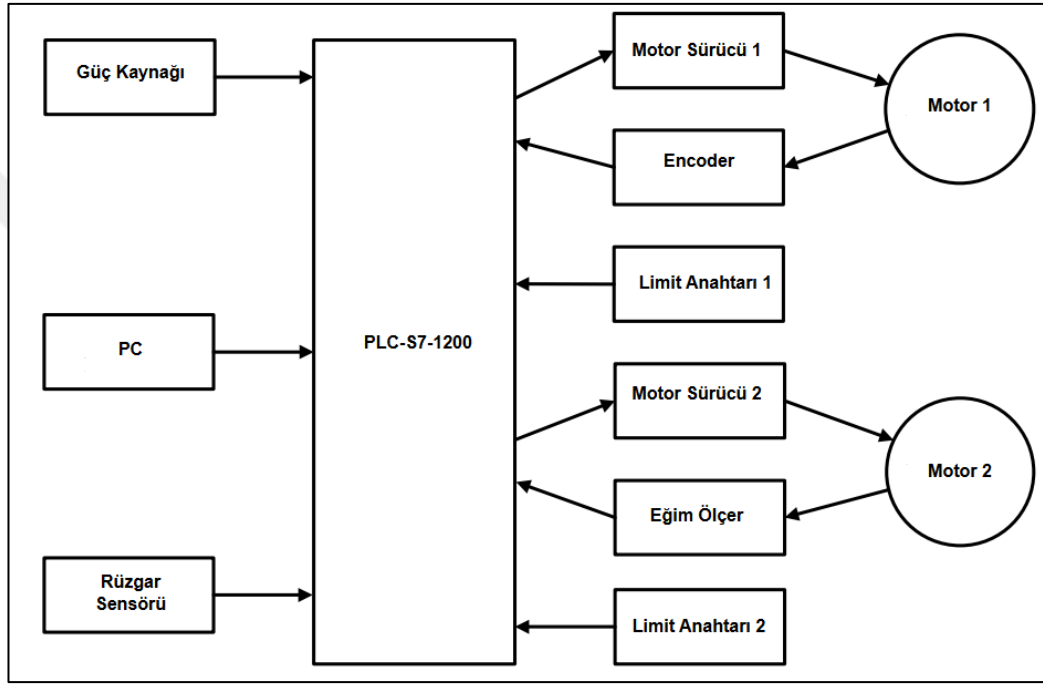
Gelecekte, sistemin enerji verimliliğini artırmak için tasarım parametrelerini optimize edebileceklerini vurgulamışlardır.

Zayed vd. (2021a), parabolik çanak/Stirling motor sistemi için optik-geometrik boyutlandırma ve parametre analizi yaparak sistemin performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, farklı çanak çaplarını (2.5 m ile 17.5 m arasında) kullanarak güneş ışınlamı, rüzgar hızı ve ortam sıcaklığı gibi değişkenlerin güç üretimi ve toplam verimlilik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları parametre analizlerinde, 2.5-8.5 m çapındaki çanakların 0.735-11.7 kW arasında güç ürettiğini ve verimliliklerin %17.1 ile %23.4 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Çanak çapının 10-17.5 m arasında olduğu durumlarda, üretilen gücün 18.6-58.1 kW'a ulaştığını ve verimliliğin %23.7-24.25 aralığında olduğunu hesaplamışlardır. Çanak çapının 10 m'den büyük olduğu durumlarda optimum verimlilik ve minimum ısı kayıpları sağlandığını ifade etmişlerdir. Tianjin, Çin'deki meteorolojik koşullar altında yaptıkları simülasyonlar, yaz gündönümünde sistemin 23.11 kW elektrik gücü ürettiğini ve toplam verimliliğinin %23.05 olduğunu göstermiştir. Tasarım parametrelerini, özellikle çanak çapını ve alıcı sıcaklığını optimize ederek sistem performansını daha da artırabileceklerini belirtmişlerdir. Şekil 2.10'da Tianjin'de bulunan parabolik çanak kolektörü gösterilmiştir (Zayed vd., 2021a).



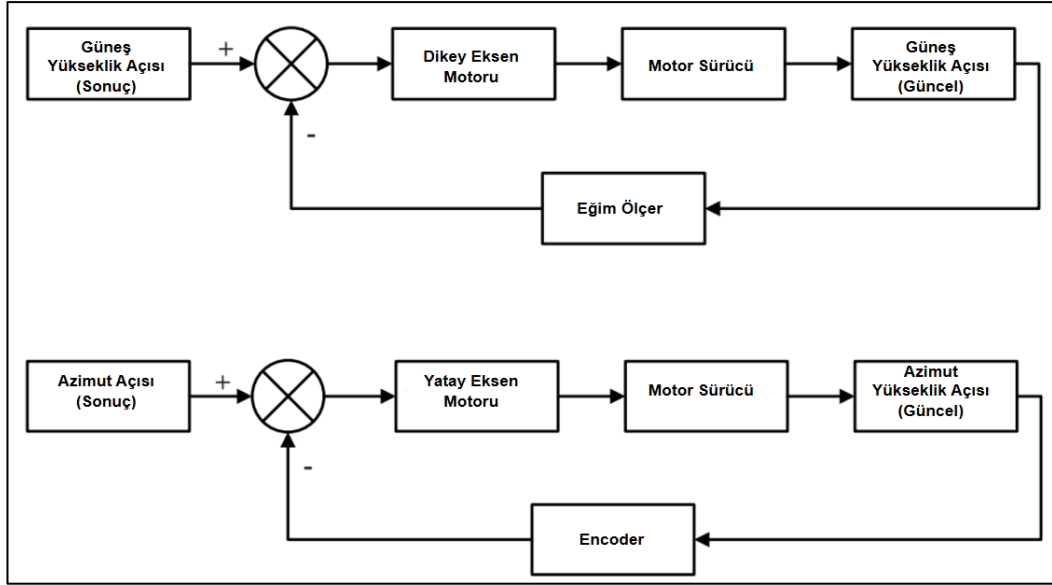
Şekil 2.10. Tianjin'de bulunan parabolik çanak kolektörü (Zayed vd., 2021a)

Zhou vd. (2021), parabolik çanak/stirling sistemi için çift eksenli bir güneş izleme sistemi tasarlamış ve performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, güneş ışınımını maksimum düzeyde toplamak amacıyla bir güneş izleme kontrol algoritması geliştirmiş ve bu sistemi deneysel olarak test etmişlerdir. Sistemi, iki fırçasız DC motor, bir enkoder, bir eğim ölçer ve döner sürücüler kullanarak yapılandırmışlardır. Şekil 2.11’de tasarlanan parabolik çanak kolektörün elektronik kontrol diyagramı gösterilmiştir (Zhou vd., 2021).



Şekil 2.11. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol diyagramı (Zhou vd., 2021)

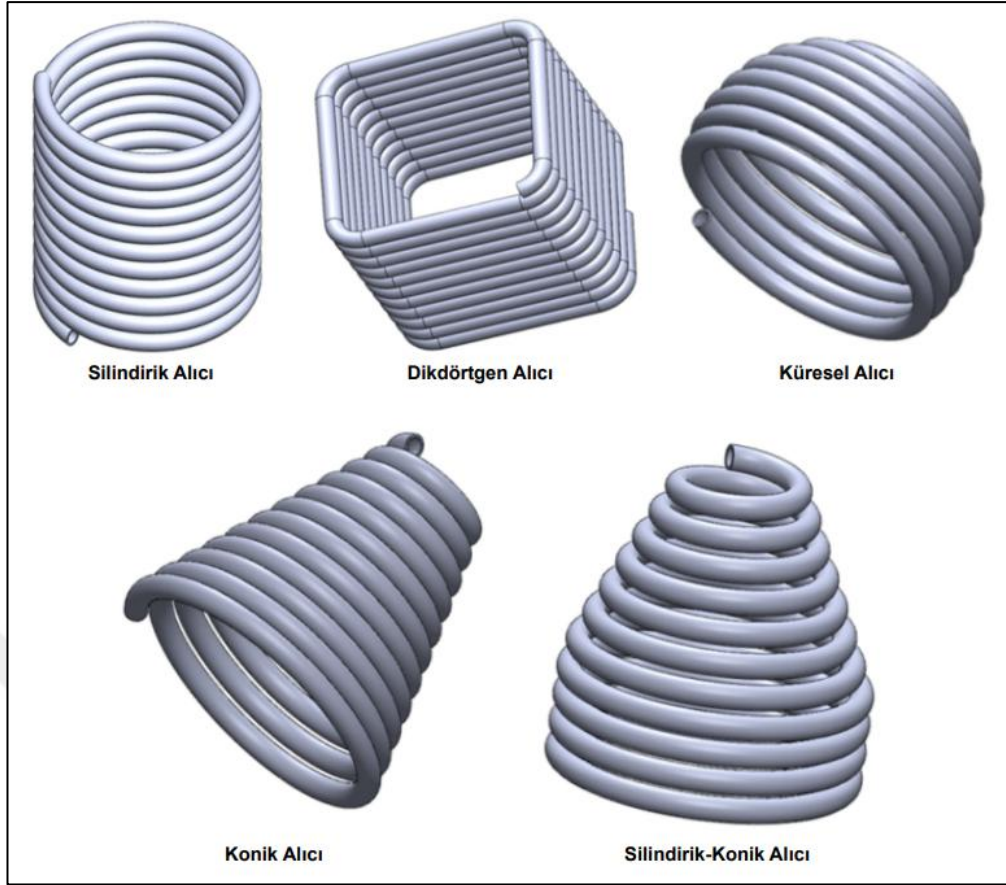
Şekil 2.11’de gösterilen encoder ve eğim ölçeri sistemde geri besleme olarak kullanılmışlardır. Bu sayede sistemin güneşi takibi sırasında oluşabilecek açısal hataların önüne geçmişlerdir. Şekil 2.12’de parabolik çanak sisteminin kararlılık kontrol diyagramı gösterilmiştir (Zhou vd., 2021).



Şekil 2.12. Kararlılık kontrol diyagramı (Zhou vd., 2021)

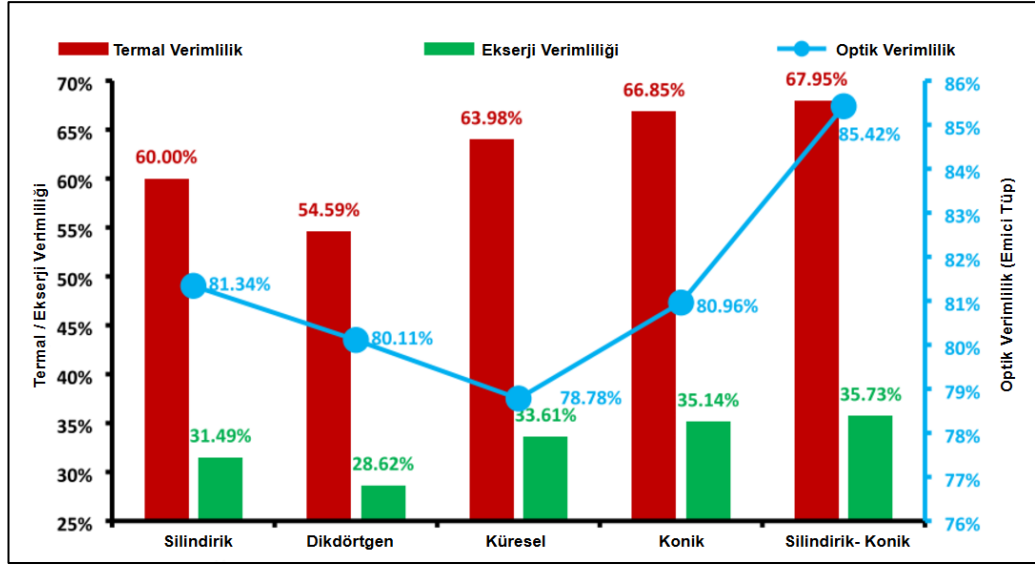
Deneysel çalışmalarında, sistemin ortalama güneş izleme doğruluğunu azimut ve zenit açıları için sırasıyla 0.278° ve 0.321° olarak hesaplamışlardır. Çanak çapını 3.84 m ve odak uzunluğunu 1.8 m olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, güneş ışınımının yoğunluğu ve rüzgar hızının sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuç olarak düşük hata payı ve yüksek doğruluk oranına sahip bir güneş izleme mekanizması geliştirmeyi başarmışlardır. Tasarladıkları sistem, çift eksenli izleme özelliği sayesinde güneş ışınımını azimut ve zenit açılarında etkili bir şekilde takip ederek maksimum enerji toplama potansiyeli sağlamıştır.

Bellos vd. (2019), parabolik çanak kolektörler için farklı kavite alıcı tasarımlarını optik ve termal performans açısından incelemişlerdir. Çalışmalarında, silindirik, dikdörtgen, küresel, konik ve silindirik-konik olmak üzere beş farklı kavite tasarımını analiz etmiş ve bu tasarımları optimize etmişlerdir. Optimize edilen tasarımların, 300°C 'deki performans kriterleri altında karşılaştırmalarını yapmışlardır. Şekil 2.13'te kavite alıcı tasarımları gösterilmiştir (Bellos vd., 2019).



Şekil 2.13. Tasarlanan kavite alıcı çeşitleri (Bellos vd., 2019)

Şekil 2.13'te verilen alıcılar ile yapılan analizler sonucunda en yüksek termal verimliliği %67.95 ile silindirik-konik tasarımın sağladığını belirlemişlerdir. Bu tasarımı %66.85 termal verimlilik ile konik tasarım ve %63.98 ile küresel tasarımın izlediğini ifade etmişlerdir. Optik verimlilik açısından ise silindirik-konik tasarımın %85.42 ile en yüksek değeri elde ettiğini, bunu sırasıyla %81.34 ile silindirik ve %80.96 ile konik tasarımların takip ettiğini tespit etmişlerdir. Dikdörtgen tasarımın düşük termal verimlilik (%54.59) sergileyerek en zayıf performansı gösterdiğini rapor etmişlerdir. Bu analiz sonuçları Şekil 2.14'te gösterilmiştir (Bellos vd., 2019).



Şekil 2.14. Alıcı çeşitlerinin performans karşılaştırılması (Bellos vd., 2019)

Tasarım parametrelerini analiz ederken, kavite uzunluğunun çoğu durumda açıklık çapına eşit olmasının optimum sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Daha uzun kavite tasarımlarının, iç yüzeyde düşük ısı akışıyla sonuçlanarak termal verimlilikte düşüşe neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Kavite tasarımları arasında, silindirik-konik tasarımın yüksek optik ve termal verimliliği ile tüm sıcaklık seviyelerinde en iyi performansı sunduğunu vurgulamışlardır.

2.3. Parabolik Oluk (PTC) ve Parabolik Çanak (PDC) Sistemlerinde Yapay Zekâ Modelleme Çalışmaları

Güneş enerjisi sistemlerinde, parabolik oluk (PTC) ve parabolik çanak (PDC) kolektörlerinin performansını artırmak, geleneksel yöntemlerle sınırlı kalmayan ileri modelleme ve optimizasyon yaklaşımlarını gerektirmektedir. Yapay zekâ temelli modelleme, bu sistemlerin termal, optik ve ekserji verimliliklerini öngörmek ve optimize etmek için etkili bir araç haline gelmiştir. Özellikle yapay sinir ağları (YSA), genetik algoritmalar (GA), destek vektör makineleri (SVM), regresyon modelleri ve bulanık mantık gibi yöntemler, bu sistemlerin karmaşık enerji transfer süreçlerini anlamak ve tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde, PTC ve PDC sistemlerinde kullanılan yapay zekâ modelleme tekniklerini ele alan literatür çalışmaları incelenecektir. Bu çalışmalar, güneş enerjisi sistemlerinin tasarım ve performans optimizasyonu süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının

sağladığı avantajlara odaklanmaktadır. Ayrıca, güneş ışıınımı, rüzgâr hızı, akışkan debisi ve giriş-çıkış sıcaklıkları gibi değişkenler üzerinde yapay zekâ tabanlı tahmin ve kontrol sistemlerinin katkıları değerlendirilecektir. Yapay zekâ temelli yaklaşımlar, bu sistemlerin doğruluğunu, hesaplama verimliliğini ve genel performansını artırmak için değerli bir araç sunmaktadır.

Liu vd. (2012), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin performansını modellemek ve optimize etmek için En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi (LSSVM) yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında, kolektör verimliliğini etkileyen güneş ışıınımı, akışkan debisi ve ısı transfer akışkanının (HTF) giriş sıcaklığı gibi faktörleri analiz etmişlerdir. Verileri, 30 m² ve 600 m² güneş alanına sahip iki farklı kolektör sisteminden elde etmişlerdir. Çalışmada kullanılan LSSVM model kernel formülü Denklem (2.1)'de verilmiştir (Liu vd., 2012).

$$y(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k K(x, x_k) + b \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de kullandıkları $y(x)$, x girdi verileri için alınan sonuçları, k , eğitim verisi örneklerini, N , toplam veri noktalarını, α_k , öğrenilmiş veri ağırlığını, b ise sapma katsayısını ifade etmektedir. LSSVM yöntemiyle yaptıkları modelleme ve simülasyonlar, güneş kolektör verimliliğinin güneş ışıınımı ve HTF debisi ile arttığını, ancak giriş sıcaklığı yükseldiğinde azaldığını göstermiştir. Ayrıca, 200-900 W/m² aralığında güneş ışıınımı, verimliliği %2.9 oranında artırmıştır. Akışkan debisinin artmasıyla kolektör verimliliğinin arttığını, giriş sıcaklığının 140°C'den 280°C'ye yükselmesi durumunda ise verimliliğin %2.7 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında, LSSVM yönteminin çoklu parametrelerin karmaşık etkilerini modelleme ve sistem performansını optimize etmede başarılı olduğunu kanıtlamışlardır. 600 m²'lik bir sistem için yaptıkları analizler, sistemin %40-60 verimlilik aralığında çalıştığını ve LSSVM yönteminin verimli bir şekilde performans tahmini ve optimizasyon koşullarını belirlediğini göstermiştir. Bu yöntemle, büyük ölçekli güneş termal enerji santrallerinin tasarımına ve geliştirilmesine önemli katkılar sağlamışlardır.

Cheng vd. (2015), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin (PTC) optik performansını optimize etmek amacıyla Monte Carlo ışın izleme (MCRT) yöntemi ile Parçacık Sürü

Optimizasyonu (PSO) algoritmasını birleştiren bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, MCRT simülasyonlarının yüksek hesaplama maliyetini düşürmek için bir çalışma süresi azaltma yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemi, hesaplama doğruluğu ile maliyet arasındaki dengenin sağlanması amacıyla tasarlamışlar ve istatistiksel indekslerle doğrulamışlardır. Modelin doğruluğunu test etmek için bilinen optik performansa sahip bir PTC üzerinde optimizasyon analizi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizlerde, PTC'nin optik verimliliğinin maksimum %87.27 seviyesine ulaşabileceğini tespit etmişlerdir. Bu optimizasyonu hem açıklık genişliği hem de odak uzunluğu değişkenlerini dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, önerdikleri yöntemin hesaplama süresini büyük ölçüde azalttığını ve MCRT simülasyonlarını daha verimli hale getirdiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, PTC sistemlerinin optik performansını optimize etmek için PSO ve MCRT yöntemlerini birleştiren yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmalarında, bu yöntemle yüksek doğruluk ve düşük hesaplama maliyeti elde edilebileceğini kanıtlamışlardır. Gelecekteki çalışmalar için çoklu hedef fonksiyonları ve yıllık performans analizlerini içeren daha karmaşık optimizasyon problemlerine odaklanılmasını önermişlerdir.

Zadeh vd. (2015), nanofluid kullanarak parabolik oluk kolektörlerin (PTC) termal performansını optimize etmek için hibrit bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, Al_2O_3 /sentetik yağ bazlı nanofluidi ısı transfer sıvısı olarak kullanmışlar ve sistemde karışık konveksiyonlu, tam gelişmiş türbülanslı akışı modellemişlerdir. Isı transferinin optimizasyonunda, Nusselt sayısını maksimize etmek ve basınç kaybını minimize etmek amacıyla çalışmışlardır. Bu bağlamda, Genetik Algoritma (GA) ile Sıralı Kuadratik Programlama (SQP) yöntemlerini birleştirerek hibrit bir optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Alıcı tüpü 7.8 m uzunluğunda ve 0.07 m çapında modellemişler ve Monte Carlo ışın izleme (MCRT) yöntemi ile ısı akısı dağılımını hesaplamışlardır. Bu hesaplamaları Fluent yazılımında sınır koşulları olarak uygulamışlardır. Sonuçlarında, nanopartikül konsantrasyonunun artışının ısı transfer katsayısını artırdığını, ancak operasyonel sıcaklık arttıkça bu etkinin azaldığını göstermişlerdir. Hibrit optimizasyon sürecinde, başlangıç noktalarını Genetik Algoritma ile belirlemişler ve kesin optimum çözümü SQP yöntemiyle elde etmişlerdir. Model 1 ve Model 2 için optimize edilmiş tasarım değişkenleri arasında giriş akış hızı (0.31 m/s - 0.32 m/s), giriş sıcaklığı (549 K - 535 K), nanopartikül konsantrasyonu (%0.065 - %0.066) ve alıcı tüp çapı (0.0475 m -

0.046 m) yer aldığını rapor etmişlerdir. Bu optimizasyon süreci ile her iki model için sırasıyla %10 ve %11.1 oranında hedef fonksiyon iyileştirmesi sağlamışlardır. Sonuç olarak, nanofluid tabanlı PTC sistemlerinin performansını artırmak için etkili bir modelleme ve optimizasyon yöntemi geliştirdiklerini ortaya koymuşlardır. Çalışmalarıyla, hem termal verimliliği artırmak hem de enerji sistemlerinin maliyetlerini düşürmek için önemli bir katkı sunduklarını ifade etmişlerdir.

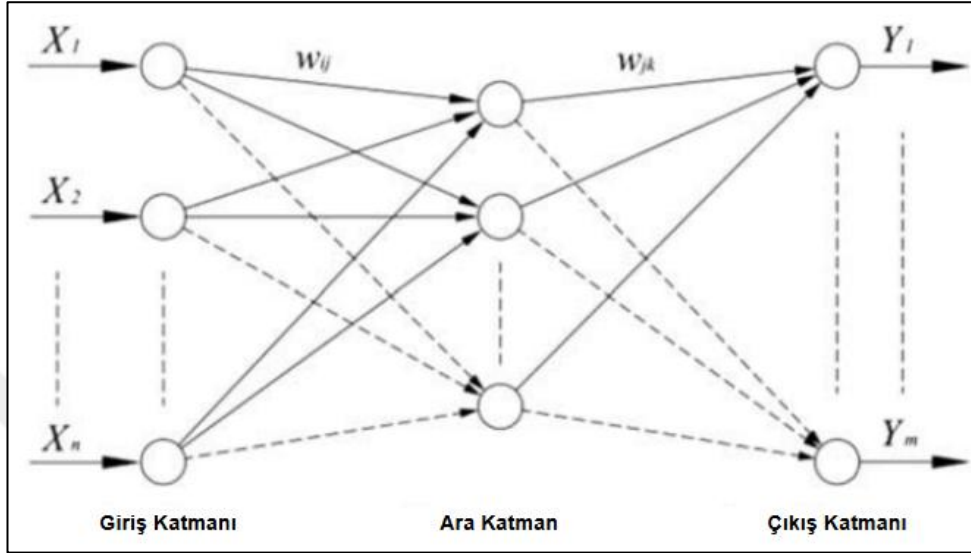
Tzuc vd. (2016), parabolik oluk kolektörlerin (PTC) termal verimliliğini optimize etmek için bir Yapay Sinir Ağı (ANN) ve ters modelleme yöntemine dayanan bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, kenar açısı, giriş ve çıkış akışkan sıcaklıkları, ortam sıcaklığı, su debisi, güneş ışıınımı ve rüzgâr hızı gibi parametreleri model giriş değişkenleri olarak kullanmışlardır. ANN modelini, deneysel veri setini kullanarak eğitmişler ve optimum işletim koşullarını belirlemek için optimizasyon süreçlerini uygulamışlardır. Denklem (2.2)'de ANN modeli için kullanılan nöron çıkış formülü verilmiştir (Haykin, 1999).

$$u(x,w) = \sum_{i=1}^n f(w_i x_i + b) \quad (2.2)$$

Çalışmada kullanılan denklemde $u(x,w)$, çıkış fonksiyonunu, w , giriş ağırlığını, x , girdi değerini, b ise bias değerini ifade etmektedir. ANN modelini kullanarak, termal verimlilik tahmininde %99.069 doğruluk elde ettiklerini ve minimum hata oranına (MAPE=0.1056%, RMSE=0.0038) ulaştıklarını göstermişlerdir. Optimizasyon sürecinde, su debisini kontrol değişkeni olarak seçmişler ve ANN modeli aracılığıyla bu değişkeni optimize ederek sistemin termal verimliliğini artırmayı başarmışlardır. Ayrıca, optimizasyon sürecinde deneysel ve modelleme verileri arasında yüksek bir uyum elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, ANN tabanlı ters modelleme yönteminin PTC sistemlerinin performansını artırmada etkili bir araç olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmalarıyla, yenilenebilir enerji ekipmanlarının verimliliğini artırma ve işletim maliyetlerini düşürme potansiyeline sahip bir yaklaşım sunduklarını göstermişlerdir.

Wang vd. (2017), parabolik oluklu güneş kolektörlerinin (PTC) termal performansını optimize etmek amacıyla Genetik Algoritma-Geri Yayılım (GA-BP) sinir ağı modeline dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, sistemin çıkış enerjisini,

termal verimliliğini ve emici yüzeydeki ısı kayıplarını öngörmek ve optimize etmek için bu modeli kullanmışlardır. Ayrıca, PTC'nin geometrik yapısını optimize ederek sistem performansını iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Şekil 2.15'te çalışmada kullanılan yapay sinir ağı modeli gösterilmiştir (Wang vd., 2017).



Şekil 2.15. Yapay sinir ağı model mimarisi (Wang vd., 2017)

Şekil 2.15'te gösterilen ve çalışmada kullanılan mimaride bulunan X değerleri, modele giren parametreleri, w_{ij} , giriş katmanı ile ara katman arasındaki bağlantı ağırlığını, w_{jk} , ara katman ile çıkış katmanı arasındaki bağlantı ağırlığını, Y değerleri ise çıkış nöronlarını ifade etmektedir. Yaptıkları analizlerde, GA-BP modelinin karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri başarılı bir şekilde tahmin ettiğini ve bu modelin LM-BP sinir ağı modeline göre daha yüksek doğruluk sunduğunu göstermişlerdir. Deneylerini, yaz ve kış mevsimlerinde, 700 farklı örnek veri seti kullanarak gerçekleştirmişlerdir ve modelin performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Termal performans tahmini, sistem gücü, termal verimlilik ve ısı kaybı gibi parametrelerle doğrulamışlardır. Sonuç olarak, Wang ve arkadaşları, PTC sistemlerinde optik kayıpları azaltmak ve termal performansı artırmak için iki boyutlu izleme sistemlerini ve GA-BP modelini birleştirerek, enerji sistemlerinde daha yüksek doğruluk ve düşük maliyetle optimizasyon sağlayan etkili bir yöntem sunmuşlardır.

Cheng vd. (2018), parabolik oluklu kolektörlerin (PTC) optik verimliliğini hesaplamak için yenilikçi bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, Monte Carlo ışın izleme (MCRT) modeli ile Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasını birleştirerek

parametreleştirek ampirik formüller oluşturmuşlardır. Bu yöntemi kullanarak, geleneksel MCRT modeline kıyasla yıllık optik verimlilik hesaplama süresini bir günden saniyenin 10^{-7} 'sine kadar düşürmeyi başarmışlardır. Optik verimlilik formüllerini, geometrik yapılandırmalar, optik özellikler ve çalışma koşulları gibi değişkenlere dayalı olarak türetmişler ve bu formülleri PSO algoritmasıyla optimize etmişlerdir. Analizlerinde, %33.75 - %81.43'e kadar değişen optik verimlilik oranları gözlemlemişlerdir. MCRT modelinden elde ettikleri sonuçların, PSO destekli formüllerle yüksek bir uyum gösterdiğini ve MAPE değerini %1.72, RMSE değerini ise 1.40 olarak hesapladıklarını rapor etmişlerdir. Araştırmalarında, formüllerin farklı geometrik konfigürasyonlar, izleme modelleri ve coğrafi konumlar altında uzun süreli optik verimlilik analizlerinde etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, PSO algoritmasını kullanarak PTC sistemlerinin geometrik parametrelerini optimize etmişler ve bu süreçte %69.33'e kadar optik verimlilik elde etmişlerdir.

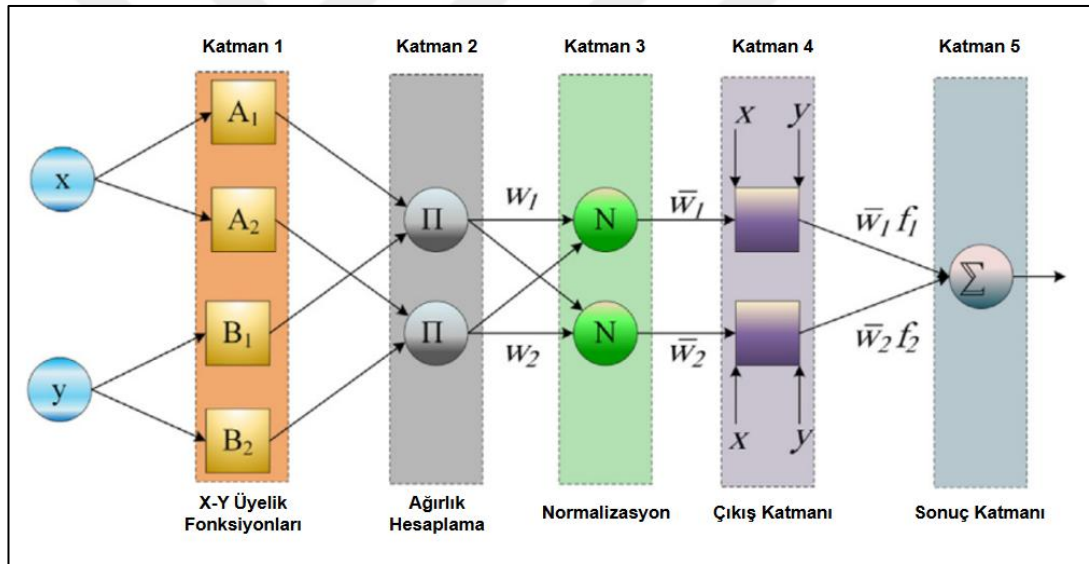
Frejo ve Camacho (2020), parabolik oluklu kolektörlerin termal güç üretimini maksimize etmek amacıyla merkezi ve dağıtılmış Model Öngörülü Kontrol (MPC) stratejileri geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, kolektör döngülerinin başlangıcına vanaları yerleştirerek bu vanaların kontrolü ile termal güç çıktısını artırmayı hedeflemişlerdir. Merkezi MPC stratejisini tüm sistem için optimal sonuçlar sağlamak üzere tasarlamışlar, ancak bu yöntemin yüksek hesaplama yükü nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalar için pratik olmadığını tespit etmişlerdir. Bu sorunu çözmek için, daha düşük hesaplama gereksinimiyle merkezi kontrol performansına yaklaşabilen bir dağıtılmış MPC algoritması önermişlerdir. Modelleme ve simülasyon çalışmalarını, İspanya'daki Almería'daki ACUREX kolektör alanını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İki saatlik bir güneş ışıınımı profili altında merkezi MPC'nin termal gücü %1.09 oranında artırdığını, ancak yüksek hesaplama süresi nedeniyle büyük ölçekli sistemlere uygun olmadığını göstermişlerdir. Dağıtılmış MPC algoritmasının ise termal güç çıktısını %1.05 oranında artırarak merkezi kontrol performansına yakın sonuçlar sunduğunu ve hesaplama süresini 240 saniyeden 17 saniyeye düşürdüğünü rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, vanaların kontrol edilmesiyle termal verimliliği artırmayı başarmışlar ve optimal güç üretiminin yüksek sıcaklıklarla değil, dengeli bir akış kontrolüyle elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Ajbar vd. (2021), parabolik oluklu güneş kolektörünün çıkış sıcaklığını tahmin etmek ve optimize etmek amacıyla yapay sinir ağı (ANN) ve Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) modelleri geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, giriş değişkenleri olarak giriş sıcaklığı, debi, güneş ışıınımı, rüzgâr hızı, kenar açısı ve ortam sıcaklığını kullanmış ve bu parametrelerle 6 farklı ANN modeli ile 4 farklı MLR modeli tasarlayarak karşılaştırmışlardır. Yaptıkları analizlerde, ANN-1 modelinin $R^2=0.9984$ ve $RMSE = 0.7708$ ile en yüksek doğruluğa sahip olduğunu belirlemişlerdir. MLR modelleri arasında ise İkinci Dereceden Denklem (SOE) modelinin $R^2=0.9976$ ve $RMSE = 1.6031$ ile en iyi performansı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, duyarlılık analizi yaparak giriş sıcaklığının PTC çıkış sıcaklığını en çok etkileyen parametre olduğunu ortaya koymuşlardır. Optimizasyon sürecinde, ANN ve MLR modellerini tersine çevirerek belirli bir çıkış sıcaklığı için en uygun giriş parametrelerini belirlemişlerdir. ANN modelinin yüksek doğruluk ve düşük hata oranı ile öne çıktığını, MLR modelinin ise daha düşük maliyetli ve basit bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Cervantes-Bobadilla vd. (2021), parabolik oluk kolektörlerde (PTC) çıkış sıcaklığını kontrol etmek için ters yapay sinir ağı (ANNi) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tabanlı bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, çevresel koşulların (rüzgâr hızı, güneş ışıınımı, ortam sıcaklığı) kontrol edilemediği durumlarda, giriş su akış hızını optimize ederek sistemin performansını artırmayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, giriş su akış hızı ve çevresel değişkenlerin, sistemin termal dinamikleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada, ileri beslemeli bir yapay sinir ağı (ANN) modeli tasarlayarak rim açısı, giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, güneş ışıınımı ve giriş su akışı gibi altı giriş parametresine dayalı olarak çıkış su sıcaklığını tahmin etmeyi başarmışlardır. Modelin doğruluğunu artırmak için geliştirdikleri ters yapay sinir ağı (ANNi), hedeflenen çıkış sıcaklığı için optimum giriş akış hızını hesaplamak üzere tasarlanmıştır. Bu modeli çözmek için PSO algoritmasını kullanarak optimum kontrol parametrelerini belirlemişlerdir. PSO algoritmasını, optimum giriş akış hızını bulmak için kullanmışlar ve bu süreçte fitness fonksiyonunu minimize ederek hedef değerleri elde etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarında, modelin ani ve yumuşak referans değişikliklerine başarılı bir şekilde adapte olduğunu göstermişlerdir. Örneğin, rüzgâr hızı ve güneş ışıınımındaki değişimlere rağmen, çıkış sıcaklığını hedeflenen değerde tutmak için gereken akış hızını optimize ettiklerini rapor

etmişlerdir. Düşük güneş ışınlamı ve soğuk hava koşullarında, sistem performansının fiziksel sınırlamalar nedeniyle azaldığını belirtmişlerdir. Gelecekte, daha fazla güneş kolektörü eklenmesi veya giriş sıvısının önceden ısıtılması gibi öneriler sunmuşlardır.

Zayed vd. (2021b), parabolik çanak kolektörlerinin termal performansını tahmin etmek için Eşitlik Optimizasyonu (EO) ile entegre edilmiş Hibrit Uyarlamalı Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) modelini geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, SPDC'nin silindirik alıcı ile çalıştığı ve farklı iş akışkanlarının kullanıldığı senaryolarda, sistemin enerji verimliliğini, ısı kazancını ve iş akışkanının sıcaklık farkını öngörmek için bu modeli kullanmışlardır. Geliştirdikleri ANFIS-EO modelini, geleneksel ANFIS ve yapay sinir ağları (ANN) modelleriyle karşılaştırarak, daha yüksek doğruluk sağladığını tespit etmişlerdir (Zayed vd., 2021b).



Şekil 2.16. ANFIS model mimarisi (Zayed vd., 2021b)

Yaptıkları analizlerde, ANFIS-EO modelinin enerji verimliliği tahmini için belirlenen R² değerinin 0.99999 olduğunu, bu değer ANFIS için 0.99992 ve ANN için 0.99978 olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, ısı kazancı ve sıcaklık farkı gibi diğer parametrelerde de ANFIS-EO modelinin en yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermişlerdir. RMSE değerini enerji verimliliği tahmini için ANFIS-EO'da 0.00155 olarak hesaplamışlar ve bu değer ANFIS ve ANN modellerine göre sırasıyla %21.71 ve %82.79 daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, ANFIS-EO modelinin SPDC'nin performansını tahmin etmekte üstün bir doğruluğa sahip olduğunu kanıtlamışlardır. Çalışmalarıyla, bu modelin geleneksel yöntemlere göre

daha etkili bir optimizasyon aracı sunduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, SPDC sistemlerinde iş akışkanlarının ve geometrik parametrelerin optimizasyonu için önemli bir temel sunmuşlardır. Gelecekteki çalışmalarda, farklı meta-sezgisel algoritmaların ANFIS modelleriyle entegre edilerek doğruluğun daha da artırılabilceğini önermişlerdir.

Nattappan vd. (2021), parabolik oluk kolektör (PTC) ve çanak Stirling motoru tabanlı bir güneş enerji santralinin otomasyon kontrol sistemini tasarlamışlardır. Çalışmalarında, PTC ve Stirling motorlarını birleştirerek otomasyon sürecini geliştirmişlerdir. Güneş ışınlamını en yüksek seviyede yakalamak amacıyla programlanabilir mantık kontrolörü (PLC) kullanarak güneş takip sistemini otomatikleştirmişlerdir. Önerdikleri sistemi hem sabit hem de rastgele güneş ışınlamı senaryolarında test etmişlerdir. Kontrol kazancını optimize etmek için Crow Search Algorithm (CRSA) algoritmasını kullandıklarını belirtmişlerdir. Sistem, azimut ve yükseklik açılarını kontrol ederek güneş radyasyonuna maksimum maruz kalmayı sağlamıştır. PLC'yi otomasyon döngülerini yönetmek ve verileri SCADA aracılığıyla insan-makine arayüzüne (HMI) aktarmak için programlamışlardır. Ayrıca, HMI aracılığıyla operatörün sistemdeki ekipmanları izleyip kontrol edebilmesine olanak tanımışlardır. Sensörler yardımıyla sıcaklık, basınç ve motor hızını izleyerek güvenli çalışma koşullarını sağladıklarını ifade etmişlerdir. Deneysel sonuçlarında, sistemin 450-500°C sıcaklık aralığında kararlı bir şekilde çalıştığını rapor etmişlerdir. Bu otomasyon sistemiyle, Stirling motoru ile PTC'nin birlikte kullanıldığı güneş enerji santrallerinde daha yüksek verimlilik ve güvenlik sunduklarını göstermişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, çalışmamızın temel yapısını oluşturan sistemlerin tasarımı, kontrolü ve performans değerlendirmesi için kullanılan yöntemleri detaylı bir şekilde açıklamayı amaçlamaktadır. Çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını hedefleyen parabolik oluk ve parabolik çanak kolektör sistemlerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, her iki sistemin de elektronik kontrol sistemleri, mekanik tasarımları, optik yansıtıcı tasarımları, alıcı sistemleri, güneş takip algoritmaları ve ısı hesaplamaları ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ele alınacak olan yöntemler ve analizler, çalışmanın bilimsel temellerini oluşturmakta ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, parabolik oluk ve çanak kolektör sistemlerinin tüm bileşenleri ve süreçleri ayrıntılı olarak incelenecek ve literatürdeki güncel gelişmeler ışığında değerlendirmeler yapılacaktır.

3.1. Parabolik Oluk Kolektör Sistemi

Parabolik oluk kolektör sistemleri, güneş enerjisinin yüksek verimlilikle toplanması ve ısı enerjisine dönüştürülmesi amacıyla kullanılan ileri teknoloji sistemlerdir. Bu bölümde, parabolik oluk kolektör sisteminin tüm bileşenleri ve işleyişi ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır. Bu kapsamlı analiz, parabolik oluk kolektör sistemlerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik önemli bilgileri sunacaktır.

3.1.1. Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sistemi

Parabolik oluk kolektör sistemlerinde elektronik kontrol sistemi, sistemin verimli bir şekilde çalışmasını ve güneş ışınlarının doğru bir şekilde odaklanmasını sağlamak amacıyla kullanılan bir dizi elektronik bileşenden oluşur. Bu kontrol sistemi, güneşin konumunu sürekli olarak izleyerek, kolektörün optimum açıda hizalanmasını sağlar. Elektronik kontrol sisteminin temel bileşenleri şunlardır:

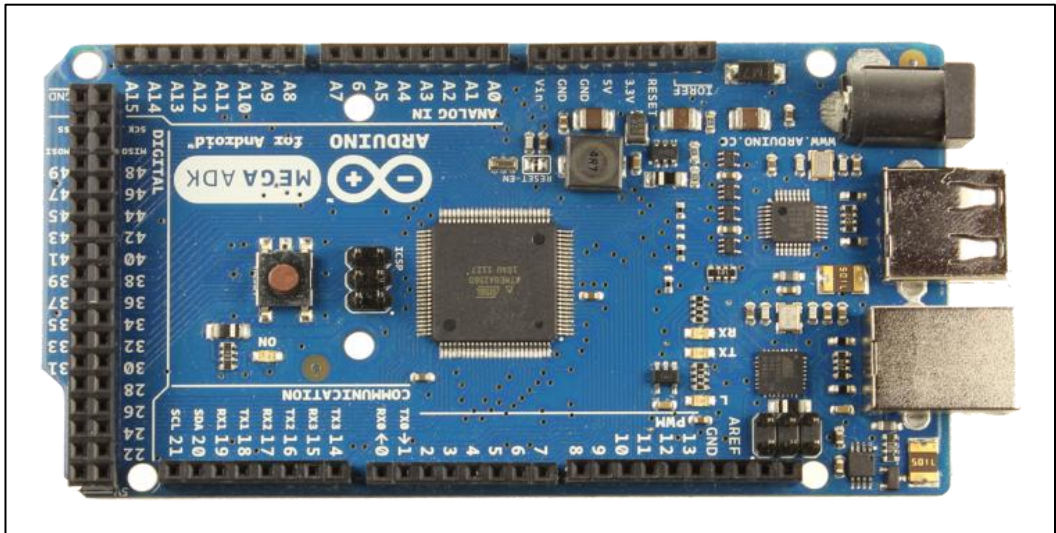
- **Mikrodenetleyici (Arduino MEGA 2560):** Bu bileşen, sistemin beyni olarak görev yapar. Mikrodenetleyici, çeşitli sensörlerden gelen verileri işleyerek güneşin konumunu hesaplar ve motorları kontrol ederek kolektörün doğru

açıya yönelmesini sağlar. Arduino MEGA 2560, yüksek işlem kapasitesi ve geniş giriş-çıkış pinleri ile bu tür uygulamalar için ideal bir seçimdir.

- **GPS sensörü (NEO6MV2):** GPS sensörü, sistemin bulunduğu yerin enlem, boylam, tarih ve zaman bilgilerini sağlar. Bu bilgiler, mikrodnetleyici tarafından güneşin konumunu hesaplamak için kullanılır. NEO6MV2 GPS modülü, yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunarak sistemin hassasiyetini artırır.
- **VFD sürücü (Değişken frekanslı sürücü):** VFD sürücü, elektrik motorlarının hızını ve torkunu kontrol etmek için kullanılır. Bu, motorların hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır ve enerji verimliliğini artırır. VFD sürücü, motorların performansını optimize ederek sistemin genel verimliliğine katkıda bulunur.
- **4 Kanal röle modülü:** 4 kanal röle modülü, mikrodnetleyici tarafından kontrol edilen cihazlar arasında geçiş yapmayı sağlar. Bu modül, motorların ve diğer elektriksel bileşenlerin açılıp kapanmasını kontrol eder. Röle modülü, sistemin farklı bölümlerini izole ederek güvenli ve verimli bir çalışma sağlar.
- **Elektrik motorları:** Elektrik motorları, kolektörün hareketini sağlayan bileşenlerdir. Motorlar, güneşin gün boyunca hareketine uyum sağlayarak kolektörün sürekli olarak güneşi takip etmesini mümkün kılar.
- **Döner enkoder:** Döner enkoder, geri besleme ve açı kontrolü sağlamak için kullanılır. Bu bileşen, kolektörün açısını hassas bir şekilde ölçerek mikrodnetleyiciye geri besleme sinyalleri gönderir. Bu sinyaller, kolektörün doğru açıda tutulmasını ve güneşi sürekli olarak takip etmesini sağlar.
- **Sınır anahtarları:** Sınır anahtarları, kolektörün hareket aralığını belirlemek ve mekanik limitleri korumak amacıyla kullanılır. Bu anahtarlar, kolektör belirli bir açıya ulaştığında devreyi keserek sistemin zarar görmesini önler ve güvenli bir çalışma ortamı sağlar.
- **Yazılım:** Sistemin çalışmasını yöneten yazılım, mikrodnetleyici üzerinde çalışır ve güneşin konumunu hesaplamak, sensör verilerini işlemek ve motorları kontrol etmek gibi görevleri yerine getirir. Bu yazılım, matematiksel modeller ve algoritmalar kullanarak güneşin konumunu hassas bir şekilde belirler.

Elektronik kontrol sistemi, tüm bu bileşenlerin uyum içinde çalışmasını sağlayarak parabolik oluk kolektör sisteminin verimliliğini maksimize eder. Sistem, güneşin konumunu doğru bir şekilde izleyerek, enerji toplama kapasitesini artırır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını destekler.

Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sisteminin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için tüm bileşenlerin birbirleriyle uyumlu ve koordineli bir şekilde işlev görmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, mikrodenetleyici, sistemin kalbi olarak görev yapar ve tüm verilerin işlenmesinden, motorların kontrol edilmesine kadar birçok kritik fonksiyonu yerine getirmektedir. Projede kullanılan Arduino Mega2560 mikrodenetleyicisi, karmaşık projeler ve geniş kapsamlı uygulamalar için tasarlanmış, yüksek kapasiteli bir mikrodenetleyici kartıdır. Bu kart, Atmel'in ATmega2560 mikrodenetleyicisi üzerine inşa edilmiş ve geniş bellek kapasitesi ile çok sayıda giriş-çıkış pinine sahiptir. Yüksek giriş-çıkış kapasitesine sahip olan Arduino Mega 2560, toplamda 54 dijital I/O (Giriş/Çıkış) pini ve 16 analog giriş pini bulunmaktadır. Geniş giriş-çıkış kapasitesi, çok sayıda sensör, motor ve diğer bileşenlerin aynı anda kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu özelliği ile parabolik oluk kolektör sisteminin çeşitli sensörler ve kontrol mekanizmalarıyla entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Şekil 3.1'de Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyicisi gösterilmektedir (Arduino, 2023).



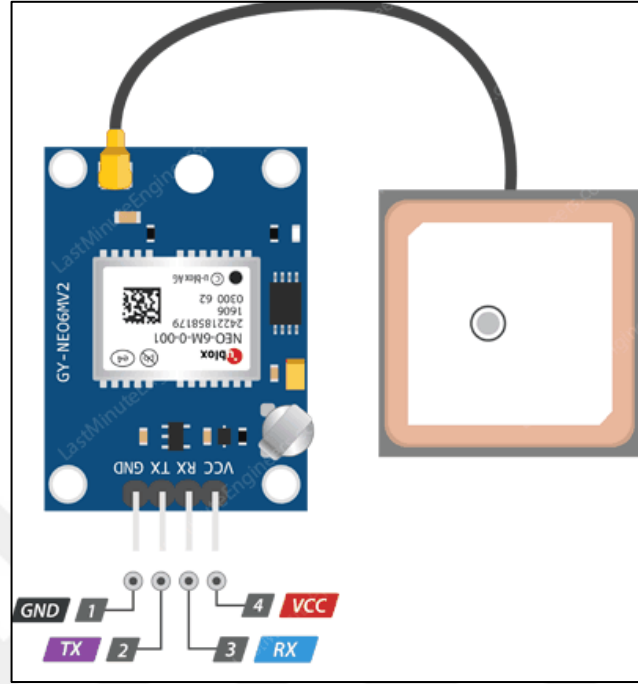
Şekil 3.1. Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyicisi (Arduino, 2023)

Arduino mikrodnetleyicisinin sistemdeki temel amacı parabolik oluk kolektörün güneşi takip etmesini sağlamaktır. Bunu ise GPS sensöründen aldığı verileri işleyerek gerçekleştirmektedir. GPS Sensöründen alınan enlem, boylam, tarih ve gerçek zamanlı saat verilerini, yazılımda bulunan matematiksel formüller yardımıyla güneş açılarına (saat açısı, deklinasyon açısı, azimut açısı, güneş yükseklik açısı) dönüştürmektedir. Bu nedenle gerçek zamanlı güneş takibi yapan sistemler için GPS sensörü olmak zorundadır.

Parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılan NEO6MV2 sensörü, hassas konum belirleme uygulamaları için tasarlanmış bir GPS modülüdür. Bu sensör, özellikle güneş takip sistemlerinde, kolektörün güneşin konumunu doğru bir şekilde izleyebilmesi için kritik öneme sahiptir. GPS sensörünün sağladığı veriler, mikrodnetleyici tarafından işlenerek güneşin günlük hareketlerinin doğru bir şekilde takip edilmesini sağlar. Bu sayede, kolektör sistemlerinin verimliliği ve enerji toplama kapasitesi artırılmaktadır. NEO6MV2 GPS sensörü, parabolik oluk kolektör sistemlerinde konum, tarih ve zaman bilgilerini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sensör, dünya üzerindeki konumun belirlenmesi için gerekli olan enlem ve boylam bilgilerini, yanı sıra zaman ve tarih verilerini yüksek doğrulukla sunar. Güneş takip sistemlerinde, bu veriler kullanılarak güneşin gökyüzündeki konumu hesaplanmakta ve kolektörlerin bu konuma göre hizalanması sağlanmaktadır.

NEO6MV2 GPS sensörü, yüksek hassasiyeti ile güneş takip sistemlerinde kolektörlerin optimum konumlandırılması için kritik öneme sahiptir. Düşük güç tüketimi sayesinde, güneş enerjisiyle çalışan sistemler için uygun bir çözüm sunmaktadır. Sensör, hızlı bir şekilde konum belirleme yeteneğine sahip olup, güneşin sürekli hareket halinde olduğu dikkate alındığında, kolektörlerin anlık ayarlamalar yapabilmesi için gereklidir. Aynı anda birden fazla GPS uydusunu takip edebilme özelliği, konum belirlemede yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlar. Sensör, enlem, boylam, yükseklik, hız, tarih ve zaman gibi çeşitli verileri çıkış olarak sunmakta olup, bu veriler mikrodnetleyici tarafından güneşin konumunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Sensör tarafından sağlanan enlem, boylam, tarih ve zaman verileri, mikrodnetleyiciye iletilmekte ve burada işlenmektedir. Mikrodnetleyici, bu verileri kullanarak güneşin açısını hesaplamakta ve motor sürücülerine uygun sinyaller

göndererek kolektörün doğru konumda tutulmasını sağlamaktadır. Şekil 3.2’de sistemde kullanılan GPS sensörü gösterilmiştir (LME, 2023).



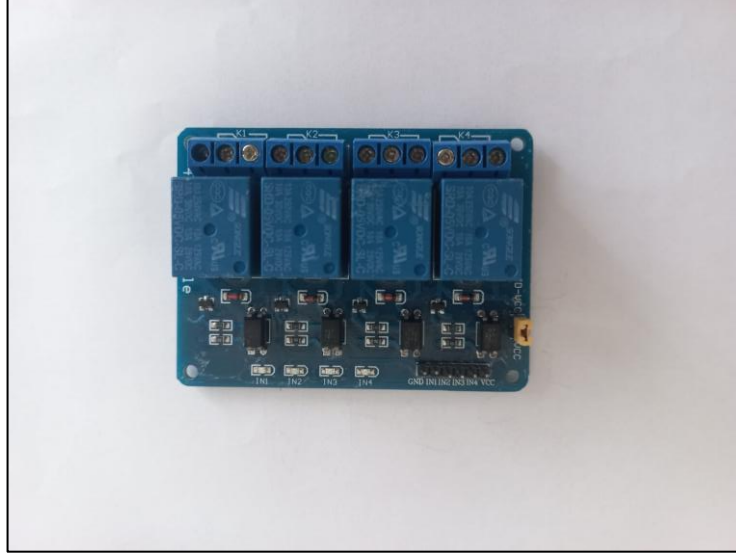
Şekil 3.2. NEO6MV2 GPS sensör modülü (LME, 2023)

Şekil 3.2’de gösterilen NEO6MV2 GPS Sensörü temel olarak R_X (Alıcı Pin), T_X (Verici Pin), GND (Toprak Pin), ANT (Anten) ve VCC (Güç Pin) pinlerine sahiptir. Bu pinler Arduino mikrodenetleyicisinin uygun pinlerine bağlanarak GPS sensörünün aktif olması sağlanmaktadır. Bu bağlamda R_X pini, dışarıdan veri alınmasını sağlayan giriş pini olarak işlev görmektedir ve mikrodenetleyicinin T_X pinine bağlanmaktadır. T_X pini ise sensörden veri gönderilmesini sağlayan çıkış pini olup, mikrodenetleyicinin R_X pinine bağlanmaktadır. R_X ve T_X pinleri haberleşme pinleri olup mikrodenetleyici ile seri haberleşme protokolünü aktif etmektedir. Diğer iki pin olan VCC ve GND pinleri ise güç pinleri olup GPS sensörünün çalışması için gerekli olan voltajı sağlamaktadır. VCC pini sensörün besleme voltajını almasını sağlar ve güç kaynağının pozitif terminaline veya mikrodenetleyicinin +3.3V/5V güç çıkışına bağlanmaktadır. GND pini ise sensörün toprak bağlantısını sağlamaktadır ve güç kaynağının negatif terminaline veya mikrodenetleyicinin GND pinine bağlanmaktadır. Son olarak ANT soketi, harici GPS antenin bağlanması için kullanılmakta olup, zayıf sinyal alımını iyileştirmek amacıyla harici antenin koaksiyel kablosuna da bağlanabilmektedir.

Mikrodenetleyici tarafından güneşin takibi için motor sürücülerine (değişken frekanslı sürücü) gönderilen elektronik sinyal +5 VDC'dir. Ancak sistemde kullanılan değişken frekanslı sürücülerin tetikleme gerilimleri +24 VDC'dir. Bu nedenle mikrodenetleyici ile değişken frekanslı sürücü arasında röle modülü kullanılmıştır. Kısaca Röle modülünün kullanılmasının nedeni voltaj uyumsuzluğudur. Bu voltaj uyumsuzluğu, doğrudan bağlantıyı imkânsız hale getirmekte ve güvenli bir şekilde kontrol sağlanabilmesi için bir ara bileşen (röle modülü) gerektirmektedir.

Röle modülü, düşük voltajlı bir sinyali alarak, daha yüksek voltajlı bir devreyi kontrol etme yeteneğine sahip bir elektromekanik anahtarlama cihazıdır. Röleler, küçük bir elektrik sinyaliyle büyük elektrik yüklerini kontrol edebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu özellikleri sayesinde, mikrodenetleyiciler ile yüksek voltajlı cihazlar arasında güvenli bir ara yüz oluştururlar. Arduino mikrodenetleyicisinden gelen 5V çıkış sinyali, röle modülüne iletilmektedir. Röle modülü, bu düşük voltajlı sinyali algılayarak içindeki elektromekanik anahtarı tetikler. Bu tetikleme, rölenin kontaklarının kapanmasına veya açılmasına neden olur ve böylece 24V'luk VFD devresine kontrol sinyali gönderilir. Bu süreç, Arduino'nun 5V çıkışı ile doğrudan 24V'luk VFD girişini kontrol edebilmesini mümkün kılar.

Röle modülünün kullanılması, sadece voltaj uyumsuzluklarını çözmekle kalmaz, aynı zamanda sistemin güvenliğini ve dayanıklılığını da artırır. Arduino ve VFD arasında elektriksel izolasyon sağlayarak, mikrodenetleyicinin yüksek voltaj veya akım dalgalanmalarından korunmasını sağlar. Bu izolasyon, potansiyel kısa devre veya aşırı yük durumlarında sistem bileşenlerinin zarar görmesini önler. Şekil 3.3'te röle modülü gösterilmiştir.



Şekil 3.3. 4 Kanal röle modülü

Şekil 3.3'te gösterilen 4 kanal röle modülünde IN_1 , IN_2 , IN_3 , IN_4 , VCC, GND, NO, NC ve COM pinleri bulunmaktadır. Bu pinler modülün mikrodenetleyici ve diğer bileşenlerle bağlantısını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. IN_1 , IN_2 , IN_3 ve IN_4 pinleri, mikrodenetleyiciden gelen kontrol sinyallerini almak için kullanılmaktadır. Her bir giriş pini, ayrı bir röleyi kontrol etmek üzere tasarlanmış olup, mikrodenetleyicinin dijital çıkış pinlerine bağlanmaktadır. Bu sayede, rölelerin açılıp kapanması mikrodenetleyici tarafından kontrol edilmektedir. Örneğin, IN_1 pinine bağlı bir dijital sinyal, ilk röleyi tetiklemektedir. VCC pini, röle modülünün besleme voltajını almaktadır. Bu pin, genellikle 5V veya 12V gibi çalışma voltajı değerlerinde beslenmekte ve rölelerin çalışması için gerekli olan elektrik enerjisini sağlamaktadır. GND pini, modülün toprak bağlantısını sağlamaktadır. Bu pin, devrenin ortak referans noktası olarak hizmet etmekte ve tüm devre bileşenlerinin ortak toprak noktasına bağlanmasını gerektirmektedir. GND pini, güç kaynağının negatif terminaline veya mikrodenetleyicinin GND pinine bağlanarak devrenin tamamlanmasını sağlamaktadır. NO (Normally Open) pini, röle devresi açıkken bağlantı kurulmayan, rölenin tetiklendiğinde devreyi tamamlayan pin olarak işlev görmektedir. Bu pin, röle aktif hale geldiğinde COM pinine bağlanarak devreyi tamamlamakta ve bağlı olan cihazın çalışmasını sağlamaktadır. NC (Normally Closed) pini, röle devresi kapalıyken bağlantı kurulan, rölenin tetiklendiğinde devreden çıkarılan pin olarak kullanılmaktadır. Bu pin, röle aktif değilken (tetiklenmediğinde) COM pinine bağlı olup, bu durumda devre tamamlanmaktadır. Röle tetiklendiğinde, NC ve COM pinleri arasındaki bağlantı kesilmektedir. COM (Common) pini, rölenin ortak bağlantı noktası

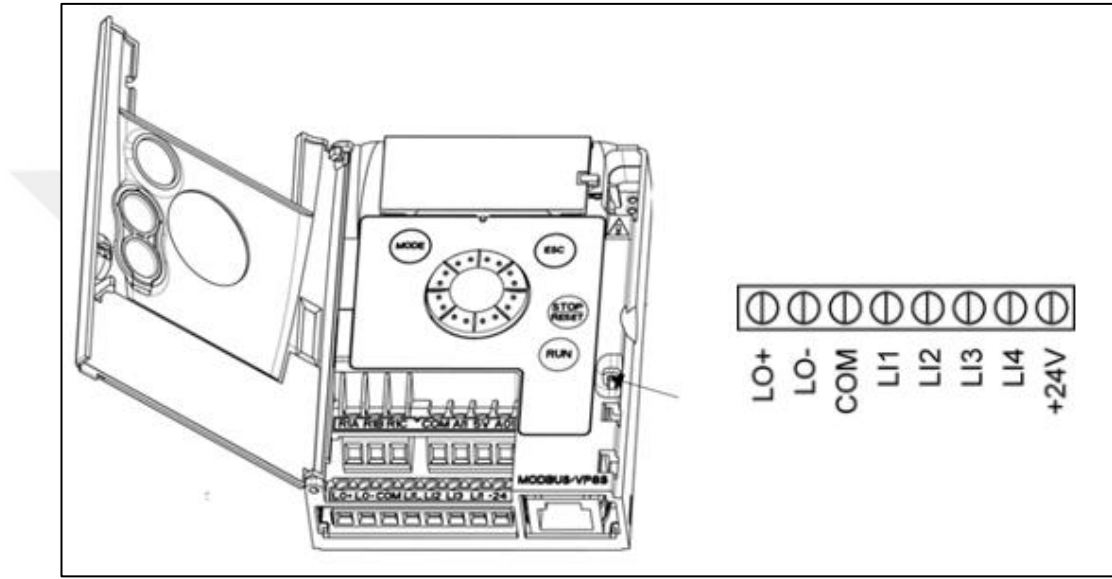
olarak görev yapmaktadır. Bu pin, rölenin diğer kontakları (NO ve NC) ile bağlantı kurmakta olup, röle tetiklendiğinde COM pini NO pinine bağlanarak devreyi tamamlamakta; röle tetiklenmediğinde ise COM pini NC pinine bağlanarak devreyi tamamlamaktadır. COM pinine genellikle kontrol edilmek istenen cihazın bir ucu bağlanmaktadır.

Röle modülü pinlerinin doğru şekilde bağlantısı, röle modülünün verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. IN pinleri mikrodenetleyici tarafından tetiklenirken, VCC ve GND pinleri modülün enerji ihtiyacını karşılamaktadır. NO, NC ve COM pinleri ise, rölelerin anahtarlama işlevini gerçekleştirerek bağlı cihazların çalışmasını kontrol etmektedir. Bu bağlantılar, sistemin genel performansını ve güvenliğini artırmak için kritik öneme sahiptir.

Röle modülü, Arduino mikrodenetleyicisi ile Schneider ATV 40 sürücüsü arasındaki voltaj uyumsuzluğunu gidererek güvenli ve etkili bir bağlantı sağlamakta ve sistemin genel performansını artırmaktadır. Parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılan Schneider ATV 40 değişken frekanslı sürücü (VFD), endüstriyel motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Bu sürücü, elektrik motorlarının hızını ve torkunu hassas bir şekilde kontrol etmek amacıyla tasarlanmıştır. Parabolik oluk kolektör sistemlerinde, motorların güneşin hareketini izleyerek kolektörlerin doğru açıda tutulmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Parabolik oluk kolektör sistemlerinde, güneşin gün boyunca izlenmesi ve kolektörlerin sürekli olarak güneşe doğru yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan motorlar, güneşin hareketini doğru ve verimli bir şekilde takip edebilmek için hassas bir kontrol gerektirmektedir. Schneider ATV 40 değişken frekanslı sürücü, bu motorların hızını ve yönünü kontrol ederek, güneşin konumuna göre kolektörlerin optimal açıda tutulmasını sağlamaktadır. Böylece, sistemin enerji toplama verimliliği artırılmakta ve maksimum enerji dönüşümü sağlanmaktadır.

Schneider ATV 40 sürücüsünün çalışma mantığı, motorun besleme frekansını ve voltajını değiştirerek hızını ve torkunu kontrol etmeye dayanır. Bu sürücü, giriş gerilimini alır ve içindeki güç elektroniği devreleri aracılığıyla bu gerilimi ayarlayarak motorun çalışma koşullarını değiştirir. Sürücünün temel bileşenleri arasında doğrultucu, ara devre ve inverter yer almaktadır. Doğrultucu, AC giriş gerilimini DC

gerilime dönüştürür. Ara devre, DC gerilimi filtreler ve düzgün bir DC gerilimi sağlar. Inverter ise, DC gerilimi, motorun ihtiyaç duyduğu değişken frekanslı AC gerilime dönüştürür. Bu işlem sayesinde motorun frekansı ve voltajı ayarlanabilir, böylece motorun hızı ve torku hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Sürücü, motorun çalışma koşullarına göre frekansı ve voltajı optimize ederek enerji verimliliğini artırır ve motorun mekanik aşınmasını azaltır. Şekil 3.4'te Schneider ATV 40 değişken frekanslı sürücü ve giriş terminali gösterilmiştir (SchneiderElectronic, 2021).



Şekil 3.4. Değişken frekanslı sürücü (sol) ve giriş terminali (sağ) (SchneiderElectronic, 2021)

Şekil 3.4'te gösterilen değişken frekanslı sürücüye ait olan giriş terminalleri sürücünün çeşitli kontrol ve güç bağlantılarını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu terminaller, sürücünün işlevselliği ve kontrolü için kritik öneme sahiptir. LO+ ve LO- terminalleri, sürücünün analog giriş sinyallerini almak için kullanılmaktadır. Bu terminaller, düşük voltajlı (0-10V ve 4-20mA) kontrol sinyallerini kabul ederek sürücünün çalışma parametrelerini ayarlamakta kullanılır. Analog sinyaller sayesinde, motor hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesi mümkün olmaktadır. Bu terminaller sayesinde asenkron motorun hız kontrolü bir potansiyometre yardımı ile kontrol edilebilmektedir. COM terminali, sürücünün referans toprak bağlantısını sağlar. Bu terminal, dijital ve analog giriş sinyallerinin ortak referans noktası olarak hizmet eder ve tüm kontrol sinyalleri bu terminal üzerinden referans alınarak sürücüye iletilir. Böylece, kontrol sinyallerinin doğru bir referans noktası ile çalışması sağlanarak, sistemin güvenilirliği artırılmaktadır.

LI₁, LI₂, LI₃ ve LI₄ terminalleri, sürücünün dijital girişleridir. Bu terminaller, dış kontrol cihazlarından gelen dijital sinyalleri kabul ederek sürücünün belirli işlevlerini etkinleştirmek veya devre dışı bırakmak için kullanılır. Örneğin, bu dijital girişler, motorun başlatılması, durdurulması veya belirli hız ayarlarının yapılması gibi işlemler için kullanılabilir. Dijital girişlerin doğru şekilde yapılandırılması, sürücünün esnek ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. +24V terminali ise, sürücünün dijital giriş ve çıkış devrelerini beslemek için kullanılan pozitif voltaj kaynağıdır. Bu terminal, sürücüye bağlı dijital cihazların çalışması için gerekli olan 24V DC gücü sağlar. Böylece, dijital giriş ve çıkış devrelerinin doğru şekilde beslenmesi sağlanarak, kontrol sisteminin güvenilirliği ve performansı artırılmaktadır.

Parabolik oluk kolektör sistemi tek eksende güneş takibi gerçekleştirmektedir. O nedenle tek bir asenkron elektrik motoruna sahip olup bu motorun kontrolü içinde bir adet değişken frekanslı sürücü kullanılmaktadır. Projede, Schneider ATV 40 değişken frekanslı sürücünün (VFD) giriş terminalleri, motorun ileri ve geri hareket ayarlarının kontrolü için kullanılmaktadır. LI₁ ve LI₂ terminalleri, sırasıyla ileri ve geri hareket komutlarını almak için yapılandırılmıştır. Bu terminaller, sürücünün dijital girişleri olarak, dış kontrol cihazlarından (Arduino MEGA) gelen dijital sinyalleri kabul eder ve motorun yönünü belirler.

Bu bağlamda, değişken frekanslı sürücüde iki telli kontrol (two wire control) modu aktif hale getirilerek LI₁ terminali ileri hareket komutunu tetiklemek için kullanılırken, LI₂ terminali geri hareket komutunu tetiklemek için kullanılmaktadır. Her iki terminal de, 24V terminali tarafından sağlanan güç ile aktif hale getirilmekte ve röle modülü üzerinden gelen sinyallerle tetiklenmektedir. Bu yapılandırma, motorun ileri ve geri yönlerde hassas ve güvenilir bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Röle modülünün kullanılması, Arduino'nun düşük voltajlı çıkış sinyallerinin VFD sürücüsünün 24V girişleriyle uyumlu hale getirilmesini mümkün kılmakta ve böylece sistemin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını temin etmektedir.

Değişken frekanslı sürücü ile mikrodenetleyici ve röle modülü kurulumu gerçekleştirildikten sonra asenkron eksen motorunun motor sürücüye bağlanması gerekmektedir. Sistemde, 1500 d/d (devir/dakika) ve 0.75 kW (1 Hp) gücünde bir asenkron AC elektrik motoru kullanılmıştır. Asenkron AC elektrik motoru, alternatif

akım (AC) ile çalışan ve stator ve rotor adı verilen iki ana bileşenden oluşan bir motor tipidir. Stator, sabit bir elektromanyetik alan oluştururken, rotor bu manyetik alan içinde dönerek mekanik enerji üretir. Asenkron motorların en belirgin özelliği, rotor hızının statorun manyetik alan hızına (senkron hız) tam olarak eşit olmamasıdır. Bu hız farkı, rotorun manyetik alanı takip etmesine neden olur ve bu nedenle bu motorlar "asenكرون" olarak adlandırılır.

Asenkron elektrik motorunun görevi, parabolik oluk kolektör sisteminde güneşin hareketini izlemek ve kolektörlerin sürekli olarak güneşe doğru yönlendirilmesini sağlamaktır. Motor, VFD sürücüsü tarafından kontrol edilmekte olup, bu sayede motorun hızı ve yönü hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. VFD sürücüsü, motorun hızını ve torkunu kontrol etmek için giriş gerilimini ve frekansını ayarlamaktadır. Bu kontrol, sürücünün LI₁ ve LI₂ terminalleri üzerinden alınan ileri ve geri hareket komutları ile sağlanmaktadır. Şekil 3.5'te asenkron elektrik motoru gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Asenkron elektrik motoru

Elektrik motorunun VFD sürücüsü ile olan bağlantısı, motorun verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını temin etmektedir. VFD sürücüsü, motorun nominal çalışma koşullarını koruyarak aşırı yüklenmelerden ve olası elektriksel arızalardan koruma sağlamaktadır. Motorun elektriksel bağlantısı, VFD sürücüsünün çıkış terminalleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu projede kullanılan 0.75 kW gücündeki motor, trifaz bir asenkron motor olup, VFD sürücüsü ile bağlantısı da bu doğrultuda

yapılmaktadır. Bu bağlantıda VFD, monofaz (tek fazlı) olarak aldığı AC elektriği, trifaz (üç fazlı) elektrik enerjisine dönüştürerek asenkron elektrik motoruna vermektedir.

Parabolik oluk kolektör sisteminde kolektörün güneşi takip edebilmesi için gerekli olan elektriksel bağlantı ve parçaların bağlantıları yukarıda anlatılan şekilde tamamlandıktan sonra güneşin takibi sırasında sistemin belirlenen sınır aç ve koşulları altında yüksek kararlılıkla çalışabilmesi adına sınır anahtarları ve döner enkoder kullanılması gerekmektedir. Sistemde kullanılan sınır anahtarı için proximity (yakınlık) sensörleri kullanılmaktadır. Proximity sensörleri, fiziksel temas gerektirmeden nesnelerin varlığını veya hareketini algılayabilen elektronik cihazlardır. Bu sensörler, manyetik, kapasitif veya endüktif prensiplere dayalı olarak çalışabilir ve belirli bir mesafede bulunan nesneleri algılayarak çıkış sinyali üretir. Proximity sensörleri, kolektörün hareket sınırlarına ulaştığını tespit eder ve bu bilgiyi mikrodenetleyiciye iletir. Mikrodenetleyici, bu geri besleme sinyaline göre motorları durdurur veya ters yönde hareket ettirir, böylece kolektörün güvenli bir şekilde çalışması sağlanmış olmaktadır. Parabolik oluk kolektör sisteminde kolektörün başlangıç (gün doğum) ve bitiş (belirlenen bitiş noktası) noktalarına yerleştirilen bu sensörler sistemin daha güvenli çalışmasını sağlayarak sistemsel arızalar nedeniyle oluşabilecek hatalı hareketlerin önüne geçmektedir. Şekil 3.6'da proximity (yakınlık) sensörü gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Proximity (yakınlık) sensörü

Şekil 3.6’da gösterilen ve sistemde kullanılan endüktif yakınlık sensörünün Vcc, GND ve OUT olmak üzere üç adet bağlantı pini vardır. Vcc pini, sensörün çalışması için gerekli olan besleme gerilimini sağlamaktadır. 10-30V DC aralığında bir gerilim gerekli olmakla birlikte bu pin, güç kaynağının pozitif terminaline bağlanır ve sensörün devrelerinin beslenmesini sağlar. GND pini, sensörün toprak bağlantısını sağlar ve sensörün stabil olarak çalışmasını sağlamaktadır. OUT pini ise sensörün algılama sonucunu ileten çıkış sinyalini vermektedir. Bu pin, algılanan metal nesnenin varlığına göre yüksek veya düşük bir sinyal çıkışı verir. Yakınlık sensör bağlantısı gerçekleştirildikten sonra elektronik kontrol sistemi tamamlanmış olmaktadır. Şekil A.1’de parabolik oluk kolektör sistemine ait elektronik kontrol devre şeması gösterilmiştir. Şekil A.1’de gösterilen elektronik kontrol şemasında merkezi kontrol birimi olarak temelde arduino Mega 2560 mikrodnetleyicisi bulunmaktadır. Bu mikrodnetleyiciye bağlı olan GPS sensörü Arduinoya enlem, boylam, tarih ve zaman verilerini göndermektedir. Bu veriler mikrodnetleyicide oluşturulan yazılım ile işlenerek güneş açıları elde edilmektedir. Güneş açıları referans alınarak oluşturulan tetikleme sinyalleri mikrodnetleyiciden röle modülüne ve son olarak değişken frekanslı sürücüye gönderilmektedir. Değişken frekanslı sürücü aldığı tetikleme sinyallerini LI₁ ve LI₂ terminalleri yardımıyla elektrik motoruna göndermekte ve bu sayede kolektör güneşi takip etmektedir.

Güneşin takibi sırasında oluşabilecek açı sapmalarının önüne geçebilmek adına eksen motor miline bağlı olan döner enkoder üzerinden geri besleme sağlanmaktadır. Herhangi bir açı sapmasında döner enkoder mikrodnetleyiciye sinyal göndererek sapan açı miktarı kadar eksen motorunu ileri veya geri döndürmekte ve güneş takip kararlılığı sağlanmış olmaktadır.

3.1.2. Parabolik oluk kolektörün mekanik tasarımı

Parabolik oluk kolektörler, güneş enerjisinin yoğunlaştırılarak kullanılmasını sağlayan yenilikçi ve etkili sistemlerdir. Bu sistemler, parabolik bir yüzey yardımıyla güneş ışığını tek bir odak noktasına yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını sağlar. Parabolik oluk kolektörlerin temel işlevi, güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek, endüstriyel süreçlerde ve elektrik üretiminde kullanılabilir hale getirmektir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadırlar.

Bu sistemlerin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi, büyük ölçüde mekanik tasarımın kalitesine bağlıdır. Mekanik tasarım, parabolik oluk kolektörlerin etkinliğini ve uzun ömürlülüğünü belirleyen kritik bir unsurdur. Çevresel koşullara dayanıklılık, mekanik yükler altında stabil kalma ve verimli çalışma gibi faktörler, mekanik tasarımın önemi ve gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, doğru bir mekanik tasarım, bakım maliyetlerini azaltarak sistemin ekonomik açıdan da sürdürülebilir olmasını sağlar.

Bu bölümde, parabolik oluk kolektörlerin mekanik tasarımına dair detaylı bir inceleme yapılacaktır. İlk olarak, parabolik yüzeyin geometrisi ve matematiksel modeli ele alınacak, ardından destek yapıların tasarımı ve optimizasyonu üzerinde durulacaktır. Hareket mekanizmaları ve imalat süreçleri gibi konular da kapsamlı bir şekilde incelenerek, parabolik oluk kolektörlerin mekanik tasarımının bütün yönleriyle ortaya konulması sağlanacaktır.

3.1.2.1. Parabolik oluk kolektör tasarım ilkeleri

Parabolik oluk kolektörlerin tasarımında, çeşitli mühendislik ve bilimsel ilkelerin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tasarım ilkeleri ve kriterler, sistemin verimliliğini, dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü en üst düzeye çıkarmak amacıyla belirlenmektedir. Güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamak için kolektörlerin optik ve termal özelliklerinin optimize edilmesi büyük önem taşır. Ayrıca, çevresel koşullara dayanıklılık, mekanik dayanıklılık ve malzeme seçimi gibi faktörler, kolektörlerin uzun vadeli performansını ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Parabolik oluk kolektörlerin tasarımında verimlilik ve performans hedefleri, sistemin etkinliğini ve enerji üretim kapasitesini belirleyen en kritik unsurlardır. Bu kolektörlerin temel amacı, güneş enerjisinden en yüksek oranda yararlanmak ve bu enerjiyi en verimli şekilde ısıya dönüştürmektir. Verimlilik ise optik verimlilik ve termal verimlilik olmak üzere iki ana bileşenle değerlendirilmektedir.

Optik verimlilik, güneş ışığının kolektör yüzeyi tarafından ne kadar etkin bir şekilde toplanıp enerjiye dönüştürülebildiğini ifade eder ve çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Bu faktörler arasında yansıtıcılık, geometrik tasarım, absorpsiyon özellikleri ve çevresel etkiler bulunmaktadır.

Parabolik oluk kolektörlerin optik verimliliğini artırmanın temel yollarından biri, yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerin kullanılmasıdır. Yansıtıcılık, gelen güneş ışığının kolektör yüzeyi tarafından ne kadarının yansıtıldığını belirlemektedir. Yüksek yansıtıcı özelliklere sahip malzemeler, güneş ışığının daha büyük bir kısmının enerjiye dönüştürülmesini sağlar, böylece kolektörlerin toplam verimliliğini artırır. Yansıtıcılık katsayısı (ρ), bir yüzeyin gelen ışığı ne kadar iyi yansıttığını gösteren bir ölçüdür ve %100'e ne kadar yakınsa, malzemenin yansıtıcılığı o kadar yüksektir. Yapılan araştırmalar ile gümüş ve alüminyum gibi metallerin yüksek yansıtıcılık katsayısına sahip olduğunu ve bu metallerin kullanılmasıyla optik verimliliğin önemli ölçüde artırılabilceği saptanmıştır (Duffie ve Beckman, 2006). Bu metallerin yansıtıcılık katsayıları ortalama %90'ın üzerinde olup, bu da onları parabolik oluk kolektörler için ideal yansıtıcı malzemeler yapmaktadır. Denklem (3.1)'de yansıtıcılık katsayı formülü verilmiştir (Duffie ve Beckman, 2006).

$$\rho = \frac{I_{\text{yansıtılan}}}{I_{\text{gelen}}} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de verilen ρ , yansıtıcılık katsayısını, $I_{\text{yansıtılan}}$, yansıtılan ışık yoğunluğunu, I_{gelen} ise kolektör yüzeyine gelen toplam ışık yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüksek yansıtıcılığa sahip malzemeler, güneş ışığının daha büyük bir kısmının enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, parabolik oluk kolektörlerde kullanılan yansıtıcı malzemelerin seçimi, sistemin genel verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Yansıtıcılık katsayısı ayrıca optik verimlilik üzerinde de etki sahibi olmaktadır. Denklem (3.2)'de optik verimlilik (η_{optik}) formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$\eta_{\text{optik}} = \rho \times \tau \times \alpha \quad (3.2)$$

Optik verimlilik (η_{optik}), bir kolektörün gelen güneş ışığını ne kadar verimli bir şekilde enerjiye dönüştürdüğünü belirler ve yansıtıcılık katsayısı da (ρ) bu verimlilikte önemli bir rol oynamaktadır. Denklem (3.2)'de verilen τ , geçirgenlik değerini ifade etmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasında bir değer alır. Geçirgenlik değeri 1'e ne kadar yakınsa, malzeme o kadar geçirgendir. Absorpsiyon katsayısı (α) ise bir malzemenin üzerine düşen ışığın ne kadarını absorbe ettiğini, yani emdiğini belirleyen bir ölçüdür.

Güneş enerjisi uygulamalarında, özellikle parabolik oluk kolektörler gibi sistemlerde, absorpsiyon katsayısı malzemenin güneş ışığını enerjiye dönüştürme verimliliği açısından kritik bir parametredir. Denklem (3.3)'te absorpsiyon katsayısı formülü verilmiştir (Duffie ve Beckman, 2006).

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorbe}}}{I_{\text{gelen}}} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te verilen I_{absorbe} , yüzey üzerinde absorbe (emilen) edilen ışık yoğunluğunu ifade ederken, I_{gelen} ise yüzeye gelen ışık yoğunluğunu ifade etmektedir. Parabolik oluk kolektörlerde, absorpsiyon katsayısının yüksek olması, gelen güneş ışığının büyük bir kısmının enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Yüksek absorpsiyon katsayısına sahip malzemeler, daha fazla ışığı emer ve bu enerjiyi ısıya dönüştürür, bu da kolektörün verimliliğini artırmaktadır.

Sistem üzerinde absorpsiyonu artırmak için farklı materyallerden faydalanılmaktadır.

- **Seçici Kaplamalar:** Yüksek absorpsiyon (emilim) ve düşük emisyon (yayılım) özelliklerine sahip kaplamalar, absorpsiyon katsayısını artırmada etkilidir. Bu kaplamalar, belirli dalga boylarında daha fazla ışık emer ve diğer dalga boylarında daha az ışık yaymaktadır.
- **Nano-Yapılı Malzemeler:** Nanoteknoloji kullanılarak üretilen malzemeler, ışığı daha etkin bir şekilde absorbe edebilmektedir. Bu tür malzemeler, geniş bir spektrumda yüksek absorpsiyon sağlayarak verimliliği artırmaktadır.
- **Siyah Kaplamalar:** Siyah renkli kaplamalar, geniş bir spektrumda yüksek absorpsiyon sağlar. Bu tür kaplamalar, gelen ışığın büyük bir kısmını emerek enerjiye dönüştürebilir.

Optik verimlilik kavramı, farklı bileşenlerin verimliliklerini bir araya getiren karmaşık bir parametredir. Parabolik oluk kolektörler gibi sistemlerde, farklı bileşenlerin (yansıtıcı yüzeyler, geçirgen yüzeyler, absorpsiyon yüzeyleri vb.) farklı optik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Örneğin yansıtıcı amacı, gelen güneş ışığını en yüksek oranda yansıtarak, odak noktasına yönlendirmektir. Bu nedenle, yansıtıcı yüzeylerde yüksek yansıtıcılık (ρ) olması istenmektedir. Eğer yansıtıcı yüzeylerin

geçirgenliği (τ) yüksek olursa, gelen ışığın bir kısmı yüzeyden geçer ve odaklanamaz, bu da optik verimliliği düşürmektedir.

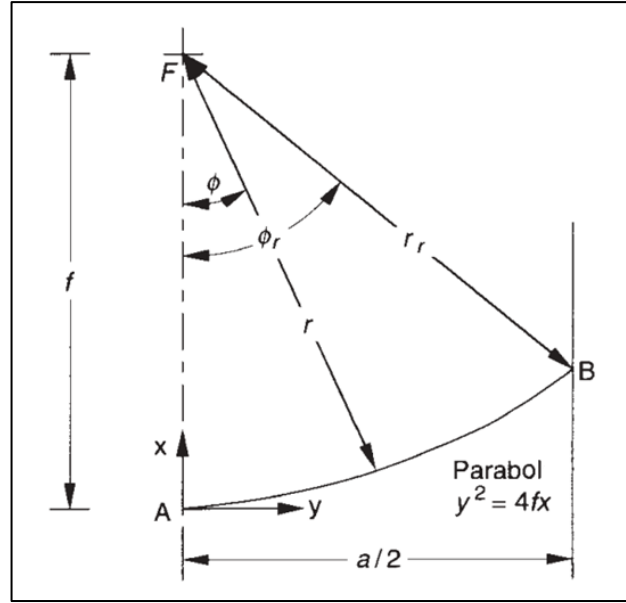
Geçirgen yüzeylerde ise örneğin, cam tüpler veya koruyucu kaplamalar, gelen güneş ışığının büyük bir kısmını absorpsiyon yüzeyine iletmek için yüksek geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir. Bu yüzeylerde yüksek geçirgenlik (τ), gelen ışığın büyük bir kısmının malzeme üzerinden geçmesini ve enerjiye dönüştürülmek üzere absorpsiyon yüzeyine ulaşmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak parabolik oluk kolektörlerde kullanılan her bileşen kendi işlevine uygun optik özelliklere sahip olmalıdır. Yansıtıcı yüzeyler yüksek yansıtıcılığa sahip olmalı, ancak geçirgen olmamalıdır. Geçirgen yüzeyler ise yüksek geçirgenliğe sahip olmalı, ancak yansıtıcı olmamalıdır. Bu dengenin doğru kurulması, parabolik oluk kolektörlerin genel optik verimliliğini azami seviyeye ulaştıracaktır.

Optik verimlilikte kullanılan yansıtıcı yüzey ve materyal seçimi ne kadar önemli ise kolektörün tasarımı ve geometrisi de o kadar önemlidir. Parabolik oluk kolektör (PTC) sistemleri, güneş ışığını toplamak ve odaklamak için parabolik reflektörler (yansıtıcı) kullanır. Bu reflektörler, gelen güneş ışığını odak hattına yönlendirir ve burada ısı enerjisi toplama tüpü yer alır. Parabolik yüzey geometrisi, bu sistemlerin verimliliği ve performansı için kritik öneme sahiptir. Parabolik oluk kolektöre ait parabol formülü Denklem (3.4)'te verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$y^2=4fx \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te verilen y ve x, parabolik yüzeyin x ve y eksenlerini ifade ederken f ise odak uzaklığını ifade etmektedir. Odak uzaklığı (f), parabolün odak noktası ile parabol başlangıç noktası arasındaki uzaklığı belirtmektedir. Şekil 3.7'de parabolik yansıtıcı ve ölçütleri gösterilmiştir (Duffie ve Beckman, 2006).



Şekil 3.7. Parabolik yansıtıcı tasarım ölçütleri (Duffie ve Beckman, 2006)

Şekil 3.7’de gösterilen F, parabole ait odak noktasını, f, parabolün odak noktası ile tepe noktası arasındaki mesafeyi yani odak uzunluğunu, r ve r_r ifadeleri parabol üzerindeki herhangi bir noktadan odak noktasına olan mesafeyi ifade etmektedir. Ayrıca ϕ , ışığın parabol yüzeyine gelen açısını, ϕ_r (rim açısı), yüzeye gelen ışığın yansıma açısını, a ise parabolik yansıtıcının genişliğini ifade etmektedir.

Parabolik yüzey geometrisinin matematiksel olarak modellenmesi, parabolik oluk kolektörlerin performansını değerlendirmek ve optimize etmek için gereklidir. Parabolik reflektörün her bir noktası, güneş ışığını belirli bir açıyla yansıtarak odak hattına yönlendirmesi gerekmektedir. Bu açı, reflektör yüzeyinin eğrilik yarıçapı, rim ve eğim açısı ile ilişkilidir. Şekil 3.7’de ϕ_r ile gösterilen rim açısı, parabolik yüzeyin kenar noktalarındaki eğimi ve güneş ışığının odak hattına nasıl yönlendirileceğini belirlemektedir. Bu açı, parabolik yüzeyin kenarları arasındaki açıyı ifade eder ve güneş ışığının etkili bir şekilde toplanması ve odaklanması için kritik öneme sahiptir. Denklem (3.5)’te rim açısı formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$\phi_r = 2 \arctan \left(\frac{D}{4f} \right) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)’te verilen D, parabolik yansıtıcının açıklık çapını yani parabolik yüzeyin kenarları arasındaki mesafeyi belirtir ve parabolik yüzeyin ışık toplama kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Özetle rim açısı, parabolik yüzeyin kenar

noktalarındaki eğimi belirleyerek, yüzeyin güneş ışığını odak noktasına yönlendirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca parabolik oluk kolektör yansıtıcısının ısı, optik vb. verimlilik hesaplarının yapılabilmesi adına gerekli olan farklı parametreler mevcuttur. Bu parametreler odak uzaklığı, yoğunlaştırma oranı ve yüzey alanıdır. Bu parametreler parabolik kolektör tasarım süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir. Tasarlanan kolektöre ait geometrik parametrelerin uyumu, üzerine gelen güneş ışınımının ne kadarının sistem alıcısına yansıtılacağını belirlemektedir.

Kolektör tasarımını etkileyen faktörlerin başında odak uzaklığı (f) gelmektedir. Şekil 3.7’de gösterildiği üzere odak uzaklığı parabolik yüzeyin tepe noktası ile odak noktası arasındaki mesafeyi ifade etmektedir ve Denklem (3.6)’da verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$f = \frac{a^2}{16d} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)’de verilen a, parabolik kolektörün açıklık çapını, d ise parabolik kolektör yüzey derinliğini ifade etmektedir. Bu formül yardımıyla sistemde kullanılan kolektör alıcısının doğru odak uzaklığında yerleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede parabolik oluk kolektör sisteminden elde edilen verimlilik artırılmış olmaktadır.

Parabolik oluk kolektörler çizgisel odaklayıcı (yoğunlaştırıcı) sistemlerdir. Sistemin kolektör yoğunlaştırma oranı da çıkış verimliliği üzerinde pozitif bir etki yapmaktadır. Sistem tasarımı öncesinde kolektöre ait yoğunlaştırma oranlarının hesaplanması gerekmektedir. Denklem (3.7)’de kolektöre ait odaklama oran formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$C = \frac{a}{4f} = \frac{a}{\pi D} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)’de yoğunlaştırma oranına ait iki farklı formül verilmiştir. Bu formüllerde bulunan C, yoğunlaştırma oranını, a, kolektöre ait iki kenar arasındaki açıklık mesafesini, f, odak uzaklığını, D ise sistem alıcısının çapını ifade etmektedir. Denklem (3.7)’de verilen iki farklı formül yardımıyla odak uzaklığı veya alıcı çap parametreleri ile sisteme ait yoğunlaştırma oranı hesaplanabilmektedir. Son olarak

hesaplanması gereken diğer bir parametre ise yüzey alanıdır. Kolektöre ait yüzey alanı sisteme ait ısı hesapların yapılabilmesi adına önemli bir parametredir. Denklem (3.8)'de yüzey alan formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$A = \frac{1}{2} \pi a L \quad (3.8)$$

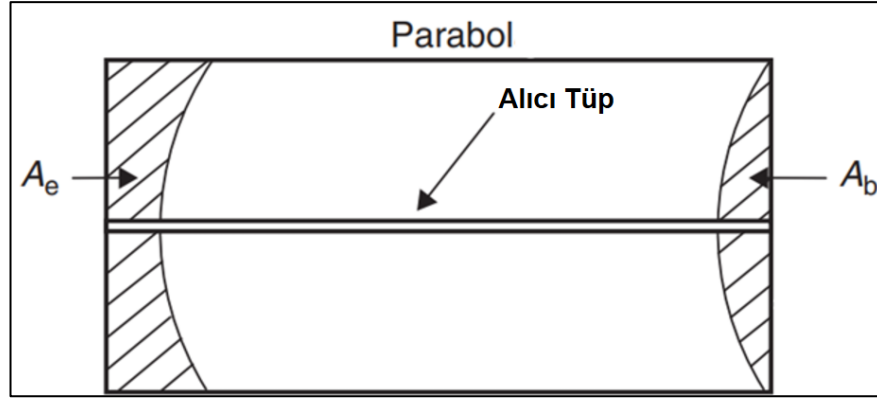
Denklem (3.8)'de verilen A, kolektör yüzey alanını, a, yüzey açıklık mesafesini, L ise kolektör uzunluğunu ifade etmektedir. Yukarıda verilen bütün formül ve parametreler doğrudan veya dolaylı olarak kolektörün toplam enerji toplama kapasitesine etki etmektedir. Denklem (3.9)'da parabolik oluk kolektör enerji toplama kapasite formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$Q = I \times A \times \eta_{\text{optik}} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'da verilen Q, sisteme ait enerji toplama kapasitesini, I, kolektör yüzeyine gelen toplam ışınım miktarını, A ise kolektör yüzey alanını ifade etmektedir. Kolektör enerji toplama kapasitesinin azami seviyeye çıkarılması kolektörün alanına, bu alan üzerine gelen güneş ışınım miktarına ve son olarak optik verime bağlı ve doğru orantılıdır. Denklem (3.2)'de optik verim formülü verilmişti ancak verilen formül parabolik oluk kolektör alıcı ve yansıtıcı gölgelenmiş alan kayıplarını içermemektedir. Teoride ideal bir oluk kolektörün optik verimi için genel bir denkleme olarak kabul edilebilir olsa da pratikte gerçek optik verim ile arasında fark bulunmaktadır. Bu nedenle optik verim hesaplarırken sisteme ait olan gölgeleme kayıplarının da hesaplanması gerekmektedir. Denklem (3.10)'da gölgeleme parametresinde dâhil edildiği optik verim formülü verilmiştir (Hoogendoorn, 1984).

$$\eta_{\text{optik}} = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da verilen kesim faktörü (γ), sistemin optik ile ilgili kayıplarını, A_f , kolektörün gölgeleme ve sapma faktörünü, θ ise güneş ışığının kolektöre geliş açısını (takip eden sistemler için 0°) ifade etmektedir. Şekil 3.8'de parabolik oluk kolektörün gölgelenme alanları gösterilmiştir (Kalogirou, 2009).



Şekil 3.8. Parabolik oluk kolektör gölgelenme alanları (Kalogirou, 2009)

Şekil 3.8’de gösterilen parabolik oluk kolektörde A_e , kaybedilen açıklık alanını, A_b , blokaj (engelleme) gölge kayıplarını ifade etmektedir. Parabolik oluk kolektörlerde optik verimliliği ve enerji toplama kapasitesini etkileyen önemli faktörlerden biri açıklık alanı (A_e , A_b) kayıplarıdır. Açıklık alanı kayıpları (A_e), parabolik oluk kolektörlerin geometrisinden kaynaklanan ve genellikle "uç etkisi" olarak adlandırılan kayıplardır. Uç etkisi, parabolik yüzeyin uç noktalarından yansıyan ışığın odak noktasına ulaşamaması durumunda meydana gelmektedir. Denklem (3.11)’de açıklık alan kaybı formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$A_e = f a \tan(\theta) \left[1 + \frac{a^2}{48f^2} \right] \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)’de verilen f , odak uzaklığını, a , kolektör açıklık mesafesini, θ , ışık geliş açısını ifade etmektedir. Açıklık alan kayıplarının haricinde sistemde blokaj/gölgeleme kayıpları da meydana gelmektedir. Blokaj ve gölgeleme kayıpları (A_b), parabolik oluk kolektörlerde kullanılan opak plakaların neden olduğu kayıplardır. Bu gölgeleme, reflektör yüzeyinin bir kısmında açıklık alanının kaybolmasına neden olur. Denklem (3.12)’de blokaj ve gölgeleme kayıp formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$A_b = \frac{2}{3} a h_p \tan(\theta) \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)’de verilen h_p parabolik oluk kolektöre ait parabol yüksekliğini ifade etmektedir. Denklem (3.11) ve Denklem (3.12)’de verilen her iki kayıp alan formülü kullanılarak toplam kayıp alan (A_l) hesaplanmaktadır. Toplam kayıp alan (A_l) formülü

Denklem (3.13)'te verilmiştir. Denklem (3.11) ve Denklem (3.12) numaralı her iki formülde de $\tan(\theta)$ terimi kullanıldığından, toplam kayıp alanı hesaplanırken bu terim formüle dâhil edilmemektedir (Jeter vd., 1983).

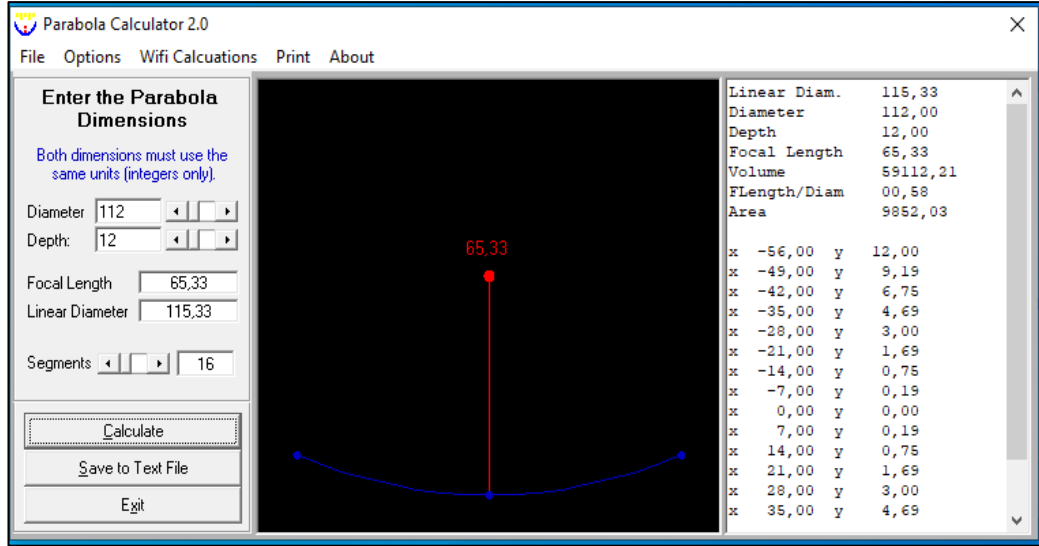
$$A_l = \frac{2}{3} a h_p + f a \left[1 + \frac{a^2}{48 f^2} \right] \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'te hesaplanan toplam kayıp alan yardımı ile sistem kolektörüne ait geometrik faktör A_f hesaplanacaktır. Geometrik faktör (A_f) optik verimliliğin bir bileşeni olarak kabul edilmektedir ve kaybedilen alanın toplam açıklık alanına oranını göstermektedir. Denklem (3.14)'te geometrik faktör formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te verilen formülde A_a toplam açıklık alanını ifade etmektedir. Geometrik faktör, kolektörün optik verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek geometrik faktör değerleri, açıklık alanındaki kayıpların fazla olduğunu ve bu nedenle optik verimliliğin düşük olduğunu gösterir. Düşük geometrik faktör değerleri ise kayıpların az olduğunu ve optik verimliliğin yüksek olduğunu belirtmektedir.

Parabolik oluk kolektörün tasarım ilke ve kriterlerinin iyi bilinmesi ve bu şartlara göre sistemin üretim ve montajının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada kullanılan parabolik oluk yansıtıcısı yukarıda verilen optik ve geometrik temellere göre tasarlanmıştır. Şekil 3.9'da tasarlanan kolektörün parabolik yüzey parametreleri gösterilmiştir (ParabolaCalc, 2023).



Şekil 3.9. Tasarlanan kolektörün parabol parametreleri (ParabolaCalc, 2023)

Şekil 3.9’da gösterilen parabolik yüzeyin uzunluğu 3.05 metre, parabol açıklığı 1.12 metre, parabol yüksekliği (derinliği) ise 0.12 metre olarak belirlenmiştir. Bu tasarım kriterlerine göre parabolik oluk kolektör odak uzunluğu 65.33 cm olmaktadır. Tasarlanan sistem boyutsal anlamda endüstriyel muadillerine göre daha küçüktür. Bunun nedeni tasarlanan parabolik oluk kolektörün çalışma özelinde kullanılacak olmasıdır. Çizelge 3.1’de tasarlanan parabolik oluk kolektöre ait matematiksel modelleme, geometrik hesaplar ve verim analizleri verilmiştir. Verilen bu sonuçlar yukarıda verilen denklemlere göre hesaplanmış ve ihtiyaç olunan katsayıların eldesi için literatürden faydalanılmıştır.

Çizelge 3.1. Tasarlanan parabolik oluk kolektör parametreleri

Parametreler	Değer	Birim
Parabol Uzunluğu (L)	3.05	m
Parabol Açıklığı (a)	1.12	m
Parabol Açıklık Alanı (A)	3.416	m ²
Alıcı Çapı	20	mm
Alıcı Alanı (A _r)	0.1884	m ²
Parabol Derinliği (h _p)	0.12	m
Parabol Odak Uzaklığı (f)	0.653	m
Parabol Yoğunlaştırma Oranı (C)	18.13	-
Yansıtıcılık Katsayısı (ρ)	0.85	-
Absorpsiyon katsayısı (α)	0.9	-
Geçirgenlik katsayısı (τ)	0.9	-
Rim Açısı (φ _r)	46.4	°
Açıklık Alan Kaybı (A _e)	0.409	m ²
Blokaj ve Gölgeleme Kayıpları (A _b)	0.047	m ²
Toplam Kayıp Alan (A _i)	0.456	m ²
Geometrik Faktör (A _f)	0.133	-

Çizelge 3.1’de verilen değerler sırasıyla incelenirse, parabol uzunluğu, açıklığı yardımı ile Denklem 3.8 kullanılarak parabol açıklık alanı (A) 3.416 m^2 bulunmaktadır. Parabol derinliği ve parabol odak uzaklığı hesapları ise Denklem (3.6) yardımı ile yapılmaktadır. Bunun sonucunda Şekil 3.9’da gösterilen odak uzaklığı 65.33 cm, parabol derinliği 12 cm olan parabolik yüzey elde edilmektedir. Şekil 3.10’da geliştirilen parabolik oluk kolektörün yansıtıcı parabolik yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Parabolik oluk kolektör yansıtıcı yüzeyi

Şekil 3.10’da gösterilen parabolik oluk kolektörün yansıtıcı yüzeyi krom-nikel kaplama saclardan imal edilmiş olup, sac kalınlığı 1 mm’dir. Yansıtıcı kaplamanın yansıtıcılık katsayısı 0.85’tir. Kolektör yansıtıcısı üzerine gelen güneş ışınımını odak noktasında bulunan bakır tüp alıcıya çizgisel olarak odaklamaktadır. Bakır tüp alıcı 3 metre uzunluğunda saf bakırdan olup çapı (dış) ise 20 mm’dir. Şekil 3.11’de parabolik oluk kolektöre ait bakır tüp alıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Parabolik oluk kolektör bakır tüp alıcısı

Şekil 3.11’de gösterilen bakır alıcı tüp Şekil 3.10’da gösterilen reflektör tarafından yansıtılan güneş ışınımını üzerinde çizgisel olarak toplamaktadır. Toplanan bu güneş ışınimleri alıcı bakır borusunu ısıtarak içerisinde bulunan operasyon sıvısının ısınmasına katkı sağlamış olmaktadır.

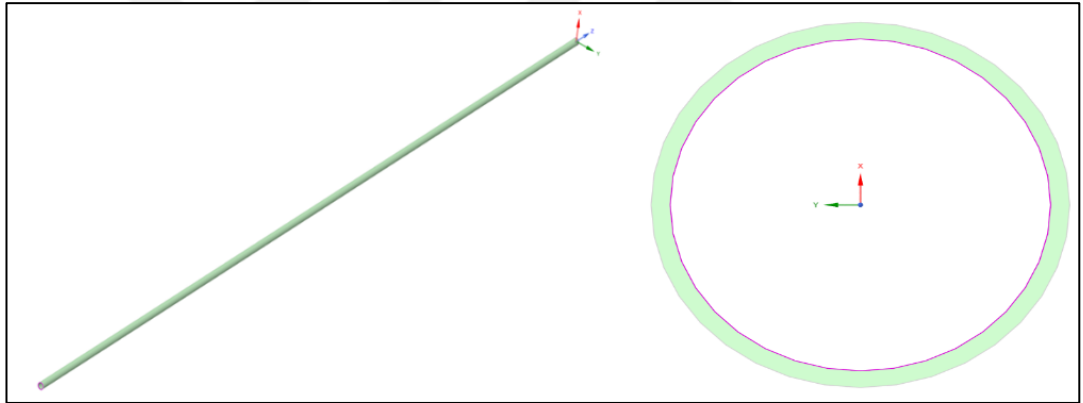
3.1.2.2. Parabolik oluk kolektör alıcısı

Parabolik oluk kolektör sistemlerinin merkezinde yer alan alıcı tüp, sistemin verimliliğini ve performansını doğrudan etkileyen kritik bir bileşendir. Güneş ışınlarının parabolik reflektör tarafından odaklandığı bu bileşen, termal enerjinin ısı transfer akışkanına iletilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Parabolik oluk kolektör alıcısı için malzeme seçiminde yüksek termal iletkenliği, mekanik dayanıklılığı ve korozyon direnci nedeniyle bakır alıcılar kullanılmaktadır. Bakırın yüksek termal iletkenliği, alıcı tüplerin hızlı ve etkin bir şekilde ısınmasını sağlamaktadır. Bu özellik, enerji dönüşüm sürecinde önemli bir avantaj sunar, çünkü ısı transfer akışkanının kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşmasına olanak tanımaktadır.

Bakırın mekanik dayanıklılığı ise bakır tüplerin uzun ömürlü olmasını ve zorlu çevre koşullarında dahi performansını korumasını sağlamaktadır. Ayrıca korozyon direnci açısından incelendiğinde bakır malzeme, alıcı tüplerin uzun vadeli kullanımı sırasında kimyasal etkilere karşı dayanıklı kalmasını ve bakım maliyetlerini azaltılmasını

sağlamaktadır. Bu özellikler, bakırın parabolik oluk kolektör sistemlerinde tercih edilen bir malzeme olmasında büyük rol oynamaktadır.

Bakır alıcı tüpler, yüzey kaplamaları ve vakum yalıtım teknolojileri ile yansıtma, absorpsiyon, geçirgenlik ve optik verimlilik değerleri optimize edilerek sistemin genel performansı artırılabilir. Literatürdeki çalışmalar, bu alıcı tüplerin çeşitli kaplama ve yalıtım yöntemleri ile verimliliğinin nasıl artırılabilirini ortaya koymaktadır. Bakır alıcı tüpün yüzey absorpsiyonunun geliştirilmesi Denklem (3.10)'da verildiği gibi optik verimi artırmaktadır. Absorpsiyon oranının artırılması için alıcının yüzey kaplaması Ghodbane vd. (2022), alıcı yalıtım tüplerinin kullanımı Bharti vd. (2018) ve Khelif vd. (2023) tarafından geliştirilen yöntemler kullanılarak optik verim artışı sağlanmaktadır. Şekil 3.12'de çalışmada kullanılan parabolik oluk kolektör alıcısı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Parabolik oluk kolektör alıcı çizimi

Şekil 3.12'de gösterilen parabolik oluk kolektör bakır tüp alıcısının iç çapı 18 mm dış çapı ise 20 mm'dir. Boru çapının 20 mm seçilmesinin nedeni bu çapa sahip bakır boruların sıkça bulunması yani malzemeye olan erişilebilirlik ve kolektörün çizgisel odaklama yapmasından dolayı daha büyük çaplı alıcıya ihtiyaç olunmamasıdır. Çizelge 3.2'de parabolik oluk kolektörün yansıtıcı, alıcı ve deney tasarım parametrelerinin literatür örneklemeleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Parabolik oluk kolektör tasarım parametreleri literatür örnekleri

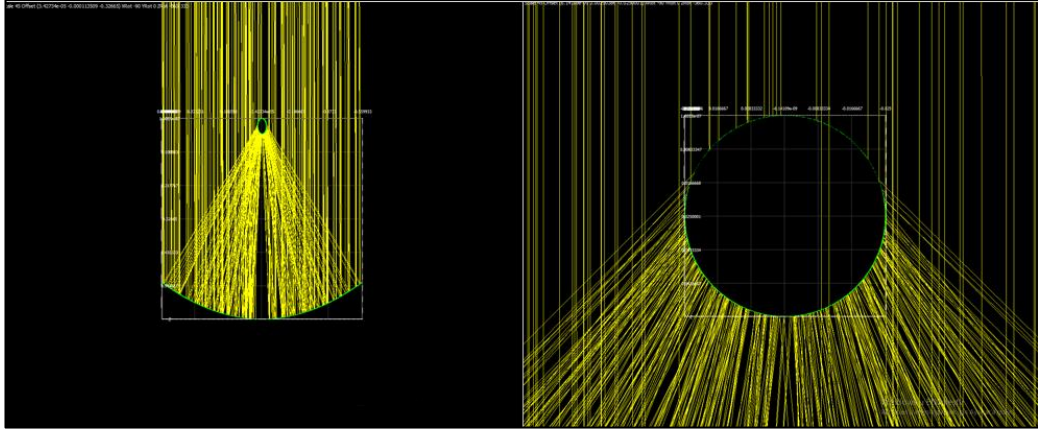
Yazar	Yıl	Alıcı Alanı (m ²)	PTC En (m)	PTC Uzunluk (m)	Alıcı İç Çapı (m)	Odak uzaklığı (m)	Yoğunlaştırma oranı
Jaramillo vd.	2016	5.187	1.06	4.88	0.023	0.266	13.33
Chafie vd.	2016	10.8	2.7	4	0.07	0.835	9.25
Reddy vd.	2015	7.5	2.5	3	0.054	0.976	26
Coccia vd.	2015	2	1	2	0.025	0.25	9.25
Mwesigye vd.	2015	30	6	5	0.066	-	86
Wu vd.	2015	69.24	5.77	12	0.066	1.71	82
Fernandez vd.	2015	2.2	1.1	2	0.016	0.23	19.45
Balghouthi vd.	2014	13.34	2.3	5.8	0.38	0.8	19.6
Montes vd.	2014	3.79	1.6	2.44	0.02654	0.4	18.98
Silva vd.	2013	-	-	-	0.0298	0.46	18.32
Abu-Hamdeh vd.	2013	3.7	-	-	0.0643	-	31.2
Liu vd.	2012	2.5	4.8	12	0.06	2.25	38
Kalogirou	1996	3.5	1.46	-	0.022	-	21.2

Çizelge 3.2’de verilen çalışmalara ait parametreler incelendiğinde literatürde farklı boyutlarda parabolik oluk kolektör tasarımları görülmektedir (Kalogirou vd., 1997; Liu vd., 2012; Abu-Hamdeh vd., 2013; Silva vd., 2013; Balghouthi vd., 2014; Montes vd., 2014; Coccia vd., 2015; Fernández-García vd., 2015; Mwesigye vd., 2015; Reddy vd., 2015; Wu vd., 2015; Chafie vd., 2016; Jaramillo vd., 2016). Boyut farklılıkları olmasına rağmen bütün çalışmaların ana amacı yoğunlaştırma oranlarının artırılarak termal ve optik verimin maksimize edilmesidir. Yüksek yoğunlaştırma oranına sahip sistemlerin genellikle büyük alıcı alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Denklem (3.7)’de verilen yoğunlaştırma oran formülü incelendiğinde kolektör açıklığının büyük olması bu oranın artırılmasında pozitif bir etki yarattığı görülmektedir. Ayrıca denklemde belirtildiği gibi odak uzunluğu ve alıcı çapı da yoğunlaştırma oranını etkileyen faktörler arasındadır. Bu değerler ne kadar küçük alınırsa yoğunlaştırma oranı o kadar yüksek olacaktır.

Parabolik oluk alıcısına ait odak uzaklığını azaltılması mümkündür. Odak uzaklığının kısaltılması için sisteme ait rim açısının artırılması gerekmektedir. Ancak rim açısının artırılması parabolik sistemin yüzey imalatının ve montajının zorlaşmasına, özellikle sabah ve akşam saatlerinde sistemin kendini engelleyerek gölgeleme kayıplarına neden olmasına, yansıma kayıplarından dolayı optik verimin düşmesine ve kolektöre gelen ışınımın dağılmasına neden olabilmektedir.

Alıcı boru çapının azaltılması yoğunlaştırma oranında artışı sağlamaktadır. Ancak çapın küçük olması sınırlı akıştan dolayı ısı taşıma kapasitesinin azalmasına, sınırlı ısı depolama kapasitesine ve kirlenme sebebiyle tıkanma risklerini barındırmaktadır. Bu nedenle parabolik oluk kolektör parametrelerinin seçiminde ve montaj öncesinde matematiksel modelleme ve simülasyonların yapılması gerekmektedir. Bu sayede imalat sonrası karşılaşılabilecek hataların önüne geçilmiş olacaktır.

Parabolik oluk kolektör alıcı ve yansıtıcı tasarımı gerçekleştirilirken optik modellemelerinin yapılması gerekmektedir. Bu sayede tasarlanan sistemin yansıtıcı ve alıcısının üzerlerine gelen güneş ışınımını ne kadar yansıtıp odaklayabildiği öğrenilebilir ve varsa hatalar tespit edilip imalat öncesi gerekli düzeltmeler gerçekleştirilebilir. Şekil 3.13'te tasarlanan parabolik oluk kolektör ışıyım modellemesi gösterilmiştir (SolTrace, 2021).



Şekil 3.13. Parabolik oluk kolektör yansıtıcı (sol) ve alıcı (sağ) optik modellemesi (SolTrace, 2021)

Şekil 3.13'te yansıtıcıya ait optik modelleme incelendiğinde yansıtıcı üzerine gelen ışığın büyük bir kısmının alıcıya iletildiği görülmektedir. Aynı şekilde bunun sağlaması olarak alıcı üzerine gelen ışıyım modeli incelendiğinde de alıcının güneş ışıyımının büyük bir bölümünü topladığı görülmektedir. Bu sisteme ait kesim (intercept) faktör değerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Kesim faktörü (γ), parabolik oluk kolektörlerde (PTC) yansıtıcı yüzeyden yansıyan güneş ışınlarının, alıcı boru tarafından yakalanma oranını ifade eden bir parametredir. Bu parametre, PTC sistemlerinin tasarımında ve performans değerlendirmesinde kritik

bir role sahiptir. Yüksek bir kesim faktörü, sistemin daha verimli çalıştığını ve daha fazla güneş enerjisini toplayabildiğini gösterirken, düşük kesim faktörü ise enerji kayıplarına ve sistem verimliliğinin az olduğunu göstermektedir. Kesim faktörünün genel formülü Denklem (3.15)'te verilmiştir (Duffie ve Beckman, 2006).

$$\gamma = \frac{\text{Alıcı Boruya Ulaşan Işık Enerjisi}}{\text{Parabolik Yüzeyden Yansıtılan Toplam Işık Enerjisi}} \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'te formülü verilen kesim faktörü (γ), 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. 1 değeri, yansıtılan tüm ışık enerjisinin alıcı boruya ulaştığını, 0 değeri ise hiçbir yansıyan ışığın alıcı boruya ulaşmadığını ifade etmektedir. Kesim faktörü imalat aşamasından önce teorik olarak hesaplanarak tasarımdan kaynaklı olumsuz etkiler var ise düzeltilmelidir. Çizelge 3.3'te literatürde yapılan çalışmaların kesim faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Parabolik oluk kolektör kesim faktörü (γ) literatür örnekleri

Yazar	Yıl	Kesim Faktörü (γ)
Jaramillo vd.	2016	0.85
Chafie vd.	2016	0.658
Toghyani vd.	2016	0.95
Bouvier vd.	2015	0.994
Fernandez-García vd.	2015	0.95
Balghouthi vd.	2014	0.62-0.7
Al-Sulaiman	2014	0.93
García-Cortés vd.	2012	0.907
Reddy vd.	2012	0.92
Montes vd.	2011	0.92
Kumar ve Reddy	2009	0.9
Kalogirou	1998	0.95

Çizelge 3.3'te verilen çalışmalar ve çalışmalara ait kesim faktörü değerleri görülmektedir (Kalogirou, 1998; Ravi Kumar ve Reddy, 2009; Montes vd., 2011; García-Cortés vd., 2012; Reddy vd., 2012; Al-Sulaiman, 2014; Balghouthi vd., 2014; Bouvier vd., 2015; Fernández-García vd., 2015; Chafie vd., 2016; Jaramillo vd., 2016; Toghyani vd., 2016). Bu değerlerin ortalaması alındığında 0.882 kesim faktörüne ulaşılmaktadır. Bu değer parabolik oluk kolektöre ait yansıtıcı üzerine gelen güneş ışınlamalarının %88.2'inin bakır tüp alıcı üzerine odaklandığını ifade etmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda bulunan bu değerler kesim faktörü açısından olumludur. Ayrıca tasarladığımız parabolik oluk kolektöre ait kesim faktörü (γ) değeri

0.88'dir. Bu değer literatür çalışmalarında elde edilen değer ile % 0.2 bir sapma değeri ile uyuyşmaktadır.

3.1.2.3. Parabolik oluk kolektör montaj aşaması

Parabolik oluk kolektör montaj süreci, sistemin temel bileşenlerinin güvenli ve etkili bir şekilde yerleştirilmesini konu almaktadır. Montajın başarılı bir şekilde tamamlanması, sistemin maksimum verimlilikle çalışmasını ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Ana montaj aşamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Temel Destek Yapılarının Montajı
- Parabolik Aynaların Montajı
- Alıcı Tüpün Montajı
- Aktüatör ve Hareket Sistemlerinin Montajı

Parabolik Oluk Kolektör (PTC) sistemlerinin verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için temel destek yapıların sağlam ve doğru bir şekilde montajı büyük önem taşımaktadır. Temel destek yapıları, parabolik aynalar ve alıcı tüp gibi ana bileşenlerin yerinde sabitlenmesini ve sistemin dış etkenlere karşı dayanıklılığını sağlamaktadır. şekil 3.14'te tasarlanan parabolik oluk kolektörün temel destek yapısı gösterilmiştir.



şekil 3.14. Parabolik oluk kolektör temel destek yapısı

Şekil 3.14'te gösterilen parabolik oluk kolektöre ait temel destek yapısı, zemin üzerinde kolay bir şekilde hareket etmesi için dört adet döner teker bulundurmaktadır. Döner tekerlerde hepsi ayrı olmak üzere dış etkilerden etkilenmemesi adına kilitli fren sistemi bulunmaktadır. Bu sayede sistemin çalışması sırasında rüzgâr, sarsıntı veya sistemin güneşi takip ederken kolektörün kendi hareketlerinden kaynaklanan açısall sapmaların önüne geçilmektedir.

Teker sistemlerinin üstünde metal profilden dikdörtgen şekilde destek tablası oluşturulmuş ve bu tabla üstünden yükselen iki destek kolu ile kolektör iskeleti sabitlenmiştir. Kolektörlerin destek kolları üzerindeki hareketlerinin kısıtlanmaması ve kolektör ağırlığının dengeli bir şekilde sisteme dağılması adına her bir destek koluna rulmanlar montajlanmıştır. Rulmanlardan biri ağırlık desteği sağlayarak sistemin takılmadan dönmesini sağlarken diğer rulman ise eksen motor miline bağlanarak kolektörün güneş takibi için ihtiyaç duyduğu hareketi sisteme dağıtacaktır. Şekil 3.15'te eksen motor mili için hazırlanan rulman gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Eksen motor rulman takımı

Şekil 3.15'te gösterilen rulman 20 mm çapa sahip olup içerisinden motor mili geçecektir. Ancak sistemde kullanılan AC asenkron motor ve redüktör mil çapları 25 mm'dir. Bu nedenle mil çeliğinin bir ucu eksen motoru için 25 mm çapta diğer ucu ise

rulman montajının yapılabilmesi için 20 mm çapta olacaktır. Bu değerlere sahip mil piyasada bulunmadığından dolayı mil çeliğinin torna işleminden geçmesi ve istenilen montaj kriterlerine uygun olarak düzeltilmesi gerekmektedir. Şekil 3.16’da eksen motor milinin montaj şartlarına göre işlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Motor mil çeliği imalat aşamaları

Şekil 3.16’da gösterilen motor mil çeliği yüksek mukavemete sahip alaşımlı bir yapıya sahiptir. Bu sayede motordan aldığı tork değerini kolektöre aktarırken herhangi bir kırılma, deformasyon veya aşınma gibi olumsuz etkilere maruz kalmamaktadır. Motor milinin imalat aşaması tamamlandıktan sonra eksen motoru, redüktör ve milin bağlanması gerekmektedir. Parabolik oluk kolektör sistemlerinin düzgün ve kararlı çalışabilmesi için hareket mekanizmasının güvenilir ve hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, eksen hareketini sağlayan AC asenkron motorlar önemli bir rol oynamaktadır.

Asenkron motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makineler olup, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorların temel çalışma prensibi, rotor ve stator arasındaki elektromanyetik indüksiyon yoluyla hareketin sağlanmasıdır. AC (Alternatif Akım) asenkron motorlar, şebeke frekansına göre çalışan motorlardır ve parabolik oluk kolektör gibi genellikle sabit hız gerektiren

uygulamalarda tercih edilmektedirler. Çalışmalarda kullanılan AC asenkron motorlar belirli kriterlere göre seçilmektedir. Bunlar;

- **Güç ve tork gereksinimleri:** Motorun sağlayacağı güç ve tork, sistemin ihtiyaçlarına uygun olmalıdır. Parabolik oluk kolektör sistemlerinde, motorun hareket ettireceği yük ve bu yükün gerektirdiği tork miktarı doğru bir şekilde hesaplanmak zorundadır. Aksi halde motor kolektör sistemini döndüremeyecek ve bu sistemin güneşi doğru bir şekilde takibini zorlaştıracaktır.
- **Çalışma hızı:** Motorun çalışma hızı, sistemin verimli çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Parabolik oluk kolektörlerin güneşi takip edebilmesi için belirli bir hızda dönmesi gerekmektedir. Bu nedenle, motorun hız özellikleri dikkatlice incelenmelidir.
- **Verimlilik:** Yüksek verimliliğe sahip motorlar, enerji tasarrufu sağlar ve işletme maliyetlerini düşürür. Asenkron motorların verimlilik sınıfları dikkate alınarak, enerji verimli bir motor seçilmelidir.
- **Dayanıklılık ve bakım gereksinimleri:** Parabolik oluk kolektör sistemleri, genellikle açık hava koşullarında çalıştığı için motorun dayanıklı olması ve minimum bakım gerektirmesi önemlidir. Toz, nem ve sıcaklık değişimlerine karşı korumalı motorlar tercih edilmelidir.

Yukarıda verilen eksen motor seçim kriterleri incelendiğinde öncelikli olarak sistemin güç ve tork gereksinimlerinin hareket mekanizması tarafından karşılanması gerekmektedir. Bu nedenle AC asenkron motor seçiminin yapılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan eksen motorunun teknik özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. AC asenkron motor teknik özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Motor Gücü	0.75	Kw
Motor Frekansı	50	Hz
Motor Besleme Gerilimi	230-400	V
Motor Devir Sayısı	1500	d/d
Motor Verimi	79.6	%
Koruma Sınıfı	IP55	-
Çalışma Şekli	S1	-
Verim Sınıfı	IE2	-
Redüktör Oranı	1:100	-
Redüktör Çeşidi	Sonsuz Vidalı	-
Redüktör-Kolektör Kol Uzunluğu (r)	15	cm

Çizelge 3.4'te parabolik oluk kolektöre hareketi sağlayacak olan AC asenkron motora ait parametreler verilmiştir. Bu bilgilere göre eksen motorunun gücü 0.75 kW çalışma gerilimi ise 230-400 V arasındadır. Bu gerilim değerleri motorun faz bağlantı çeşitlerine (yıldız, üçgen) ve sistemin ihtiyaç duyduğu tork değerine göre değişmektedir. Motorun eksen milinin (tahrik mili) dakikadaki tur sayısı ise 1500 d/d'dir. Ayrıca kullanılan motorun koruma sınıfı, toz ve suya karşı dayanıklı olması için IP55 olarak seçilmiştir. Parabolik oluk kolektör sistemleri için motor seçimi yapılırken motor torkunun kolektör ağırlığını taşıyabilmesine ve motor devir sayısının, sistemin güneşi takip edebileceği kadar hassas olmasına dikkat edilmelidir. Bu nedenle motor ve redüktör seçimi yapılmadan önce bazı hesaplar yapılmalıdır. İlk olarak motorun gerçek çıkış gücünün bulunması gerekmektedir. Denklem (3.16)'da motor gerçek güç çıkış formülü verilmiştir.

$$P_{\text{çıkış}} = P_{\text{giriş}} \eta_{\text{motor}} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da verilen $P_{\text{çıkış}}$, motorun gerçek güç çıkışını, $P_{\text{giriş}}$, motorun etiket güç değerini, η_{motor} ise motor verim değerini göstermektedir. Denklem (3.16) yardımı ile motor mekanik güç değeri hesaplandıktan sonra tork hesabı yapılmaktadır. Denklem (3.17)'de motor tork formülü verilmiştir.

$$T = \frac{P_{\text{çıkış}}}{2\pi n} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'de verilen T, motor tork değerini, n ise motor devir sayısını ifade etmektedir. Denklemde verilen motor torku redüktör dahil edilmeden elde ettiği tork değeridir. Bu nedenle motorun redüktör tarafından da kazandığı tork değerinin bulunması gerekmektedir. Redüktör, mekanik güç aktarım sistemlerinde kullanılan, genellikle iki veya daha fazla dişliden oluşan mekanik bir cihazdır. Temel işlevi, motorun ürettiği yüksek hızdaki (devir) gücünü, daha düşük hız ve daha yüksek torka dönüştürmektir. Redüktörler, belirli bir devir sayısında dönen bir motorun torkunu artırmak ve bu torku daha düşük bir hızda iletmek için kullanılmaktadırlar. Parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılan AC asenkron motorun devir sayısının yüksek, tork değerinin ise sistemin hareketini sağlamak için göreceli olarak düşük olmasından

kaynaklı motor mil çıkışında redüktör kullanılacaktır. Denklem (3.18)'de redüktör çıkış tork formülü verilmiştir.

$$T_{\text{redüktör}} = T I_{\text{redüktör}} \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'de verilen $T_{\text{redüktör}}$, redüktör çıkışında elde edilen tork kuvvetini, $I_{\text{redüktör}}$ ise redüktörün dönüştürme oranını ifade etmektedir. Bu denklemi kullanarak redüktör çıkış milinde elde edilen tork kuvveti (Nm) bulunmuş olmaktadır. Ancak destek kolu hesabı ile hareket sisteminin kaldırabileceği azami yük miktarının kg cinsinden bulunması gerekmektedir. Denklem (3.19)'da hareket sisteminin yük kapasite formülü verilmiştir.

$$F = \frac{T_{\text{redüktör}}}{r} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'da verilen F , sistemin ağırlık kuvvetini, r ise redüktör çıkışı ile kolektör rulman girişi arasındaki motor mil kol uzunluğunu ifade etmektedir. Yukarıdaki denklem yardımı ile hareket mekanizmasının yük kapasite kuvveti bulunmuştur. Bu bulunan değer Newton (N) cinsindendir. Bu değer Newton'dan kg cinsine dönüştürülmesi ise Denklem (3.20)'de verilen formül yardımı ile yapılmaktadır.

$$m = \frac{F}{g} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'de verilen m , motorun kg cinsinden kaldırabileceği ağırlığı, g ise yer çekimi kuvvetini ifade etmektedir. Yukarıda bulunan tork formülleri, Çizelge 3.4'te bulunan motor ve redüktör değerlerine göre hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Parabolik oluk kolektör motor tork çıkış parametre değerleri

Parametre	Değer	Birim
Motor Güç Girişi ($P_{giriş}$)	0.75	kW
Motor Güç Çıkışı ($P_{çıkış}$)	0.597	kW
Motor Mil Çıkış Torku (T)	3.8	Nm
Redüktör Mil Çıkış Torku ($T_{redüktör}$)	380	Nm
Motor Mil Kol Uzunluğu (r)	15	cm
Giriş Devir Sayısı	1500	d/d
Çıkış Devir Sayısı	15	d/d
Hareket Sistemi Yük (N) Kapasitesi (F)	2533	N
Hareket Sistemi Yük (kg) Kapasitesi (m)	258	kg
Yer Çekimi Sabiti (g)	9.81	m/s ²

Çizelge 3.5'te parabolik oluk kolektör için seçilen redüktör ve asenkron eksen motorunun çıkış parametreleri verilmiştir. Bu çıkış parametrelerine göre redüktör mil çıkışı devir sayısı 15 d/d, redüktör mil çıkış yük kapasitesi ise 258 kg olmaktadır. Motorun yatayda uygulayacağı 258 kg'lık bir yük kuvveti, parabolik oluk sisteminin kolektörünün zenit ekseninde kararlı bir şekilde dönmesini karşılayacaktır. Bu nedenle sistemde hesabı yapılan redüktör ve motorun kullanılması uygundur. Şekil 3.17'de AC asenkron motor ve redüktörü gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Parabolik oluk kolektör motor ve redüktörü

Şekil 3.17’de solda bulunan görselde AC asenkron motor ve redüktör bağlantısı, sağda bulunan görselde ise hareket sisteminin kolektöre olan bağlantısı gösterilmiştir. Çizelge 3.5’te verildiği gibi redüktörün çıkış mili kolektöre azami 258 kg’lık bir kuvvet uygulamaktadır. Bu sayede kolektör sistemi güneş takibi için döndürülmekte ve sistem kararlı bir şekilde çalışmaktadır. Şekil 3.18’de parabolik oluk kolektörün temel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Parabolik oluk kolektör temel yapısı

Şekil 3.18’de hesapları yapıp tasarlanan hareket mekanizmasının (motor-redüktör) parabolik oluk kolektör ile olan bağlantısı ve montajlanmış görseli verilmiştir. Hareket mekanizmasının montajı gerçekleştirildikten sonra parabolik oluk kolektör yansıtıcı aynaları ve bakır tüp alıcısının montajının yapılması gerekmektedir. Parabolik oluk kolektörün bakır alıcı tüp montajı için Çizelge 3.1’de verilen odak uzaklığı (65.33 cm) kadar yükseltme gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede sistem odağı, odak uzaklığı mesafesi kadar kaldırılacak ve bu mesafede sabitlenecektir. Şekil 3.19’da parabolik oluk kolektör alıcısı ve sabitleme kolları gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Parabolik oluk kolektör alıcı ve sabitleme kolu

Şekil 3.19’da gösterilen bakır tüp, parabolik sistem alıcısıdır. Bu alıcının odakta sabitlenmesi için vida ve somonlardan oluşan bir sabitleme mekanizması tasarlanmıştır. Bu mekanizma sayesinde alıcının odak noktası kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Sabitleme mekanizmasının kolektör gövdesine bağlantısı için ise “T” şeklinde metal profilden destek ayakları tasarlanmıştır. Bu destek ayakları kolektörün her iki yanında bulunmakta ve sabitleme mekanizmasının ağırlığını dengelemektedir. Şekil 3.20’de tasarlanan parabolik oluk kolektör sistemini gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Tasarlanan parabolik oluk kolektör sistemi

Şekil 3.20’de bütün parçaların (destek yapısı, yansıtıcı, alıcı tüp, hareket mekanizması) montajının tamamlanmış hali gösterilmektedir. Bu aşamadan sonra güneş takip kontrol algoritması referans alınarak yazılacak güneş takip sistem yazılımı elektronik kontrol sistemine yüklenerek sistemin ilk çalıştırılması gerçekleştirilecektir. İlk çalıştırma sırasında karşılaşılabilecek hatalar (elektronik, açısız) tespit edilerek bu hataların sebebi ve çözüm yolları aranacaktır.

3.1.3. Parabolik oluk kolektör güneş takip kontrol algoritması

Parabolik oluk kolektörler, güneş enerjisini verimli bir şekilde toplamak ve kullanmak için tasarlanmış yenilikçi sistemlerdir. Bu sistemler, güneş ışınlarını bir odak hattına yansıtmak için parabolik şekilli aynalar kullanır, bu sayede yüksek sıcaklıklara ulaşarak enerji üretiminde kullanılabilecek ısıyı toplarlar. Güneş takip kontrol algoritması, parabolik oluk kolektörlerin güneşi sürekli olarak takip ederek maksimum enerji verimliliği sağlamalarını amaçlamaktadır.

Parabolik oluk kolektörü, güneşin günlük ve mevsimsel hareketlerini takip etmek zorundadır. Bu nedenle, doğru bir güneş takip sistemi, kolektörlerin performansını olumlu açıdan etkilemektedir. Güneşin konumunu sürekli olarak izleyen ve kolektörlerin açısını ayarlayan bir takip algoritması, güneş ışınlarının her zaman en uygun açıyla yansıtılmasını sağlar. Bu, enerji üretiminde önemli ölçüde artışı ve sistemin genel verimliliğinde yükselişi sağlamaktadır.

Bu bölümde, tasarlanan parabolik oluk kolektörünün güneşi etkin bir şekilde takip edebilmesi için geliştirilen güneş takip kontrol algoritması ele alınacaktır. Algoritma, GPS verileri ve güneş konum hesaplamaları kullanarak, kolektörün dikey (zenith) ekseninde güneşi takip etmesini sağlamaktadır. Bu sayede, parabolik oluk kolektörü güneşi her an en verimli şekilde takip ederek maksimum enerji toplama kapasitesine ulaşmaktadır. Şekil B.1’de parabolik oluk kolektörün dikey ekseninde güneşi takip edebilmesi için tasarlanan güneş takip algoritması gösterilmiştir. Şekil B.1’de gösterilen güneş takip algoritması sistemin güneşi tek ekseninde (zenit) takip etmesi için tasarlanmıştır. Öncelikle sistem başlatıldığında GPS sensörünün aktif olup olmadığı kontrol edilmektedir. Bunu nedeni GPS sensörünün güneş açılarının hesabı için gerekli olan gerçek zamanlı saat, tarih ve konum verilerini vermesidir. Eğer GPS sensörü aktif

olmadan sistem algoritması güneş açılarını hesaplamaya başlar ise hesaplar yanlış olacaktır. Bu durum ise kolektörün yanlış bir şekilde konumlanmasına sebebiyet verecektir.

GPS Sensörü aktif edildikten sonra algoritma diğer bir kademe olan güneş açılarının hesaplanmasını gerçekleştirecektir. Bu hesaplama GPS sensöründen alınan veriler yardımıyla Arduino MEGA 2560 mikrodnetleyicisi tarafından yapılacaktır. Zenit açısı mikrodnetleyici tarafından hesaplandıktan sonra güneşin doğumu kontrol edilecektir. Eğer güneş doğmuş ise yani zenit 90 dereceden küçük ise sistem algoritması zenit referans ile hesaplanan zenit açısını karşılaştıracak ve fark açısını hesaplayacaktır.

Fark açısı sistemin en son döndüğü andaki açısı ile şu an hesaplanan açısı arasındaki fark olarak açıklanabilir. Sistem bu fark açısı kadar döndürülecektir. Eğer fark açısı 0 ise yani güneşin konumu değişmemiş ise sistem hareket etmeyecektir.

Son olarak sistemin güneşi takip ettiği sırada açısal bir sapma değeri oluştuğunda dönme ekseninde bulunan ve motorun açısal geri besleme görevini üstlenen döner enkoderlar sapma değerlerini mikrodnetleyiciye iletacaktır. İletilen bu sapma değeri bilgileri mikrodnetleyici tarafından işlenerek sistem kolektörünün açısal sapma değeri sıfırlanacak şekilde döndürülecektir. Bu sayede sistemin güneşi takibi sırasında açısal hataların önüne geçilerek sistem kararlılığı sağlanmış olacaktır.

Şekil B.1’de gösterilen parabolik oluk kolektör yazılım algoritmasına uygun olarak güneş takip yazılımı geliştirilmiştir. Güneş takip yazılımı tamamen özgün olmak üzere C dilinde geliştirilerek Arduino IDE üzerinden Arduino MEGA 2560 mikrodnetleyicisine yüklenmiştir.

Güneş takip sistemlerinde kullanılan takip algoritmalarının uygulanmasında Arduino platformu yaygın olarak tercih edilmektedir. Arduino, kullanıcı dostu yazılım ve donanım kombinasyonu sayesinde çeşitli projelerde esneklik ve kolaylık sağlamaktadır. Arduino yazılımı, temelde C/C++ programlama dillerine dayanır ve bu dillerin basitleştirilmiş bir versiyonunu kullanmaktadır. Bu, kullanıcıların daha az kod yazarak karmaşık işlemleri gerçekleştirmesine olanak tanır.

Yazılan güneş takip algoritmasının arduino kartına aktarımı ve kodların düzenlenip derlenmesi için Arduino IDE kullanılmaktadır. Arduino Integrated Development Environment (IDE), Arduino kartlarını programlamak için kullanılan resmi geliştirme ortamıdır. Arduino IDE, kullanıcıların kod yazmasını, derlemesini ve mikrodenetleyiciye yüklemesini sağlayan bir yazılım platformudur. Arduino IDE, basit bir metin düzenleyiciye sahiptir ve bu düzenleyici, kod yazarken ihtiyaç olunan derleme, hata ayıklama, kütüphane desteği vb. imkânları sunmaktadır.

Arduino programları, setup() ve loop() olmak üzere iki ana fonksiyondan oluşmaktadır. Bu fonksiyonlar, Arduino mikrodenetleyicinin davranışını tanımlayan ana kod bloklarıdır. Setup fonksiyonu loop fonksiyonundan önce gelmektedir. Bu fonksiyon yazılım aktif olduğunda bir kez çalıştırılmaktadır. Bu fonksiyon kapsamında; giriş çıkış pinleri ve seri haberleşme hız değer tanımlamaları yapılmaktadır. Loop fonksiyonu bir döngü fonksiyonudur ve sürekli tekrar eden işlemleri içermektedir. Bu fonksiyon, sensör verilerini okuma, motorları kontrol etme, güneş açılarının hesaplanması veya diğer sürekli işlemler için kullanılmaktadır.

Parabolik oluk kolektör yazılımı için öncelikli olarak elektronik kontrol birimi bölümünde verilen ve Arduino mikrodenetleyicisine bağlanan elektronik parçaların kütüphane tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Arduino kütüphaneleri, belirli donanım bileşenleri veya fonksiyonlar için önceden yazılmış kod bloklarıdır. Bu kütüphaneler, sistemde kullanılan elektronik bileşenlerin kullanımını kolaylaştırmaktadır. Parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımında seri haberleşme, matematiksel formül ve GPS kütüphaneleri kullanılmıştır. Bu kütüphanelerden seri haberleşme kütüphanesi, Arduino ile diğer elektronik bileşenler arasında seri haberleşmeyi sağlarken, matematiksel formül kütüphanesi güneş açılarının hesabında kullanılan matematiksel işlemlerin alt yapısını oluşturmaktadır. GPS kütüphanesi ise Arduino ile GPS sensörü arasındaki bağlantının sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesini ve GPS sensöründen alınan bilgilerin daha kolay elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil B.2’de parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımının başlangıç kodları gösterilmiştir. Şekil B.2’de ilk olarak kütüphane tanımlamaları yapılmıştır. Sonrasında parabolik oluk kolektör eksen motoruna ait olan ve sistemin güneşi takip etmesini sağlayan motor pin tanımlamaları yapılmıştır. Bu pin tanımlamalarına göre Arduinonun 46. dijital pini kolektörün aşağı yönlü hareketini, 47. pini ise kolektörünün

yukarı yönlü hareketini sağlayacaktır. Limit sensörleri ise kolektörün sınır anahtarlarıdır. Bu sınır anahtarları kolektörün aşırı dönmesini engellemesinin yanında ilk çalıştırma sırasında referans (ilk konum) bilgisini de sağlamaktadır.

Başlangıç tanımlamalarında son olarak GPS sensörüne ait pinlerin tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi GPS sensörünün R_X ve T_X olmak üzere iki adet seri haberleşme bacağı bulunmaktadır. Bu bacakların Arduino mikrodenetleyicisine bağlanması ve bu bağlanan bacakların pin tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. GPS sensörüne ait Rx ve Tx pinleri için Arduino üzerinde 51 ve 50 numaralı pinler tanımlanmıştır. Bu tanımlamaya göre GPS sensörüne ait Rx pini Arduino’nun 50 numaralı pinine, GPS sensörünün Tx pini ise Arduino’nun 51 numaralı pinine çapraz olarak bağlanacaktır. GPS sensörü, konum, hız ve zaman bilgilerini içeren verileri mikrodenetleyiciye veya diğer alıcı cihazlara iletmek için seri iletişim kullanmaktadır. Seri iletişimde, GPS sensörü ile mikrodenetleyici arasındaki veri iletim hızı baud hızı ile belirlenir. Baud hızı, sensörün seri portundan gönderilen veya alınan verilerin hızını tanımlamaktadır. GPS sensörü ile mikrodenetleyici arasındaki iletişimin sorunsuz çalışabilmesi için her iki cihazın baud hızlarının aynı olması gerekir. Eğer baud hızları uyumsuzsa, veri iletiminde hatalar meydana gelir ve doğru veri alınamaz. Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sisteminde kullanılan GPS sensörünün varsayılan seri haberleşme hızı 9600 bps’dir. Bu nedenle Şekil B.2’de seri haberleşme hızı 9600 bps olarak seçilmiştir.

Güneş takip yazılımı için başlangıç tanımlamaları yapıldıktan sonra setup fonksiyon tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Parabolik oluk kolektör yazılımının setup fonksiyonunda eksen motorunun çıkış pin tanımlamaları, motorun ilk konum parametresi ve sınır anahtarlarının giriş pin tanımlamaları yapılmıştır. Bu fonksiyon sistem aktif olduktan sonra bir kerelik çalışacak ve burada bulunan tanımlamalar değişmeyecektir.

Arduino yazılımında setup ve loop olmak üzere iki ana fonksiyon bulunmaktadır. Ancak yazılım kolaylığı açısından bu fonksiyonlara ek olarak sistemin ihtiyaç duyduğu başka fonksiyonlar oluşturulabilmektedir. Parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımında kullanılmak üzere bu fonksiyonlara ek olarak aşağıda maddeler halinde verilen fonksiyonlar tasarlanmıştır.

- Güneş Açısı Fonksiyonu
- Motor Kontrol Fonksiyonu
- Limit Anahtar Fonksiyonu
- Referans Fonksiyonu

Yukarıda verilen fonksiyonlar ana fonksiyonun (loop) daha okunabilir ve modüler olmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu sayede tasarlanan yazılımının düzenlenmesi gerektiğinde bütün kod bloğu yerine ilgili kod bloğunun düzenlenmesi yeterli olacaktır. Ayrıca ek fonksiyonlar ile kod tekrarı azalacak ve kodun düzenli olması sağlanmış olacaktır.

Motor kontrol fonksiyonu, parabolik oluk kolektör güneş takip sırasında eksen motorunun ileri ve geri hareketlerinin tanımlanması için tasarlanmış bir kod bloğudur. Bu blok sayesinde ana döngü (loop) içerisinde motor çalıştırma ve ayar komutlarının kolay bir şekilde çağırılması sağlanmaktadır. Limit anahtar fonksiyonunda ise parabolik oluk kolektörünün sınır nokta tanımlamaları ve bu sınır noktalarında güneş takip yazılımının nasıl davranış göstereceği tanımlanmaktadır.

Çalışmada kullanılan yazılım kapsamında bulunan referans fonksiyonu, sistemin eksenlerinin her sabah güneşi takip edecek şekilde başlangıç noktasını belirlemesini ve akşam güneş battıktan sonra sistemi bu başlangıç noktasına geri döndürmesini sağlamaktadır. Referans noktası, zenith ekseninde 90 derece olarak tanımlanmıştır. Sistem her sabah çalışmaya başladığında, güneş yükseklik açısı sıfır dereceden başlar ve yılın gününe bağlı olarak değişiklik göstererek yaklaşık 90 dereceye kadar yükselebilir. Referans fonksiyonu, güneşin konumuna göre kolektörün açısını doğru bir şekilde ayarlayarak sistemin optimum enerji toplama performansını sürdürmesini sağlar.

Güneş takip sistemlerinde, güneş açılarının doğru bir şekilde hesaplanması, sistemin etkin çalışması için kritik öneme sahiptir. Güneşin konumunu izlemek ve güneş ışınlarının doğru açıyla kolektöre yönlendirilmesini sağlamak için, güneş açılarının hesaplanması gereklidir. Bu hesaplamalar çift eksen güneş takip sistemlerinde güneşin

azimut ve zenit açılarını içerirken parabolik oluk kolektör gibi tek eksen sistemlerde genellikle zenit açısını içermektedir.

Güneş açıları, “solar_formul” adında bir fonksiyon içinde hesaplanarak sistemin ana fonksiyonuna entegre edilecektir. Bu fonksiyon, güneşin mevcut konumunu belirlemek için gerekli olan astronomik hesaplamaları içermektedir. Fonksiyon, güneşin günlük ve mevsimsel hareketlerine bağlı olarak değişen açıları hesaplayarak, güneş takip sisteminin verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır. Güneş açılarını doğru bir şekilde hesaplamak, güneş takip sistemlerinin verimli çalışması için hayati öneme sahiptir. Bu hesaplamalar, güneş ışınlarının her zaman en uygun açıda kolektöre yönlendirilmesini sağlamaktadır.

Güneş açı fonksiyonu kapsamında verilen deklinasyon, saat, güneş yükseklik ve zenit açıları hesaplanmaktadır. Şekil B.3'te parabolik oluk kolektör güneş açı fonksiyonu gösterilmiştir. Şekil B.3'te gösterilen güneş açı fonksiyonunda sa, saat açısını, dec, deklinasyon açısını, elevation, güneş yükseklik açısını, azi, azimut açısını, zenith ise referans konumunun zenit açısını ifade etmektedir. Fonksiyonda bulunan ve saat açısının hesaplanmasında kullanılan gps.time.hour ve gps.time.minute kodları, GPS kütüphanesine ait sabit ifadeler olup sırasıyla gerçek zamanlı saat ve dakika verilerine ulaşmayı sağlamaktadır.

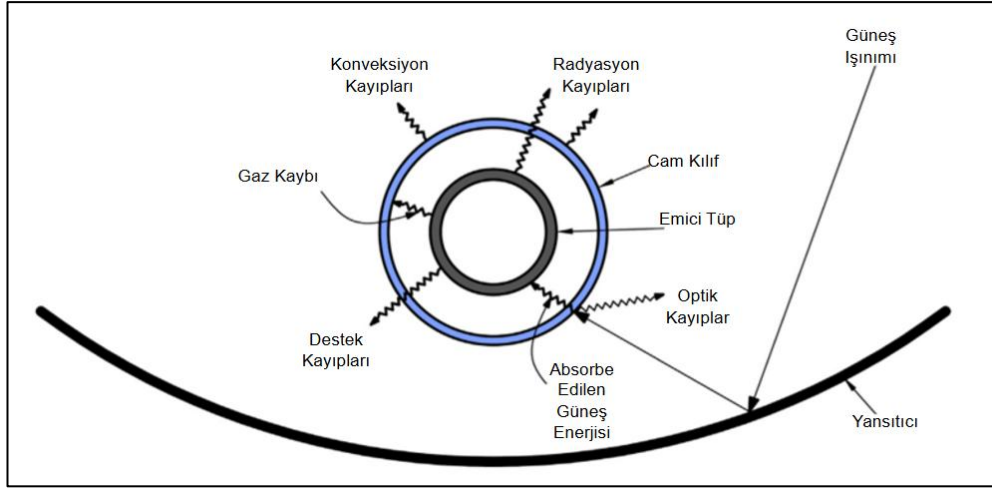
Güneş takibi için gerekli olan bütün fonksiyon tanımlamaları gerçekleştirildikten sonra ana (loop) fonksiyonu yazılabilir. Ana döngü fonksiyonu, parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sistemi çalıştığı sürece sonsuz döngü şeklinde sürekli olarak çalışmaktadır. Şekil B.4'te parabolik oluk kolektör ana (loop) döngü fonksiyonunun sadeleştirilmiş hali gösterilmiştir.

Şekil B.4'te gösterilen ana döngü fonksiyonuna daha önce tanımlanan limit, referans ve güneş açı fonksiyonları entegre edilmiştir. Buna göre döngü başladığında limit fonksiyonu ile sınır noktaları sisteme tanıtılmakta ve sonrasında güneş açı fonksiyonu tanımlanarak sistemin güneş açılarını hesaplaması sağlanmaktadır. Referans fonksiyonu ise bir if yapısı içerisinde tanımlanarak azimut açısı 300 dereceye eşit olduğunda sistem kolektörünü başlangıç konumuna getirmeyi sağlamaktadır. Bu kod satırında bu açının seçimi deney yapılan konum için güneş batımında azimut açısının

300 dereceye yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak bir diğer if yapısında güneş yükseklik açısı 0 ve 0'dan büyük olduğu durumlarda eksen motorunun ne kadar süre çalıştırılması gerektiği hesaplanmaktadır. Burada bulunan $elevation_fark$, şu anki (hesaplanan) güneş yükseklik açısı ile ilk çalıştırma esnasındaki güneş yükseklik açısının farkını ifade etmektedir. Sonrasında güneş yükseklik referans açısı son konuma getirilmek adına fark açısı ile toplanmaktadır. Bu sayede sistemin en son çalışması sonucunda geldiği güneş yükseklik açısı, referans değişkenine atanmış olmaktadır. Güneş yükseklik zamanı ile de eksen motorunun dönmesi gereken süre hesaplanmakta ve bu hesaplanan süre motor sürücüyeye gönderilerek motor çalıştırılmaktadır. Bu sayede parabolik oluk kolektör sistemi güneşi dik bir açı ile azami kararlılık ve asgari hata payı ile takip etmektedir.

3.1.4. Parabolik oluk kolektör ısı hesapları

Parabolik oluk kolektörler (PTC), güneş enerjisi uygulamalarında yüksek verimlilikle termal enerji dönüşümünü mümkün kılan ileri teknoloji sistemleridir. Bu sistemler, odaklayıcı reflektörler aracılığıyla güneş ışığını lineer bir alıcı tüpe yönlendirerek termal akışkanı ısıtır ve elde edilen termal enerjiyi çeşitli uygulamalarda kullanıma sunmaktadır. PTC'lerin termal performansını belirlemek, güneş ışıının etkin toplanması ve iletilen enerjinin verimli kullanımı açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, termal ısı hesabı, parabolik oluk kolektörlerinin optik verimlilik, ısı transfer mekanizmaları ve termal kayıpların detaylı analizi üzerinden gerçekleştirilir. Şekil 3.21'de parabolik oluk kolektör ve alıcısının termal kayıpları gösterilmiştir (Yılmaz ve Mwesigye, 2018).



Şekil 3.21. Parabolik oluk kolektör alıcısı ısı kayıpları (Yılmaz ve Mwesigye, 2018)

Şekil 3.21’de parabolik oluk kolektör lineer alıcısının yan kesit üzerinden termal kayıpları gösterilmiştir. Parabolik oluk kolektör alıcısında başlıca konveksiyon, rüzgâr, radyasyon, destek alan ve vakum gaz kayıpları bulunmaktadır. Parabolik oluk kolektör termal hesaplarında bu ısı kayıplarının hesaplanması büyük öneme sahiptir.

Parabolik oluk kolektörlerin (PTC) termal performansını belirleyen parametrelerin başında ısı kayıp katsayısı (U_L) gelmektedir. Isı kayıp katsayısı (U_L), alıcı tüpün çevresine olan toplam ısı kayıp katsayısını temsil etmekte ve genel olarak radyasyon, konveksiyon ve iletim kayıplarını içermektedir. Denklem (3.21)’de ısı kayıp katsayısının genel formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)’de verilen h_w , rüzgâr kaynaklı konveksiyon ısı transfer katsayısını, h_r , radyasyon ısı transfer katsayısını, h_c ise alıcı tüp yüzeyinden çevreye olan doğal veya zorlanmış konveksiyon yoluyla ısı kayıp katsayısını ifade etmektedir. Isı kayıp katsayısını (U_L) bulmak adına öncelikle rüzgâr kaynaklı konveksiyon ısı transfer katsayısı hesaplanmalıdır. Rüzgâr kayıplarının hesaplanması için Reynolds (Re) sayısının bilinmesi gerekmektedir. Denklem (3.22)’de Reynolds sayısının formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$Re = \rho_{air} V D_g / \mu \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'de verilen ρ_{air} , hava özkütlesini, V , havanın hızını, D_g , alıcı tüp cam kaplama çapını, μ ise havanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Reynold sayısı hesaplandıktan sonra rüzgâr ısı kayıp katsayı değerinin hesaplanması için Nusselt (Nu) sayısının bulunması gerekmektedir. Denklem (3.23) ve Denklem (3.24)'te Nusselt (Nu) sayısının farklı Reynolds aralıklarında olan formülleri verilmiştir (Kalogirou, 2009).

Eğer, $0.1 < Re < 1000$,

$$Nu = 0.4 + 0.54(Re)^{0.52} \quad (3.23)$$

Eğer, $1000 < Re < 50000$,

$$Nu = 0.3(Re)^{0.6} \quad (3.24)$$

Denklem (3.23) ve Denklem (3.24)'te verilen formüller yardımı ile Nusselt sayısı bulunduktan sonra artık h_w bulunabilir. Rüzgâr ısı kayıp katsayı değerinin formülü Denklem (3.25)'te verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$h_w = h_{c, c-a} = Nu.k/D_g \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'te verilen k , havanın ısı iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. Rüzgâr kayıp katsayısının hesaplanması sonrasında cam kaplama ile ortam arasındaki radyasyon ısı iletim katsayısını ($h_{r, c-a}$) hesaplamamız gerekmektedir. Denklem (3.26)'da cam kaplama ve ortam arasındaki ($h_{r, c-a}$) radyasyon ısı iletim katsayısının formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$h_{r, c-a} = \epsilon_g \sigma_{sb} (T_g + T_a) (T_g^2 + T_a^2) \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'da verilen ϵ_g , cam kaplamanın emisyon katsayısını, σ_{sb} , Stefan-Boltzmann sabitini, T_g , cam kaplamanın Kelvin cinsinden değerini, T_a ise ortam sıcaklığının Kelvin cinsinden değerini ifade etmektedir. Cam kaplama ile ortam arasındaki radyasyon ısı iletim katsayısı bulunduktan sonra alıcı tüp ile cam kaplama

arasındaki radyasyon ısı iletim katsayısının bulunması gerekmektedir. Alıcı tüp ile cam kaplama ısı iletim katsayısı ($h_{r, r-c}$) Denklem (3.27)'de verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$h_{r, r-c} = \frac{\sigma_{sb}(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_g}\left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1\right)} \quad (3.27)$$

Denklem (3.27)'de verilen T_r , alıcı tüp sıcaklığını, ε_r , alıcı tüp emisyon katsayısını, A_r , alıcı tüp alanını, A_g ise cam tüpün alanını ifade etmektedir. Denklem (3.28)'de alıcı tüp alan (A_r) formülü verilmiştir.

$$A_r = \pi D_o L \quad (3.28)$$

Denklem (3.28)'de verilen D_o , alıcı dış çapını ifade etmektedir. Bu hesap yapıldıktan sonra alıcının cam tüp alanının bulunması gerekmektedir. Denklem (3.29)'da alıcı cam kaplama alanı formülü verilmiştir.

$$A_g = \pi D_g L \quad (3.29)$$

Denklem (3.29)'da verilen D_g , alıcı cam kaplamasının dış çapını ifade etmektedir. Yukarıda verilen formüllerden yola çıkarak toplam ısı kayıp katsayısı bulunabilir. Toplam ısı kayıp katsayısı (U_L) formülü Denklem (3.30)'da verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r, c-a})A_g} + \frac{1}{h_{r, r-c}} \right]^{-1} \quad (3.30)$$

Denklem (3.30)'da verilen formül parabolik oluk kolektörlerde alıcı tüpün toplam ısı kayıp katsayısını (U_L) hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu formül, hem rüzgâr ve radyasyon kaynaklı kayıpları hem de alıcı tüp ile cam kaplama arasındaki ısı transferini dikkate almaktadır.

Denklem (3.26) ve Denklem (3.27)'de verilen alıcı cam kaplama sıcaklığı (T_g) deney sırasında ölçülmektedir. Ancak teorik olarak hesaplanması da mümkündür. Denklem

(3.27)'de verilen formül üzerinden bu değer çekildiğinde alıcı cam kaplama sıcaklığı formülü elde edilmiş olmaktadır. Bu formül Denklem (3.31)'de verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_g (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_g (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'de verilen formül yardımıyla cam kaplama sıcaklığı hesaplandıktan sonra sistemin toplam ısı transfer katsayısının (U_o) hesaplanması gerekmektedir. Toplam ısı transfer katsayısı (U_o), hem alıcı tüpün içinden geçen akışkan ile olan ısı transferini hem de alıcı tüpün dış yüzeyi ile olan ısı transferini kapsamaktadır. Ortalama ısı transfer katsayısı formülü Denklem (3.32)'de verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$U_o = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right]^{-1} \quad (3.32)$$

Denklem (3.32)'de verilen formülde h_{fi} , alıcı tüpün içindeki konveksiyon ısı transfer katsayısını, D_i , alıcı tüpün iç çapını, k ise alıcı tüp malzemesinin termal iletkenliğini ifade etmektedir. Denklem (3.32)'de verilen h_{fi} ifadesinin hesaplanması Denklem (3.33)'te verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$h_{fi} = \frac{Nu k_f}{D_i} \quad (3.33)$$

Denklem (3.33)'te verilen Nu , boru içi akışın Nusselt sayısını, k_f ise boru içi akışkanın termal iletkenliğini ifade etmektedir. Akışkanın Nusselt sayısının formülü Denklem (3.34)'te verilmiştir.

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \quad (3.34)$$

Denklem (3.34)'te verilen Reynold sayısı akışkana ait bir sabiteyi, Prandtl (Pr) ise akışkanın termal difüzyon oranını viskoziteye oranlayan bir sabiteyi ifade etmektedir. Prandtl (Pr) sayısının formülü Denklem (3.35)'te verilmiştir.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_f} \quad (3.35)$$

Denklem (3.35)'te verilen c_p , akışkanın özgül ısısını ifade etmektedir. Bu kayıp katsayılarının yanında diğer bir kayıp ise vakum tüp içinde olan ısı kayıplarıdır. Alıcı tüp ve cam kaplama arasında serbest moleküler konveksiyon yoluyla ısı transferi gerçekleşmektedir. Vakum tüp kayıp katsayı ($h_{c,r-c}$) formülü Denklem (3.36)'da verilmiştir (Ratzel vd., 1979).

$$h_{c,r-c} = \frac{k_{std}}{D_r} \quad (3.36)$$

Bu hesaplamalar sonrasında kolektör verim faktörü (F') hesaplanacaktır. Kolektör verim faktörü (F') formülü Denklem (3.37)'de verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} = \frac{U_o}{U_L} \quad (3.37)$$

Kolektör verim faktörü hesaplandıktan sonra ısı değişim faktörü (F_R) hesaplanmaktadır. Kolektör ısı değişim faktörü akışkanın kolektördeki ısıyı ne kadar verimli taşıdığını gösterir. Yüksek bir F_R değeri, sistemin ısı taşınımında daha verimli olduğunu ifade etmektedir. Denklem (3.38)'de ısı değişim faktör formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_r}{\dot{m} c_p} \right) \right] \quad (3.38)$$

Denklem (3.38)'de verilen formülde bulunan $\dot{m}$, akışkanın kütleli debisini, A_r ise alıcı yüzey alanını ifade etmektedir. Bütün parametrelerin hesabı yapıldıktan sonra parabolik oluk kolektör sisteminin ürettiği ısı miktarı hesaplanmalıdır. Yararlı ısı (Q_u) formülü Denklem (3.39)'da verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$Q_u = F_R S A_a - A_r U_L (T_i - T_a) \quad (3.39)$$

Denklem (3.39)'da bulunan A_a , kolektörün güneşi topladığı alanını, A_r , Alıcı tüpün yüzey alanını, S , kolektör yüzeyine gelen güneş ışıyım miktarını, T_i , su giriş sıcaklığını, T_a ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

3.2. Parabolik Çanak Kolektör Sistemi

Parabolik çanak sistemleri, güneş enerjisini yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklar elde etmeyi amaçlayan gelişmiş bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkan güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Parabolik çanak sistemi, adını aldığı parabolik şekilli bir yansıtıcı yüzey kullanarak güneş ışınlarını belirli bir noktaya, yani odak noktasına yönlendirir. Bu odak noktasında yer alan alıcı, güneşten gelen ışınların enerjisini toplar ve bu enerjiyi termal enerjiye dönüştürerek çeşitli amaçlarla kullanıma sunar.

Parabolik çanak sistemleri, diğer güneş yoğunlaştırma teknolojileri ile kıyaslandığında yüksek verimliliği ve modüler yapısı ile dikkat çeker. Ancak, bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için güneş ışığının yoğun ve sürekli olduğu bölgelerde kurulması gerekir. Ayrıca, güneşi gün boyunca izleyebilen hareketli mekanizmalar da sistemin bir parçasıdır, bu da ek maliyet ve karmaşıklık anlamına gelir. Bununla birlikte, yüksek maliyet ve karmaşıklık gibi zorluklar, parabolik çanak sistemlerinin sağladığı yüksek enerji verimliliği ve temiz enerji üretim potansiyeli göz önüne alındığında, uzun vadede dezavantajlarını dengelemektedir. Bu sistemler, özellikle fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek isteyen ülkeler ve endüstriler için ideal bir yenilenebilir enerji çözümü olarak önem kazanmaktadır.

3.2.1. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol sistemi

Parabolik çanak sistemleri, güneş ışığını bir noktada yoğunlaştırarak yüksek sıcaklıklara ulaşabilen ve bu sıcaklıkları enerji üretimi için kullanan sistemlerdir. Bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için güneş ışığını sürekli olarak doğru bir şekilde odaklayabilmeleri gerekmektedir. Bu noktada, elektronik kontrol sistemleri devreye girmektedir.

Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol sisteminde verildiği üzere parabolik çanak elektronik kontrol sistemi de aynı prensip ve parçalar ile çalışmaktadır. Bunun nedeni güneş takip sisteminin çalışma mantığının aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Özetle parabolik çanak elektronik kontrol sistemi aşağıda bulunan parçaları içermektedir.

- Mikrodenetleyici (Arduino MEGA 2560)
- GPS Sensörü
- VFD Sürücü (Değişken Frekanslı Sürücü)
- 4 Kanal Röle Modülü
- Elektrik Motorları
- Döner Enkoder
- Sınır Anahtarları
- Yazılım (Güneş Takip Yazılımı)

Yukarıda verilen kontrol sistem elemanlarından Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyici, tüm sistemi yönetir ve sensörlerden gelen verileri işleyerek motorları ve diğer bileşenleri kontrol eder. GPS sensörü, sistemin dünya üzerindeki tam konumunu belirler ve güneşin konumunu doğru bir şekilde izlemeyi sağlar. VFD (Değişken Frekanslı Sürücü), elektrik motorlarının hızını ve torkunu kontrol ederek çanağın hassas hareket etmesini sağlar. 4 Kanal Röle Modülü, yüksek güçlü cihazların mikrodenetleyici tarafından kontrol edilmesini sağlar ve motorlar gibi büyük bileşenlerin açılıp kapanmasını yönetir. Elektrik motorları, çanağın hareket etmesi için gerekli fiziksel gücü sağlar ve güneşi izlemek için kullanılır. Döner enkoder, motorların açısını hassas bir şekilde ölçer ve geri besleme sağlayarak doğru konumlandırma yapar. Sınır anahtarları, çanağın hareket sınırlarını belirler ve aşırı hareketi önleyerek güvenliği sağlar. Son olarak, güneş takip yazılımı, güneşin konumunu tahmin eder ve çanağın güneşi sürekli olarak en iyi şekilde takip etmesini sağlamaktadır.

Parabolik çanak sistemi ile parabolik oluk kolektör sisteminin elektronik kontrol sistemi benzerlik gösterebilir. Oluk kolektörün tek eksen, çanak kolektörün ise çift eksen güneş takibi yapmasından dolayı parça adetlerinde farklılıklar olmaktadır. Parabolik oluk kolektörde kullanılan redüktör ve elektrik motoru sayısı 1 iken çanak kolektörde

azimut ve zenit eksen takibi için kullanılan redüktör ve motor sayısı 2 olmaktadır. Parabolik çanak kolektörün 2 adet motorunun kontrolü için herbir motora ait değişken frekanslı sürücü bulundurması gerekmektedir. Parabolik oluk kolektörün tek eksen açısı geri beslemesi için kullanılan döner enkoder ise çift eksenli çanak kolektörde 2 adet kullanılmaktadır. Son olarak oluk kolektörlerin sınır birimlerinin tespiti için 2 adet sınır anahtarı kullanılırken parabolik çanak kolektörlerde bu sayı her eksen için 2 adet olmak üzere toplamda 4 adet kullanılmaktadır. Şekil A.2’de parabolik çanak sistemine ait elektronik kontrol devre şeması gösterilmiştir. Şekil A.2’de gösterilen parabolik çanak elektronik kontrol sistemi, Arduino Mega 2560 mikrodenetleyicisi etrafında tasarlanmış bir yapıdır ve parabolik çanağın hareketini hassas bir şekilde kontrol etmek için çeşitli bileşenler kullanır. Sistem, GPS modülü sayesinde dünya üzerindeki konum bilgisini alır ve bu bilgiye göre çanağın güneşi en iyi şekilde takip etmesini sağlar. Sınır anahtarları, çanağın hareket sınırlarını belirleyerek aşırı hareketi önler ve güvenli çalışma sağlar. 4 kanal röle modülü, elektrik motorlarının kontrolünü sağlar; bu motorlar, çanağın doğu-batı ve yukarı-aşağı yönlerinde hareket etmesini mümkün kılar. VFD (Değişken Frekanslı Sürücü) ise motorların hızını ve yönünü kontrol ederek çanağın hassas pozisyon almasını sağlar. Tüm bu bileşenler, Arduino'nun merkezi kontrolü altında, güneşin gün boyunca doğru bir şekilde izlenmesini ve maksimum enerji verimi elde edilmesini sağlamaktadır.

3.2.2. Parabolik çanak kolektörün mekanik tasarımı

Parabolik çanak sistemlerinin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi, büyük ölçüde mekanik tasarımın kalitesine bağlıdır. Mekanik tasarım, çanağın yapısal dayanıklılığı, güneş ışığını doğru bir şekilde odaklama kabiliyeti ve sistemin uzun ömürlülüğünü belirleyen kritik bir faktördür. Çanağın geometrisinin hassasiyeti, odaklanmış ışığın istenilen sıcaklıkta toplanmasını sağlar. Ayrıca, çanağın çevresel koşullara dayanıklılığı, özellikle rüzgâr yükleri ve termal genleşme gibi faktörlere karşı stabil kalması, mekanik tasarımın önemini daha da artırmaktadır. Doğru bir mekanik tasarım, sistemin bakım maliyetlerini düşürerek uzun vadede ekonomik sürdürülebilirliğini de garanti altına alır.

Bu bölümde, parabolik çanak sistemlerinin mekanik tasarımına dair detaylı bir inceleme yapılacaktır. Öncelikle, çanak yüzeyinin geometrisi ve bu yüzeyin güneş

ışığını odaklama prensipleri ele alınacak, ardından destek yapıların tasarımı ve stabilitesi üzerinde durulacaktır. Hareket mekanizmaları, malzeme seçimi ve imalat süreçleri gibi konular da kapsamlı bir şekilde incelenecek ve parabolik çanak sistemlerinin mekanik tasarımının tüm yönleriyle ortaya konulması sağlanacaktır. Bu tasarımın doğruluğu, sistemin genel performansı ve uzun vadeli güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

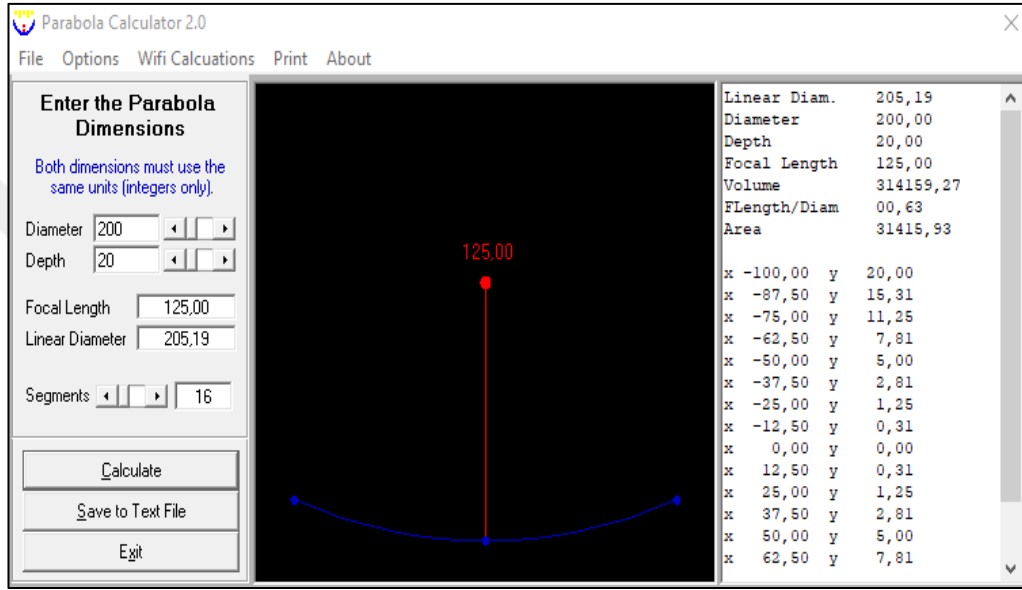
3.2.2.1. Parabolik çanak kolektör tasarım ilkeleri

Parabolik çanak sistemleri, güneş enerjisinin yoğunlaştırılarak termal enerjiye dönüştürülmesinde kullanılan ileri teknolojik uygulamalardan biridir. Bu sistemler, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren termal uygulamalar ve güneş enerjisiyle elektrik üretimi için idealdir. Parabolik çanak kolektörleri, konkav bir parabolik yansıtıcı yüzey kullanarak güneş ışınlarını tek bir odak noktasına toplar. Bu odak noktasında yer alan alıcı ise toplanan güneş enerjisini emerek yüksek sıcaklıklara ulaşır ve bu enerji, genellikle Stirling motorları veya termal elektrik jeneratörleri gibi sistemlerde elektrik üretimi için kullanılır.

Kolektör tasarımı, parabolik çanak sistemlerinin performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Tasarımda yapılacak küçük bir hata bile, sistemin verimliliğinde ciddi kayıplara yol açabilir. Bu nedenle, kolektör tasarımının geometrik doğruluğu, malzeme seçimi, optik verimlilik ve çevresel dayanıklılık gibi birçok parametre dikkatlice ele alınmalıdır. Kolektörün verimli çalışabilmesi için yansıtıcı yüzeyin parabolik geometrisinin mükemmel bir şekilde korunması, güneş ışınlarının odak noktasına doğru bir şekilde yönlendirilmesi ve sistemin tüm bileşenlerinin uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir.

Parabolik çanak sistemlerinin verimli çalışabilmesi için, parabolik yüzeyin geometrisi büyük bir hassasiyetle tasarlanmalıdır. Parabolik yüzey, yansıyan ışınların odak noktasında toplanmasını sağlayan özel bir geometriye sahiptir. Matematiksel olarak parabol, bir düzlemde bir noktaya (odak) ve bir doğruya olan mesafeleri eşit olan noktaların oluşturduğu eğridir. Parabolik yüzeyin iki boyutlu matematiksel ifadesi Denklem (3.4)'te verilmiştir. Parabolik çanağın üç boyutlu modeli ise bu geometrinin bir eksen etrafında döndürülerek parabolik bir yüzey elde edilmesi ile sağlanmaktadır.

Parabolik çanağın bu matematiksel modeli sayesinde güneş ışınlarının doğru bir şekilde odaklanmasını sağlamak ve enerjinin azami verimlilikle toplanmasına olanak tanımaktadır. Kısacası parabolik oluk kolektör tasarımında kullanılan teknik ve formüller parabolik çanak sistemi içinde aynı olmaktadır. Öncesinde verilen tasarım formülleri temel alınarak parabolik çanak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22’de parabolik çanak sistem kolektörünün tasarım parametreleri gösterilmiştir (ParabolaCalc, 2023).



Şekil 3.22. Parabolik çanak kolektörü tasarım parametreleri (ParabolaCalc, 2023)

Şekil 3.22’de gösterilen parabolik yüzeyin açıklığı 2 metre, parabol yüksekliği (derinliği) ise 0.2 metre olarak belirlenmiştir. Bu tasarım kriterlerine göre parabolik çanak kolektörün odak uzunluğu (mesafesi) 1.25 metre olmaktadır. Tasarlanan sistem boyutsal anlamda endüstriyel muadillerine göre daha küçüktür. Bunun nedeni tasarlanan parabolik çanak kolektörün çalışma özelinde kullanılacak olmasıdır. Çizelge 3.6’da tasarlanan parabolik çanak kolektöre ait matematiksel modelleme, geometrik hesaplar ve verim analizleri verilmiştir. Verilen bu sonuçlar öncesinde verilen denklemlere göre hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6. Parabolik çanak kolektör tasarım parametreleri

Parametreler	Değer	Birim
Parabol Açıklığı (a)	2	m
Parabol Açıklık Alanı (A)	3.14	m ²
Alıcı Çapı	0.3	m
Alıcı Alanı (A _r)	0.071	m ²
Parabol Derinliği (h _p)	0.2	m
Parabol Odak Uzaklığı (f)	1.25	m
Parabol Yoğunlaştırma Oranı (C)	44	-
Yansıtıcılık Katsayısı (ρ)	0.85	-
Absorpsiyon katsayısı (α)	0.9	-
Geçirgenlik katsayısı (τ)	0.9	-
Rim Açısı (φ _r)	21.8	°
Açıklık Alan Kaybı (A _e)	0.071	m ²
Blokaj ve Gölgeleme Kayıpları (A _b)	0.05	m ²
Toplam Kayıp Alan (A _l)	0.121	m ²
Geometrik Faktör (A _f)	0.038	-

Çizelge 3.6’da verilen değerler sırasıyla incelenirse, parabol açıklığı yardımı ile parabol açıklık alanı (A) 3.14 m² bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 3.22’de gösterilen odak uzaklığı 1.25 m, parabol derinliği 20 cm olan parabolik yüzey elde edilmektedir. Şekil 3.23’te geliştirilen parabolik çanak kolektörün yansıtıcı parabolik yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Parabolik çanak kolektörü yansıtıcı yüzeyi

Şekil 3.23'te gösterilen parabolik oluk kolektörün yansıtıcı yüzeyi krom-nikel kaplama saclardan imal edilmiş olup, sac kalınlığı 1 mm'dir. Yansıtıcı kaplamanın yansıtıcılık katsayısı 0.85'tir. Kolektör yansıtıcısı üzerine gelen güneş ışınımını odak noktasında bulunan alıcıya noktasal olarak odaklamaktadır.

3.2.2.2. Parabolik çanak kolektör alıcıları

Parabolik çanak sistemleri, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) teknolojilerinin en gelişmiş ve etkili biçimlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler, güneş enerjisinin yüksek sıcaklıklara dönüştürülmesi için parabolik bir yansıtıcı yüzey kullanarak güneş ışınlarını tek bir odak noktasında toplar. Bu yoğunlaştırılmış enerji, odak noktasında bulunan alıcılar tarafından emilir ve ısı enerjisine dönüştürülür. Elde edilen ısı enerjisi, genellikle elektrik üretimi veya endüstriyel süreçlerde kullanılmak üzere depolanır veya doğrudan kullanılır. Parabolik çanak sistemlerinin verimliliği, büyük ölçüde bu enerji dönüşüm sürecinde kritik bir rol oynayan alıcıların tasarımına, malzemesine ve işlevselliğine bağlıdır.

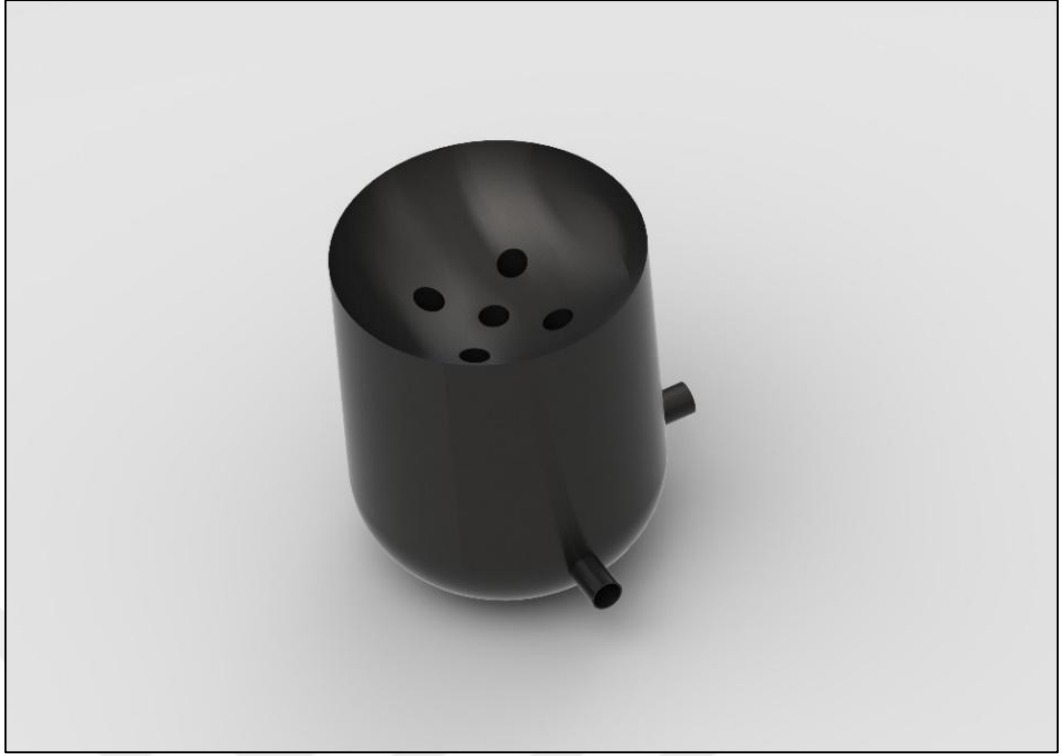
Güneş enerjisinin sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak benimsenmesi, fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak ve küresel enerji talebine yanıt vermek için giderek daha önemli hale gelmiştir. Parabolik çanak sistemleri, bu alanda büyük bir potansiyele sahiptir çünkü diğer CSP teknolojilerine kıyasla daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilirler. Bu yüksek sıcaklıklar, sistemin genel enerji dönüşüm verimliliğini artırarak daha fazla elektrik üretimine olanak tanır. Ancak, bu tür bir sistemin başarısı, güneş ışığını en etkili şekilde toplayan ve dönüştüren alıcının kalitesine ve performansına bağlıdır.

Parabolik çanak sistem alıcıları, odak noktasında yoğunlaştırılmış güneş ışığını toplayarak bu enerjiyi ısıya dönüştüren bileşenlerdir. Alıcıların etkinliği, sistemin genel verimliliğini doğrudan etkilediğinden, bu bileşenlerin tasarımı ve malzeme seçimi büyük önem taşır. Alıcılar, genellikle çok yüksek sıcaklıklara maruz kalır ve bu nedenle termal dayanıklılığı yüksek malzemelerden yapılmalı gereklidir. Ayrıca, alıcıların yüzey özellikleri, özellikle yansıtıcılık ve absorpsiyon katsayıları, enerji kayıplarını minimize etmek ve maksimum enerji toplamak için optimize edilmelidir.

Bu bağlamda, parabolik çanak sistem alıcıları üzerine yapılan araştırmalar, bu bileşenlerin performansını artırmaya yönelik yenilikçi malzemeler, geometrik tasarımlar ve uygulama teknikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Alıcıların etkinliğini artırmak, yalnızca sistemin verimliliğini yükseltmekle kalmaz, aynı zamanda maliyet etkinliği ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından da kritik bir rol oynar.

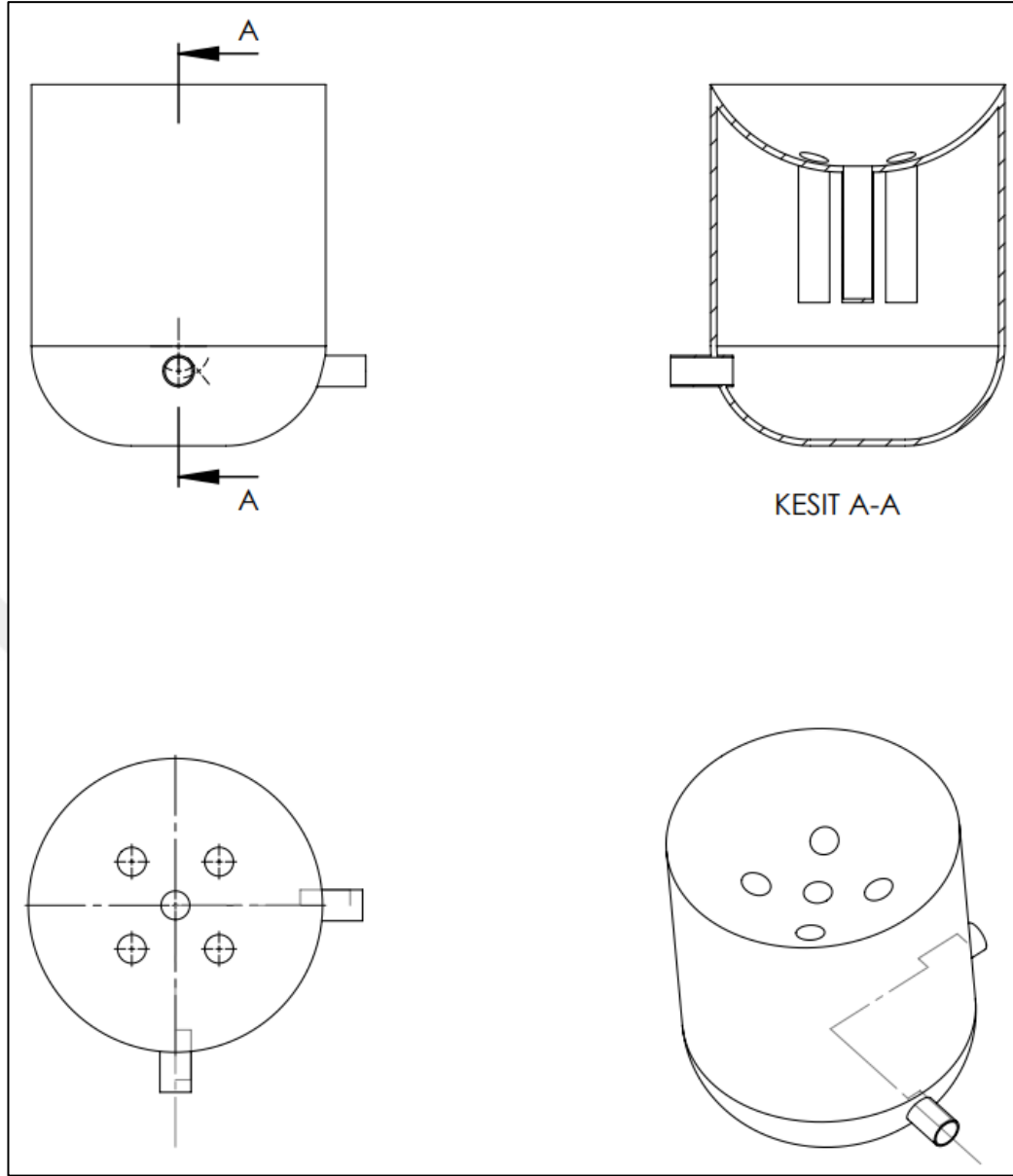
Alıcı tasarımında dikkate alınması gereken birkaç kritik faktör vardır. Öncelikle, alıcının geometrik şekli ve boyutları, güneş ışığını en verimli şekilde toplayacak şekilde optimize edilmelidir. Alıcı yüzeyinin emilim kapasitesi, yani absorpsiyon katsayısı (α), sistemin genel verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Ayrıca, alıcının yüzey sıcaklığına dayanıklı olması ve uzun ömürlü malzemelerden yapılmış olması gerekir. Bunun yanı sıra, alıcının etrafında bir ısı yalıtım sistemi bulunmalıdır. Isı kayıplarını minimize etmek için alıcının yalıtımı, çevresel koşullardan (örneğin rüzgâr, düşük dış sıcaklık) etkilenmemelidir. Alıcı verimliliği, aynı zamanda optik kayıpların minimize edilmesiyle de artırılabilir. Bu bağlamda, yansıtıcılık katsayısı (ρ) yüksek malzemeler kullanmak, ışığın odak noktasına tam olarak yönlendirilmesine yardımcı olmaktadır.

Parabolik çanak kolektör sistemi için kaviteli tüp, kavitesiz tüp ve konik bakır spiral olmak üzere 3 farklı alıcı tasarımı yapılmıştır. Kaviteli tüp alıcı, parabolik çanak kolektör sistemlerinde güneş enerjisinin toplanması ve ısıya dönüştürülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu alıcı, enerjinin verimli bir şekilde absorbe edilmesi için özel olarak tasarlanan iç oyuk bir yapıya sahiptir. İç yüzeyin kavite şeklinde düzenlenmiş olması gelen güneş ışınlarının birden fazla yansıma yapmasını sağlamak ve bu yansımalar sonucunda enerji daha etkin bir şekilde emilmektedir. Şekil 3.24'te parabolik çanak kolektör kaviteli tüp alıcısı gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Kaviteli tüp alıcı 3 boyut çizimi

Şekil 3.24'te gösterilen kaviteli tüp alıcısında ısı transfer yüzeyleri geniş bir alan kaplamakta ve bu alan, ışığın maksimum düzeyde absorbe edilmesi için optimize edilmektedir. Kavite içerisine yerleştirilen tüpler, ısıyı absorbe eden ve transfer eden unsurlar olarak işlev görmektedir. Bu tüpler, kavite içerisinde belirli bir düzene yerleştirilmekte ve böylece akışkanın geçtiği yollar üzerinden enerji transferi sağlanmaktadır. Şekil 3.25'te kaviteli tüp alıcısına ait teknik çizimler gösterilmiştir.



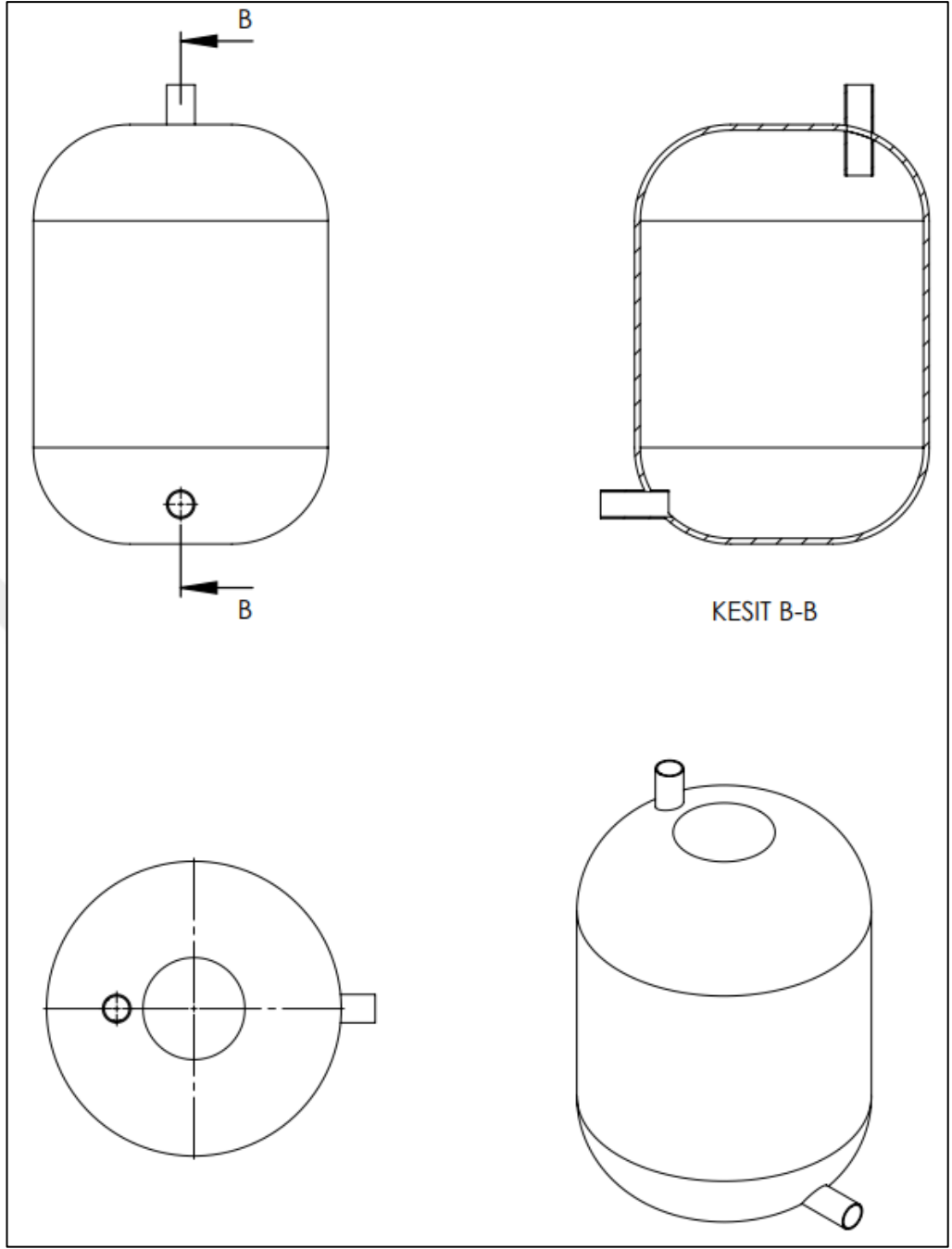
Şekil 3.25. Kaviteli tüp alıcı teknik çizimi

Parabolik çanak kolektörünün diğer bir alıcısı olan kavitesiz tüp alıcısı, düz ve silindirik bir yapıdan oluşur. Bu yapı, üretim açısından basitliği ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. Akışkanın tüp içerisinde düzgün bir şekilde hareket etmesini sağlayan bu yapı, ısıнын akışkana doğrudan aktarılmasına olanak tanımaktadır. Normal tüp alıcılar, basit ve ekonomik bir çözüm sunarken, enerji verimliliği açısından belirli sınırlamalara sahiptir. Yüzey alanının sınırlı olması nedeniyle, ışığın absorpsiyonu kaviteli tüp veya konik alıcılara göre daha düşük olabilmektedir. Şekil 3.26’da kavitesiz tüp alıcısı gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Kavitesiz t p alıcı 3 boyut çizimi

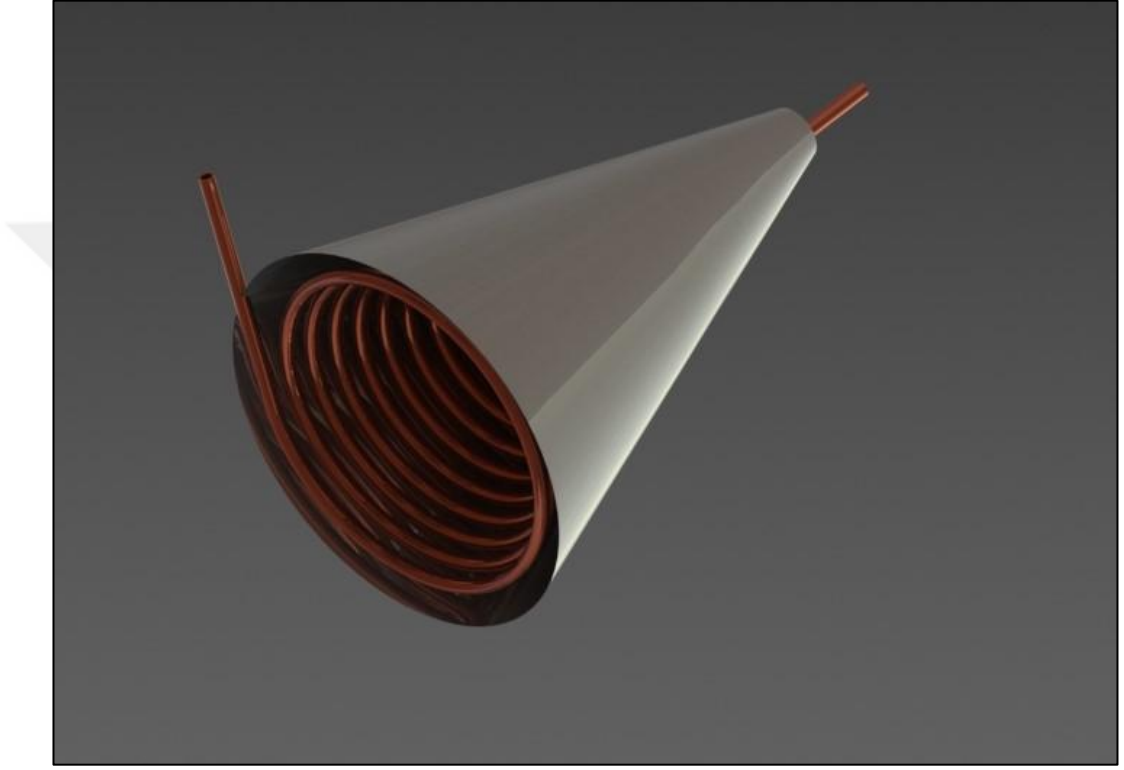
Özetle, kavitesiz t p alıcılar, parabolik çanak kolektör sistemlerinde maliyet etkinliği ve basitlikleri nedeniyle tercih edilebilen bir alıcı tasarımıdır. Tasarımın basitliği, üretim ve bakım kolaylığı sağlarken, verimlilik açısından belirli düzenlemeler gerektirebilmektedir. Şekil 3.27’de kavitesiz t p alıcının teknik çizimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Kavitesiz tüp alıcı teknik çizimi

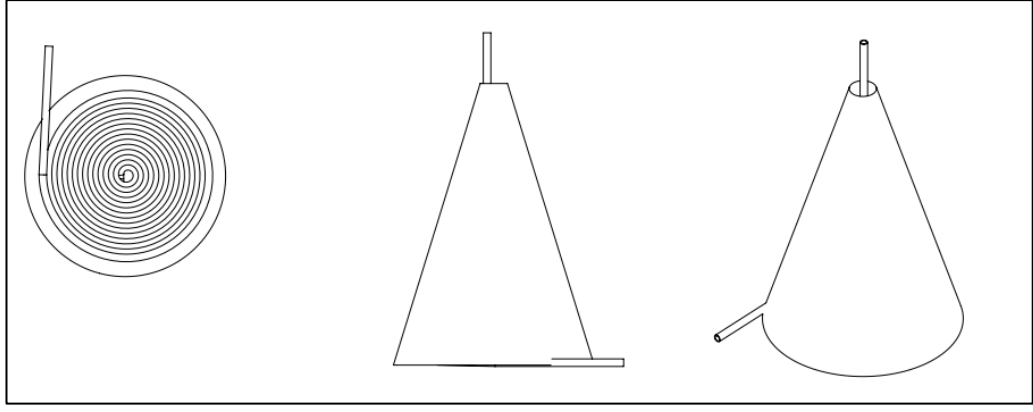
Son alıcı olan konik bakır spiral alıcısı, tasarımı sayesinde özellikle yüksek verimli ısı transferi sağlamak için geliştirilen yenilikçi bir alıcı türüdür. Bu tasarımda, bakırdan yapılmış bir spiral tüp, konik bir yapı içine yerleştirilmiştir. Bu yapının temel amacı, güneşten gelen ışınların büyük bir bölümünü etkili bir şekilde absorbe etmek ve bu enerjiyi ısıya dönüştürerek sistemin çalışma akışkanına aktarmaktır.

Konik bakır spiral alıcı, hem şekil hem de malzeme seçimi açısından dikkatlice optimize edilmiş bir yapıya sahiptir. Konik yapının, güneş ışınlarını odaklayarak spiral boyunca dağıtması sağlanmaktadır. Spiral tüpün kullanılması, ısı transfer yüzeyini artırarak daha fazla enerji absorpsiyonu sağlar. Ayrıca bakırın yüksek termal iletkenliği, ısıyı hızlı ve verimli bir şekilde akışkana aktarmaktadır. Şekil 3.28’de konik bakır spiral alıcı çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Konik bakır spiral alıcı 3 boyut çizimi

Konik bakır spiral alıcılar, parabolik çanak kolektör sistemlerinde yüksek verimlilik ve etkili ısı transferi sağlayan gelişmiş bir tasarım olarak öne çıkmaktadır. Bu tasarım, güneş enerjisinin maksimum düzeyde absorbe edilmesini ve bu enerjinin hızlı bir şekilde çalışma akışkanına aktarılmasını hedeflemektedir. Özellikle yüksek sıcaklık gerektiren ve verimliliğin kritik olduğu uygulamalarda, bu tür bir alıcı tercih edilmektedir. Şekil 3.29’da konik bakır spiral alıcının teknik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Kavite bakır spiral alıcı teknik çizimi

Parabolik çanak kolektör alıcı ve yansıtıcı (reflektör) tasarımı gerçekleştirilirken optik modellemelerinin yapılması gerekmektedir. Bu sayede tasarlanan sistemin yansıtıcı ve alıcısının üzerlerine gelen güneş ışınımını ne kadar yansıtıp odaklayabildiği öğrenilebilir ve varsa hatalar tespit edilip imalat öncesi gerekli düzeltmeler gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.30’da tasarlanan parabolik çanak kolektör ışınım modellemesi gösterilmiştir (COMSOL, 2024).



Şekil 3.30. Parabolik çanak kolektör optik modellemesi (COMSOL, 2024)

Şekil 3.30’da gösterilen parabolik çanak kolektör optik modellemesi incelendiğinde parabolik çanak yansıtıcı (reflektör) üzerine gelen güneş ışınımının büyük bir çoğunluğu parabolik çanağın odak noktası olan 1.25 metre uzaklığa yansıtıldığı görülmektedir. Odak noktasında (f) oluşan noktasal odaklama, odak noktasından uzaklaştıkça bozulmaktadır. Bu şekil bize çanağın tasarım kriterlerinin doğru olduğunu, sistem alıcısının odak noktasında azami verime ulaşacağını ve son olarak sisteme ait kesim (intercept) faktör değerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Daha önce açıklandığı üzere kesim faktörü (γ), parabolik çanak kolektörlerde (PDC) yansıtıcı yüzeyden yansıyan güneş ışınlarının, alıcı tarafından yakalanma oranını ifade eden bir parametredir. Yüksek bir kesim faktörü, sistemin daha verimli çalıştığını ve daha fazla güneş enerjisini toplayabildiğini gösterirken, düşük kesim faktörü ise enerji kayıplarına ve sistem verimliliğinin az olduğunu göstermektedir.

3.2.2.3. Parabolik çanak kolektör montaj aşaması

Parabolik çanak sistemlerinin montaj aşaması, sistemin genel performansı, verimliliği ve uzun vadeli dayanıklılığı açısından kritik bir süreçtir. Bu aşama, mühendislik hesaplamalarının ve tasarımın pratik uygulamaya dönüştüğü, dolayısıyla teorik verim hedeflerinin gerçek hayatta karşılanmasının sağlandığı bir dizi işlemi kapsar. Montaj sırasında yapılacak en ufak bir hata, odaklama hatalarına, enerji kayıplarına ve hatta sistemin yapısal bütünlüğünün tehlikeye girmesine neden olabilir. Ana montaj aşamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Temel Destek Yapılarının Montajı
- Parabolik Aynaların Montajı
- Alıcı Montajı
- Aktüatör ve Hareket Sistemlerinin Montajı

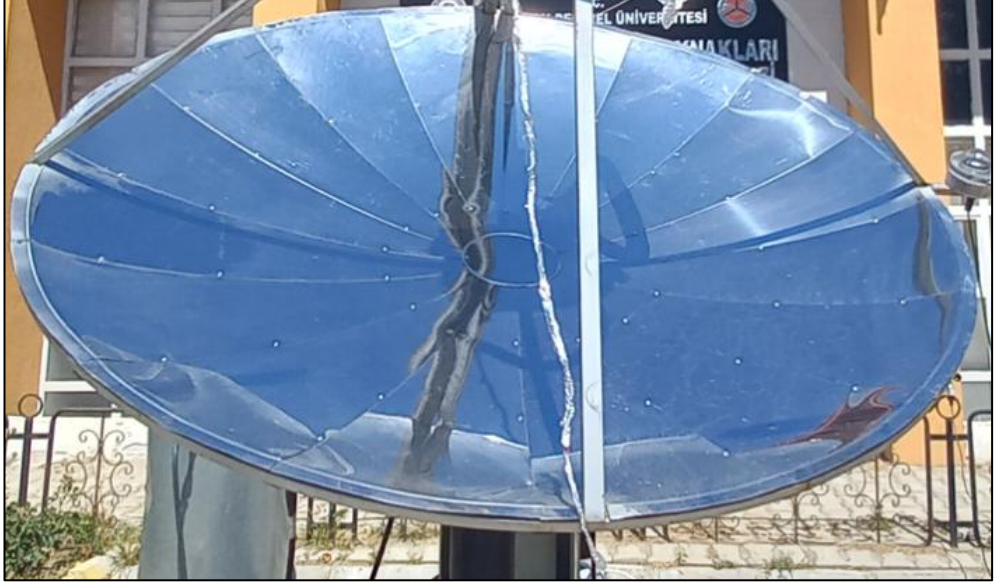
Parabolik çanak sistemlerinin montaj aşamasındaki ilk ve en önemli adım, temel destek yapılarının montajıdır. Bu aşama, sistemin genel yapısal bütünlüğünü sağlamak ve sonraki tüm montaj işlemlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmak için kritik bir öneme sahiptir. Temel destek yapıları, parabolik aynalar, alıcı ve

diğer bileşenlerin güvenli ve stabil bir şekilde monte edileceği ana taşıyıcı yapılardır. Şekil 3.31’de tasarlanan parabolik çanak kolektörün temel destek yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Parabolik çanak kolektör temel destek yapısı

Şekil 3.31’de gösterilen parabolik çanak sisteminin temel destek yapılarından dengeleyici ayak ve taşıyıcı silindirik gövde gösterilmiştir. Dengeleyici ayağın görevi taşıyıcı silindir gövdeyi ve buna bağlı olan sistem yapılarını dengede tutmaktır. Silindirik taşıyıcı gövde ise üzerine bağlanacak olan parabolik çanak, motor, redüktör ve alıcıları taşıyarak aldığı ağırlığı dengeleyici ayağa vermektir. Temel destek yapıları Şekil 3.31’de gösterildiği gibi montajı yapıldıktan sonra taşıyıcı gövdeye parabolik aynaların bağlantısı yapılmalıdır. Şekil 3.32’de aynaların (reflektör) parabolik çanak gövdesine montajlanmış hali gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Parabolik çanak kolektör yansıtıcısı

Şekil 3.32’de parabolik çanak kolektöre ait tasarlanan reflektör yapısı gösterilmiştir. Bu yapı, parabolik çanak kolektör iskeleti (yapısı) üzerine 16 adet krom-nikel kaplama 1 mm eninde sacların montajlanması ile elde edilmiştir. Bu yansıtıcı paneller üzerine gelen güneş ışınımını odak noktasında bulunan alıcıya iletecektir. Parabolik çanak yansıtıcı yapısı Şekil 3.31’de gösterilen silindirik taşıyıcı gövdeye montajlanmıştır. Şekil 3.33’te silindirik taşıyıcı gövde ile parabolik çanak yapısının montajlanmış hali gösterilmektedir.



Şekil 3.33. Parabolik çanak sistemi üst gövde

Şekil 3.33'te gösterilen parabolik çanak sistem üst gövdesine ayrıca alıcı montajı da gerçekleştirilmiştir. Tasarım parametrelerinde belirtilen odak noktası uzaklığı olan 1.25 metreye alıcı, alıcı destek kolları yardımıyla sabitlenmiştir.

Son olarak aktüatör ve hareket sistemlerinin montajı gerçekleştirilmiştir. Parabolik çanak sistemlerinin verimli çalışması için, güneşin hareketini takip edebilme yeteneği kritik bir rol oynar. Bu yeteneği sağlayan bileşenler ise aktüatörler ve hareket sistemleridir. Aktüatörlerin montajına başlamadan önce, kullanılacak aktüatörlerin özellikleri dikkatlice seçilmelidir. Aktüatörler, sistemin hareketli parçalarını doğru ve hassas bir şekilde kontrol eden mekanizmalardır. Aktüatörlerin montajı öncesinde, tüm bağlantı elemanları, montaj araçları ve kontrol sistemleri hazırlanmalıdır. Ayrıca, aktüatörlerin düzgün çalışmasını sağlamak için gereken elektriksel bağlantıların ve sensörlerin montaj öncesi kontrolleri yapılmalıdır. Bu hazırlık aşaması, montaj sürecinde karşılaşılabilecek olası sorunları minimize etmek ve sürecin daha verimli ilerlemesini sağlamak için önemlidir. Parabolik çanak sisteminde kullanılacak olan aktüatörler parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılan aktüatörler ile aynı olacaktır.

Parabolik çanak sisteminde oluk kolektör sisteminden farklı olarak bir yerine iki adet asenkron motor kullanılacak olmasıdır. Bunun nedeni parabolik çanak sisteminin güneşi çift eksenle takip etmesidir. Çizelge 3.7'de AC asenkron motor ve redüktör teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7. AC asenkron motor ve redüktör teknik özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Motor Gücü	0.75	Kw
Motor Frekansı	50	Hertz
Motor Besleme Gerilimi	230-400	V
Motor Devir Sayısı	1500	d/d
Motor Verimi	79.6	%
Koruma Sınıfı	IP55	-
Çalışma Şekli	S1	-
Verim Sınıfı	IE2	-
Redüktör Oranı (Motor)	1:100	-
Redüktör Çeşidi (Motor)	Sonsuz Vidalı	-
Redüktör-Kolektör Kol Uzunluğu (r)	15	cm
Redüktör Oranı (Üst Gövde Dişli 1)	20	adet
Redüktör Oranı (Üst Gövde Dişli 2)	60	adet

Çizelge 3.7'de parabolik çanak kolektöre hareketi sağlayacak olan AC asenkron motorlara ait parametreler verilmiştir. Bu bilgilere göre eksen motorlarının gücü 0.75

kW çalışma gerilimi ise 230-400 V arasındadır. Motorun eksen milinin (tahrik mili) dakikadaki tur sayısı ise 1500 d/d'dir. Ayrıca kullanılan motorun koruma sınıfı, toz ve suya karşı dayanıklı olması için IP55 olarak seçilmiştir. Çizelge 3.7'de verilen motor, redüktör ve dişli parametreleri ile motor tork hesapları yapılmıştır. Yapılan bu hesaplamaların çıkış değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Redüktör devir ve yük değerleri

Parametre	Değer	Birim
Giriş Devir Sayısı	1500	d/d
Çıkış Devir Sayısı	15	d/d
Hareket Sistemi Yük (N) Kapasitesi (F)	7600	N
Hareket Sistemi Yük (kg) Kapasitesi (m)	774.72	kg
Yer Çekimi Sabiti (g)	9.81	m/s ²

Çizelge 3.8'de parabolik çanak kolektör için seçilen redüktör ve asenkron eksen motorunun çıkış parametreleri verilmiştir. Bu çıkış parametrelerine göre redüktör mil çıkışı devir sayısı 15 d/d, redüktör mil çıkış yük kapasitesi ise 258 kg, dişli çıkış yük kapasitesi 774.72 kg olmaktadır. Motorun yatayda uygulayacağı 774.72 kg'lık bir yük kuvveti, parabolik çanak sisteminin kolektörünün zenit (güneş yükseklik) ekseninde kararlı bir şekilde dönmesini karşılayacaktır. Ayrıca bu tork hesabı sistemin azimut eksenini için yapıldığında ek dişli yapısı olmadığından dolayı 258 kg olmaktadır. Bu değerler incelendiğinde sistemde hesabı yapılan redüktör, dişli ve motorun kullanılması uygundur. Şekil 3.34'te parabolik çanak kolektör aktüatör sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Parabolik çanak kolektör aktüatör sistemi

3.2.3. Parabolik çanak kolektör güneş takip kontrol algoritması

Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini maksimize etmek amacıyla, güneş ışınlarının gün boyunca sürekli olarak optimal açıyla toplanması büyük önem taşımaktadır. Parabolik çanak kolektörler, güneş ışınlarını odaklayarak yüksek sıcaklıklarda ısı elde eden ve bu enerjiyi genellikle bir alıcıya aktaran sistemlerdir. Bu tür sistemlerde, güneş ışınlarının her an en yüksek verimlilikle toplanabilmesi için güneş takip kontrol algoritmalarının kullanılması gerekmektedir.

Güneş takip kontrol algoritmaları, parabolik çanak kolektörlerin güneşin hareketine bağlı olarak konumlarını otomatik olarak ayarlamalarını sağlamaktadır. Bu algoritmalar, güneşin konumunun hassas bir şekilde izlenmesi ve kolektörlerin doğru açıyla güneş ışınlarını toplaması için gerekli komutların verilmesi sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Algoritmanın doğru bir şekilde çalışması, sistemin genel performansını doğrudan etkilemekte ve toplanan enerji miktarını artırmaktadır.

Güneş takip kontrol algoritmalarında, güneşin gökyüzündeki konumunu belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu algoritmada, güneşin anlık konumunun hassas bir şekilde belirlenmesi için GPS sensörleri kullanılmaktadır. GPS sensörleri, coğrafi konum bilgilerini kullanarak, güneşin gün içerisindeki hareketini yüksek hassasiyetle izlemekte ve parabolik çanak kolektörlerin doğru bir şekilde yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, güneş ışınlarının sürekli olarak en uygun açıyla toplanması ve maksimum enerji verimliliği elde edilmesi hedeflenmektedir.

Sonuç olarak, GPS sensörlerinin kullanıldığı güneş takip kontrol algoritmaları, parabolik çanak kolektör sistemlerinde güneş enerjisinin verimli bir şekilde toplanmasını sağlamakta ve sistem performansını optimize etmektedir. Bu algoritmalar, güneşin anlık konum bilgilerine dayanarak, kolektörlerin sürekli olarak doğru açıyla yönlendirilmesini sağlamakta ve bu sayede enerji kayıpları minimize edilmektedir. GPS tabanlı takip sistemlerinin yüksek hassasiyeti ve güvenilirliği, bu sistemlerin güneş enerjisi uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu bölümde GPS sensöründen alınan veriler yardımıyla sistemin güneşi takip edebilmesi için gerekli olan takip algoritması ve bu algoritmaya göre tasarlanan güneş takip programı incelenecektir. Şekil B.5'te parabolik çanak kolektörün dikey ve yatay ekseninde güneşi takip edebilmesi için tasarlanan güneş takip algoritması gösterilmiştir.

Şekil B.5'te verilen parabolik çanağa ait algoritma cihazın başlatılması ile harekete geçmekte ve bir döngüye girmektedir. İlk olarak sistemde bulunan GPS modülünün seri haberleşme portları (R_X-T_X) ile olan iletişimi kontrol edilmektedir. Eğer modül aktif ise döngüden çıkılarak güneş açıları hesaplanmaktadır. Sistem hesaplamalarına göre güneş yükseklik açısı sıfırdan büyük ise yani güneş doğmuş ise azimut ve zenit açılarının referans noktasına göre karşılaştırılmaları yapılmaktadır. Eğer açılar arasında bir fark var ise sistem yazılımı bu farkı kapatmak adına cihazı güneşe doğru yönlendirecektir. Burada belirtilen fark açısı, sistemin başlangıçtaki konumu ile şu anki güneş konumu arasındaki açısal değerdir. Cihaz belirlenen süre boyunca bekleme gerçekleştirdikten sonra döngü başa dönecek ve hesaplar tekrar yapılarak sistemin gün boyunca güneşi takip etmesi sağlanacaktır. GPS takip sistemlerinde gün içinde bulutlanma, güneş ile cihaz arasına bir engelin girmesi gibi nedenlerden dolayı güneşin

kaybolduğu durumlarda sistem yine olağan takip durumuna devam edecektir. GPS ile takip sistemlerinde bu gibi olumsuz koşullar güneş takibini etkilememektedir.

Şekil B.5'te gösterilen parabolik çanak kolektör yazılım algoritmasına uygun olarak güneş takip yazılımı geliştirilmiştir. Güneş takip yazılımı tamamen özgün olmak üzere C dilinde geliştirilerek Arduino IDE üzerinden Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyicisine yüklenmiştir. Parabolik çanak kolektörün güneş takip yazılımı hazırlanırken parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımı ile kütüphane, arayüz programı, yazılım kod döngüleri ve fonksiyonlar aynı şekilde kullanılmaktadır. İki sistem arasındaki yazılım farkı, parabolik çanak kolektörün 2 eksenli olmasından kaynaklı olmaktadır. Oluk kolektörde yazılımında sadece azimut eksenini dikkate alınırken çanak kolektör yazılımında hem azimut hem de zenit eksenini dikkate alınmaktadır. Şekil B.6'da parabolik çanak kolektör güneş takip yazılımının başlangıç kodları gösterilmiştir. Şekil B.6'da ilk olarak kütüphane tanımlamaları yapılmıştır. Sonrasında parabolik çanak kolektör eksen motorlarına ait olan ve sistemin güneşi takip etmesini sağlayan motor pin tanımlamaları yapılmıştır. Bu pin tanımlamalarına göre Arduino'nun 46. dijital pini kolektörün doğu hareketini, 47. pini kolektörünün batı yönlü hareketini, 48. pin kolektörün zenit ekseninde aşağı yönlü hareketini sağlarken 49. pin ise aynı şekilde zenit ekseninde kolektörün yukarı yönlü hareketini sağlamaktadır. Limit sensörleri ise kolektörün sınır anahtarlarıdır. Bu sınır anahtarları kolektörün aşırı dönmesini engellemesinin yanında ilk çalıştırma sırasında referans (ilk konum) bilgisini de sağlamaktadır.

Başlangıç tanımlamalarında son olarak GPS sensörüne ait pinlerin tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi GPS sensörünün Rx ve Tx olmak üzere iki adet seri haberleşme bacağı bulunmaktadır. Bu bacakların Arduino mikrodenetleyicisine bağlanması ve bu bağlanan bacakların pin tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. GPS sensörüne ait Rx ve Tx pinleri için Arduino üzerinde 3 ve 4 numaralı pinler tanımlanmıştır. Bu tanımlamaya göre GPS sensörüne ait Rx pini Arduino'nun 4 numaralı pinine, GPS sensörünün Tx pini ise Arduino'nun 3 numaralı pinine çapraz olarak bağlanacaktır. Sonrasında bu bağlantının veri haberleşme hızının (baud rate) seçilmesi gerekmektedir. Bu tanımlamalardan sonra oluk kolektör sisteminde de kullanılan fonksiyonlar tanımlanacaktır. Bu fonksiyonlar;

- Güneş Açı Fonksiyonu
- Motor Kontrol Fonksiyonu
- Limit Anahtar Fonksiyonu
- Referans Fonksiyonu

Güneş açısı fonksiyonu, sistemin güneşi takip edebilmesi adına GPS sensöründen aldığı verileri işleyerek eksen açılarını hesaplamaktadır. Parabolik çanak ve parabolik oluk kolektör güneş açısı fonksiyonu aynı şekilde yazılmaktadır. Bunun nedeni her iki sistem için de gerekli olan açıların ortak olmasından kaynaklanmaktadır.

Son olarak motor kontrol fonksiyonu, limit anahtar fonksiyonu ve referans fonksiyonları da her iki sistem için yapısal olarak aynı şekilde olmaktadır. Sistemler arasındaki yazılımsal fark ana döngüde bulunan iki eksen kodlarıdır. Şekil B.7’de parabolik çanak kolektör ana (loop) döngü fonksiyonunun sadeleştirilmiş hali gösterilmiştir. Şekil B.7’de gösterilen koda göre azimut açısı 60 derece üstünde ise veya güneş yükseklik açısı 0’dan büyük ise kod çalışmaktadır. Bunun nedeni deney yapıldığı zaman dâhilinde güneşin varlığının kontrol edilmesidir. Sonrasında azimut açısının fark değeri hesaplanmaktadır. Bu fark değeri sistemin azimut ekseninde kaç derece döneceğini belirlemektedir. Fark hesaplandıktan sonra yeni bir azimut referans belirlenerek eksen referansının her zaman güncel tutulması sağlanmış olmaktadır. Azimut time kodu ise eksen motorunun kaç saniye süre ile döneceğini belirleyen bir değişkendir. Azimut eksenini ile aynı şekilde güneş yükseklik (elevation) kodları da benzer mantık ile çalışmaktadır. Bu kodların sonrasında azimut farkının 0’dan büyük mü yoksa küçük mü olduğu sorgulanmaktadır. Bu sorgunun nedeni azimut ekseninin hangi tarafa dönüş gerçekleştireceğinin öğrenilmesi için gereklidir. Eğer fark sıfırdan küçük ise eksen motoru doğu yönünde dönecek eğer fark sıfırdan büyük ise eksen motoru tam tersi yönde batı yönünde dönüş sağlayacaktır.

3.2.4. Parabolik çanak kolektör ısı hesapları

Parabolik çanak kolektör sistemlerinin tasarımı ve performans analizi, sistemin verimliliğini belirlemede kritik bir rol oynayan ısı hesaplamaların titizlikle gerçekleştirilmesini gerektirir. Bu bölümde, parabolik çanak sistemin ısı hesaplarının

temelleri incelenecek olup, kullanılan matematiksel modeller, enerji dengesi denklemleri ve bu denklemlerle elde edilen sonuçların sistem performansına etkileri detaylandırılacaktır. Öncelikle, parabolik çanak kolektör sisteminin enerji toplama prensipleri göz önünde bulundurularak, sistemin verimliliğini etkileyen temel parametreler ele alınacak, ardından bu parametrelerin ısı analizinde nasıl hesaba katıldığı açıklanacaktır. Bu analizler, sistemin optimum çalışma koşullarının belirlenmesine ve elde edilen ısı enerjisinin en verimli şekilde kullanılması için gerekli olan mühendislik çözümlerine ışık tutacaktır. Isı hesaplamalar, sistemin farklı çevresel koşullar altında nasıl performans gösterdiğini ortaya koyarak, sistemin genel enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla yapılacak iyileştirme çalışmalarına zemin hazırlayacaktır.

Parabolik çanak kolektör ısı hesaplamaları sistemin ürettiği toplam enerji miktarı ve bu enerjinin yanında sistemsel ve çevresel koşullar nedeniyle yaşanan kayıpların hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sistem tarafından toplanan güneş enerjisi hesaplanmalıdır. Denklem (3.40)'ta toplam güneş enerji miktar formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$Q_{\text{toplam}} = Q_{\text{yoğunlaştırılmış}} + Q_{\text{faydalı}} \quad (3.40)$$

Toplam güneş enerji miktarını hesaplamak adına yoğunlaştırılmış enerji miktarına da ihtiyacımız vardır. Bu kavram, güneş ışınlarının belirli bir yüzey alanında toplanarak daha küçük bir alana yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen enerji miktarını ifade etmektedir. Denklem (3.41)'de yoğunlaştırılmış enerji formülü verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$Q_{\text{Yoğunlaştırılmış}} = Q_{\text{faydalı}} + Q_{\text{toplam_kayıp}} \quad (3.41)$$

Bu değer hesaplandıktan sonra sistem alıcısında oluşan kayıpların hesaplanması gerekmektedir. Denklem (3.42)'de toplam kayıp formülü verilmiştir (Duffie ve Beckman, 2006).

$$Q_{\text{toplam_kayıp}} = Q_{\text{radyasyon}} + Q_{\text{konveksiyon}} + Q_{\text{iletim}} + Q_{\text{rüzgar}} \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'de verilen $Q_{\text{radyasyon}}$, parabolik çanağın yüzeyinden çevreye yayılan enerji kayıp miktarını, $Q_{\text{konveksiyon}}$, parabolik çanak alıcısı ile çevresindeki hava arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferi sonucunda oluşan enerji kaybını, Q_{iletim} , parabolik çanak alıcı yüzeyinin içinden geçen ısıнын kaybını, $Q_{\text{rüzgar}}$ ise parabolik çanak alıcısının yalıtımsız yüzeyi üzerinden geçen rüzgârın neden olduğu enerji kaybını ifade etmektedir. Bu kayıplar hesaplanırken sistem alıcısının üzerinde bulunan ve kayıpların azaltılmasını sağlayan yalıtım hattında hesaba katılması gerekmektedir. Denklem (3.43)'te radyasyon kayıp formülü verilmiştir (Boles ve Cengel, 2006).

$$Q_{\text{radyasyon}} = \epsilon_{sb} \sigma A_{\text{alıcı}} (T_{\text{yüzey}}^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad (3.43)$$

Denklem (3.43)'te verilen formülde ϵ , alıcı yüzeyinin emisyon katsayısını, σ_{sc} , Stefan-Boltzmann sabitini, $A_{\text{alıcı}}$, alıcının güneş alan yüzey alanını, $T_{\text{yüzey}}$, alıcı yüzey sıcaklığını, $T_{\text{çevre}}$ ise alıcının bulunduğu çevre sıcaklığını ifade etmektedir. Diğer bir kayıp ise konveksiyon kayıplarıdır. Denklem (3.44)'te konveksiyon enerji kayıp formülü verilmiştir (Boles ve Cengel, 2006).

$$Q_{\text{konveksiyon}} = h A_{\text{alıcı}} (T_{\text{yüzey}} - T_{\text{çevre}}) \quad (3.44)$$

Denklem (3.44)'te verilen h , konvektif ısı transfer katsayısını ($\text{W/m}^2\text{K}$) ifade etmektedir. Konvektif ısı transfer katsayısı, yüzey ile çevresindeki akışkan (hava, su, vb.) arasındaki ısı transfer hızını belirleyen önemli bir parametredir. Denklem (3.45)'te konvektif ısı transfer katsayısı formülü verilmiştir (Boles ve Cengel, 2006).

$$h = \frac{Nu k}{D_{\text{alıcı}}} \quad (3.45)$$

Denklem (3.45)'te verilen formülde Nu , Nusselt sayısını, k , akışkanın ısıl iletkenliğini, $D_{\text{alıcı}}$ ise alıcının iç çapını ifade etmektedir. Bu denklemin çözümü için Nusselt sayısına, Nusselt için ise Reynold sayısına ihtiyacımız vardır. Bu sabiteler ise Denklem (3.22), Denklem (3.23) ve Denklem (3.24)'te bulunan formüller yardımıyla hesaplanmaktadır. Diğer bir sistem kaybı olan Q_{iletim} Denklem (3.46)'da bulunan formül ile hesaplanmaktadır (Boles ve Cengel, 2006).

$$Q_{iletim} = \frac{k_{yalitim}}{d_{yalitim}} A_{yalitim} (T_{iç} - T_{dış}) \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'da verilen formülde $k_{yalitim}$, yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı ($W/m \cdot K$), $d_{yalitim}$, yalıtım malzemesinin kalınlığını, $A_{yalitim}$, yalıtımlı bölgenin alanını, $T_{iç}$ ve $T_{dış}$ ise bölgenin iç ve dış sıcaklıklarını ifade etmektedir. Son kayıp parametremiz rüzgâr kaybıdır. Rüzgâr kayıp formülü Denklem (3.47)'de verilmiştir (Boles ve Cengel, 2006).

$$Q_{rüzgar} = h_{rüzgar} A_{alıclı} (T_{yüzey} - T_{çevre}) \quad (3.47)$$

Denklem (3.47)'de verilen $h_{rüzgar}$, rüzgârın etkisiyle artan konvektif ısı transfer katsayısını (W/m^2K) ifade etmektedir. Rüzgâr, yüzeyin etrafında hızlı bir şekilde hareket eden hava akımları oluşturur, bu da ısı transferinin hızlanmasına neden olur. Normal koşullarda, bir yüzey ile çevresindeki hava arasındaki ısı transferi doğal konveksiyon ile gerçekleşir. Ancak rüzgâr devreye girdiğinde, bu konveksiyon zorlanmış konveksiyon haline gelir ve ısı transfer katsayısı artar. Rüzgârın hızı arttıkça, $h_{rüzgar}$ değeri de artar, çünkü rüzgâr daha fazla hava molekülünü yüzey üzerinden taşıyarak ısıyı daha hızlı bir şekilde uzaklaştırır.

Kayıp değerlerinin hesabı yapıldıktan sonra Denklem (3.42)'de bulunan toplam kayıp enerji bulunabilir. Sonrasında Denklem (3.41) ile faydalı ısı enerji hesabı yapılabilir. Faydalı ısı enerji, bir enerji sisteminde kullanılabilir veya işe yarar hale getirilmiş, net enerji miktarını ifade etmektedir. Faydalı ısı enerji, bir sistemin performansını ve verimliliğini doğrudan etkileyen, sistemden elde edilen gerçek enerji miktarını temsil eder. Bu nedenle, enerji sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde faydalı ısı enerjiyi maksimize etmek esastır. Faydalı enerji miktarını artırmak için sistemdeki kayıpların minimize edilmesi, kullanılan malzemelerin ve tasarımın optimize edilmesi gerekmektedir. Faydalı ısı enerji hesabı yapıldıktan sonra artık ısı verimlilik hesaplanabilir. Isıl verimlilik formülü Denklem (3.48)'de verilmiştir (Kalogirou, 2009).

$$\eta_{ısı} = \frac{Q_{faydalı}}{Q_{yoğunlaştırılmış}} \quad (3.48)$$

Denklem (3.48)'de ısı verimliliği formülü verilmiştir. Isı verimliliği, bir enerji dönüşüm sürecinde ne kadar enerjinin işe dönüştüğünü ve ne kadarının kaybolduğunu göstermektedir. Denklem (3.49)'da çanak kolektör alıcısında bulunan akışkanın sıcaklık artış formülü verilmiştir (Boles ve Cengel, 2006).

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{ısı}}}{\dot{m} c_p} \quad (3.49)$$

Denklem (3.49)'da verilen $\dot{m}$, akışkanın kütleli debisini, c_p ise özgül ısısını ifade etmektedir. Akışkanın sıcaklık artış hesabı yapıldıktan sonra Denklem (3.50) yardımı ile akışkanın çıkış sıcaklığı hesaplanabilir.

$$T_{\text{çıkış}} = T_{\text{giriş}} - \Delta T \quad (3.50)$$

Denklem (3.50)'de verilen formülde $T_{\text{giriş}}$, akışkanın sisteme giriş sıcaklığını ifade etmektedir. Son olarak genel sistem verimliliğini hesaplamak için Denklem (3.51)'de bulunan formül kullanılmaktadır.

$$\eta_{\text{sistem}} = \frac{Q_{\text{ısı}} - (Q_{\text{radyasyon}} + Q_{\text{konveksiyon}} + Q_{\text{iletim}} + Q_{\text{rüzgâr}})}{Q_{\text{toplam}}} \quad (3.51)$$

Denklem (3.51)'de verilen formül, bir enerji sisteminin topladığı enerji ile bu enerjinin çeşitli kayıplar sonrası ne kadarının faydalı bir işe dönüştürüldüğünü gösteren bir ölçüttür. Bu verimlilik, sistemin toplam performansını değerlendirmek için kullanılan temel bir metriktir. Genel sistem verimliliği, bir sistemin başlangıçta topladığı enerji miktarına kıyasla, sistemde meydana gelen çeşitli kayıpları (örneğin, radyasyon, konveksiyon, iletim ve rüzgâr kayıpları) dikkate alarak, faydalı enerji miktarının ne kadar olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak yukarıda verilen hesaplama adımları, sistemin enerji verimliliğini analiz etmek ve optimize etmek için kullanılabilecek temel hesaplama süreçlerini özetlemektedir. Isı verimliliği ve kayıpların doğru bir şekilde belirlenmesi, sistemin performansını artırmak için kritik önem taşımaktadır.

3.3. Sistem Deney Tasarımı

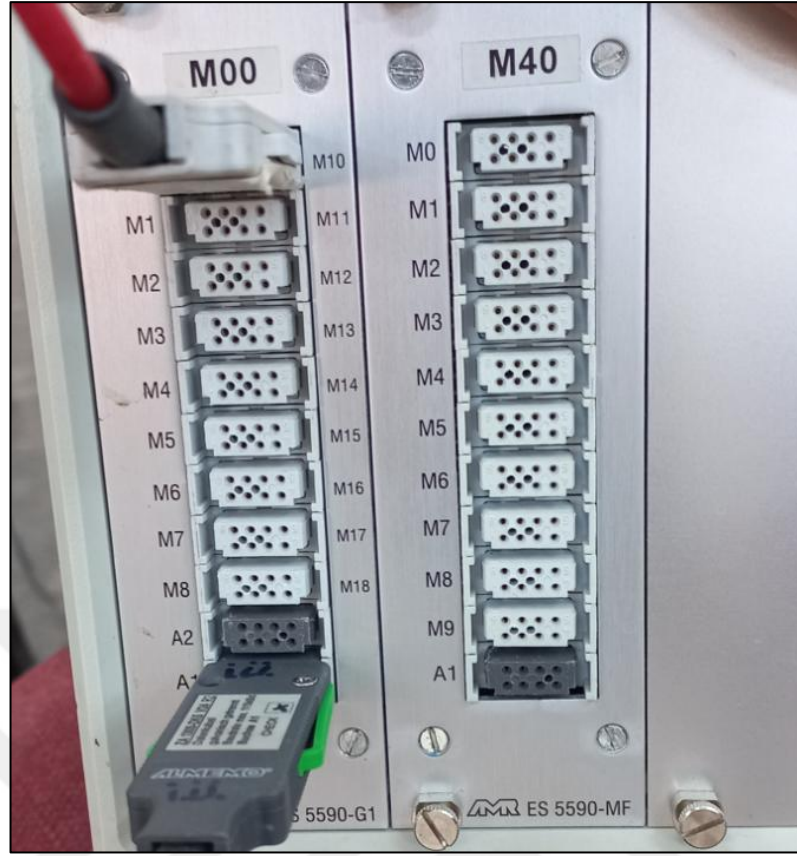
Parabolik çanak kolektör ve parabolik oluk kolektörlerin performansını değerlendirmek amacıyla yapılacak deneyler, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir adımdır. Bu çalışmada, deneysel verilerin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesi için kapsamlı bir sistem tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanan deney sistemi, veri kaydedici (datalogger), veri kaydedici yazılımı ve çeşitli deney ölçüm sensörlerinden oluşacaktır.

Deneyde kullanılacak ölçüm sensörleri, güneş ışıınımı, ortam sıcaklık ve nemi, rüzgâr hızı gibi çevresel parametrelerin yanı sıra, sistemdeki sıcaklık dağılımını izlemek için termokupllardan oluşacaktır. Güneş ışıınım sensörü, kolektörlerin aldığı güneş enerjisini ölçerken; ortam sıcaklık ve nem sensörü, çevresel koşulların deney üzerindeki etkilerini belirleyecektir. Rüzgâr sensörü, hava hareketlerinin sistem performansına olan etkisini incelerken, termokupllar ise sıcaklık profillerini hassas bir şekilde izleyerek sistemin termal davranışını anlamaya katkıda bulunacaktır.

Bu sistem tasarımı, deneysel verilerin güvenilir bir şekilde toplanmasını ve analiz edilmesini sağlayarak, parabolik çanak ve oluk kolektörlerin performans değerlendirmesini mümkün kılacaktır. Deneysel sonuçlar, bu yenilikçi enerji toplama sistemlerinin optimizasyonu ve gelecekteki uygulamaları için önemli bilgiler sunacaktır.

3.3.1. Veri kaydedici sistem ve yazılımı

Bu çalışmada kullanılan veri kaydedici sistem, Almemo marka ES5590 model veri kaydedici üzerine kurgulanmıştır. ES5590 veri kaydedici, yüksek hassasiyetli veri toplama kapasitesi ve geniş sensör desteği ile deneysel ölçümlerin güvenilir bir şekilde kaydedilmesini sağlamaktadır. Veri kaydedici, çeşitli çevresel ve sistem parametrelerinin izlenmesi amacıyla güneş ışıınımı, ortam sıcaklık ve nemi, rüzgâr hızı ve termokupllardan alınan sıcaklık verilerini toplamak üzere yapılandırılmıştır. Bu parametreler, deneyin doğruluğu ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir ve ES5590, bu verilerin hassas bir şekilde kaydedilmesine olanak tanımaktadır. Şekil 3.35'te ES 5590 veri kaydecisi gösterilmiştir.



Şekil 3.35. ES 5590 veri kaydedicisi

Almemo ES590 veri kaydedici, yüksek hassasiyetli ölçümler için tasarlanmış bir sistemdir. Cihaz, 9 Almemo konnektör girişiyle çeşitli sensörlerin bağlanmasına olanak tanır ve elektriksel yalıtım (50V) sağlar. Ölçüm aralığı ve doğruluk, kullanılan sensörlere göre değişiklik göstermekte olup, bu veriler prob seçimine bağlıdır.

Veri kaydedici sistemin etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve verilerin doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için ES5590 veri kaydediciye entegre olarak çalışacak özel bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım, veri kaydedici ile kullanıcı arasındaki etkileşimi kolaylaştırarak, deney boyunca toplanan verilerin gerçek zamanlı izlenmesini ve depolanmasını mümkün kılmaktadır. Yazılım, kullanıcı dostu bir arayüz sunarak, veri toplama süreçlerini optimize etmekte ve deneysel verilerin anlık olarak analiz edilebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, veri toplama frekansları, sensör kalibrasyonları ve veri kaydedicinin diğer çalışma parametreleri de bu yazılım aracılığıyla kolayca ayarlanabilmektedir. Şekil 3.36'da veri kaydedici arayüz programı gösterilmiştir.



Şekil 3.36. Veri kaydedici arayüz programı

Geliştirilen arayüz yazılımı, ES590 veri kaydedicinin tüm fonksiyonlarından yararlanmayı mümkün kılmakta ve deneysel çalışmaların ihtiyaçlarına uygun olarak özelleştirilebilir bir yapı sunmaktadır. Yazılım, toplanan verilerin güvenilir bir şekilde saklanmasını, düzenlenmesini ve gerektiğinde çeşitli formatlarda dışa aktarılmasını sağlamaktadır.

3.3.2. Deney ölçüm sensörleri

Deney ölçüm sensörleri, parabolik çanak ve parabolik oluk kolektörlerin performans analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu sensörler, deney süresince çeşitli çevresel ve sistemsel parametrelerin hassas bir şekilde izlenmesini ve kaydedilmesini sağlar. Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini belirlemek için kullanılan sensörler, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, akışkan sıcaklıkları, rüzgâr hızı ve kolektör yüzeyindeki sıcaklık dağılımı gibi faktörleri ölçerek, sistemin enerji toplama kapasitesine ve çevresel koşullara tepkisini ortaya koyar. Her bir sensörün sağladığı veriler, sistemin termodinamik davranışını anlamak ve optimize etmek için hayati öneme sahiptir. Bu

bölümde, kullanılan her bir sensörün özellikleri, işlevleri ve deney sırasında nasıl konumlandırıldığı ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.3.2.1. Güneş ışıınım sensörü

Bu çalışmada, güneş ışıınımı ölçümleri için FLA613-GS modeli güneş ışıınım sensörü kullanılmaktadır. FLA613-GS, geniş bir spektral aralıkta (400-1100 nm) çalışabilen ve 0 ila yaklaşık 1200 W/m² arasında ışıınım değerlerini ölçebilen bir sensördür. Sensör, yüksek hassasiyeti ve güvenilirliği ile bilinen, özellikle dış ortam koşullarında güneş enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir cihazdır.

Güneş ışıınım sensörü, parabolik çanak ve parabolik oluk kolektörlerin performans analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Deney sırasında, bu sensör aracılığıyla elde edilen veriler, kolektörlerin güneş enerjisini ne kadar verimli bir şekilde topladığını belirlemeye yardımcı olacaktır. Sensörün sağladığı veriler, deneysel koşulların güvenilirliğini ve geçerliliğini sağlamak amacıyla diğer çevresel parametrelerle birlikte değerlendirilerek, sistemin enerji toplama kapasitesine yönelik detaylı analizler yapılmasına olanak tanımaktadır. Şekil 3.37’de FLA613-GS güneş ışıınımölçer gösterilmiştir (Ahlborn, 2023a).



Şekil 3.37. FLA613-GS global ışıınım sensör (Ahlborn, 2023a)

Şekil 3.37’de gösterilen FLA613-GS Global Işınım Sensörü, geniş bir spektral aralıkta (400 nm ila 1100 nm) çalışan ve 0 ila yaklaşık 1200 W/m² arasında ışıınım değerlerini ölçebilen yüksek hassasiyetli bir cihazdır. Sensör, dış mekân uygulamaları için özellikle uygun olup, anodize alüminyum gövdesi ve UV ışığına karşı geçirgen plastik kubbesi ile dayanıklıdır. Yağmur ve sıçrama korumasına sahip bu sensör, aynı zamanda iç kondensasyonu önlemek için kurutucu ile donatılmıştır. Sensör, +5V ila +15V arasında bir güç kaynağı ile çalışmakta olup, 0V ila 2V aralığında sinyal çıkışı sağlamaktadır. Çalışma sıcaklığı -20°C ila +60°C arasında değişen bu cihaz, yüksek doğrulukta veri toplamak için tasarlanmıştır. Mutlak hata payı yüzde 10 değerinden az olarak belirtilmektedir.

FLA613-GS Global Işınım Sensörü, güneşten gelen toplam kısa dalga radyasyonunu, yani global ışıınımlı ölçen bir cihazdır. Global ışıınım, iki bileşenden oluşur: doğrudan güneş ışıınımlı (direct normal irradiance, DNI) ve atmosferden yansıyan veya dağılan difüz ışıınım. Global ışıınımlı ölçümü, genel çevresel enerji değerlendirmeleri ve çeşitli meteorolojik araştırmalar için önemlidir. Ancak, global ışıınım verisi, her iki bileşeni de içerdii için, yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri için uygun değildir.

Parabolik çanak veya oluk kolektörler gibi yoğunlaştırmalı güneş enerjisi sistemlerinde ise yalnızca direkt güneş ışıınımlı, yani güneşten doğrudan gelen ışıınım (DNI) önemlidir. Bu sistemler, aynaları kullanarak gelen güneş ışınlarını odak noktasına yoğunlaştırır ve burada yoğunlaştırılan enerji, genellikle bir ısı transfer akışkanını ısıtmak için kullanılır. Bu yoğunlaştırma işlemi yalnızca direkt güneş ışıınımlı ile etkili bir şekilde yapılabilir, çünkü atmosferden yansıyan veya dağılan difüz ışıınım, aynalar tarafından odaklanamaz ve bu nedenle bu tür sistemlerin enerji üretimine katkıda bulunmaz. Bu nedenle parabolik çanak sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi ve termal hesapların doğru yapılabilmesi için direkt normal ışıınımlı (DNI) doğru bir şekilde ölçülmesi gereklidir.

DNI değerinin ölçümü için 2 adet FLA613-GS global ışıınım ölçer kullanılmıştır. Ölçüm düzeninde kullanılan global ışıınım sensörlerinden biri doğrudan güneş ışığını ve atmosferden yansıyan veya dağılmış olan difüz ışıınımlı içeren global ışıınımlı (GHI) ölçmektedir. Global ışıınım, güneş enerjisi sistemlerinin genel enerji toplama kapasitesini değerlendirirken önemli bir parametre olup, doğrudan ve dolaylı ışıınım

bileşenlerinin toplamını temsil eder. Bu sensör, herhangi bir gölgeleme yapılmadan konumlandırılmıştır.

İkinci sensör ise gölgeleme mekanizması ile donatılmıştır. Bu mekanizma, sensörün yalnızca difüz ışınımı (DHI) ölçmesine olanak tanır. Gölgeleme işlemi, doğrudan gelen güneş ışığını tamamen engelleyecek şekilde yapılmıştır. Bu sayede, ikinci sensör, atmosferde bulunan moleküller, aerosoller ve bulutlar tarafından dağıtılan difüz bileşeni kaydetmektedir. Bu yöntem kullanılarak Denklem (3.52)'de bulunan formül yardımıyla DNI hesaplanabilmektedir.

$$DNI=GHI-DHI \quad (3.52)$$

Denklem (3.52)'de global ışıınımdan difüz ışıının çıkarılması, doğrudan güneş ışıınıını yani direkt normal ışıınıını (DNI) ortaya çıkarır. Bu yöntem, geleneksel pyrliometer cihazlarının kullanılmadığı durumlarda DNI verisini elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır (Kotti vd., 2014; Blum vd., 2022). Şekil 3.38'de DNI ölçüm mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3.38. DNI ölçüm mekanizması

Global ve difüz ışı nım ölçümlerine dayanan bu yöntem, doğru uygulandığında, DNI verisi elde etmek için kullanılabilir. Ancak, elde edilen verilerin hassasiyeti, sistemin diğ er bileş enleri ve çalışma koş ulları ile sürekli olarak doğrulanmalı ve izlenmelidir. Sistemin hassasiyeti ve ölçüm verilerinin doğruluğ u için kombin DNI sistemi parabolik ç anak kolektörünün üzerine montajlanmıştır. Bu sayede kombin sistem güneş i her zaman izlemekte ve bu sayede gölgeleme topu her zaman sensörün odak noktasında kalmaktadır.

3.3.2.2. Ortam sıcaklık ve nem sensörü

Deney sel verilerin doğruluğ unu ve güvenilirliğ ini sağ lamak amacıyla ç evresel parametrelerin izlenmesi büyük önem taş ımaktadır. Ortam sıcaklığ ı ve nemi, güneş enerjisi sistemlerinin performansını doğ rudan etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Bu bağ lamda, ortam sıcaklığ ı ve nem ölçümleri için Ahlborn marka FHA646AG modeli sıcaklık ve nem sensörü kullanılacaktır.

FHA646AG sensörü, yüksek hassasiyeti ve güvenilirliğ i ile bilinen bir ç evresel izleme cihazıdır. Sensör, deney ortamındaki sıcaklık ve nem değ iş imlerini hassas bir şekilde kaydederek, güneş enerjisi kolektörlerinin performans analizlerinde gerekli olan ç evresel verilerin elde edilmesine olanak tanır. Bu veriler, deney sel sonuçların yorumlanmasında ve sistem performansının optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ş ekil 3.39'da Ahlborn FHA646AG sıcaklık ve nem sensörü gösterilmiştir.



Şekil 3.39. FHA646AG sıcaklık ve nem sensörü

Şekil 3.39’da gösterilen FHA646AG sıcaklık ve nem sensörü, çevresel parametrelerin hassas bir şekilde izlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu sensör, zorlu dış ortam koşullarında çalışmak üzere geliştirilmiş ve kapasitif ince film sensör teknolojisi ile donatılmıştır. Sensör, -30°C ile $+60^{\circ}\text{C}$ arasında sıcaklık ve %0 ile %90 bağıl nem aralığında doğru ölçümler yapabilmektedir. Nem ve sıcaklık ölçüm hassasiyeti, nominal durumlarda $\pm\%2$ düzeyindedir.

3.3.2.3. Termokupl

Parabolik çanak ve parabolik oluk kolektör sistemlerinde, termal enerji dönüşüm süreçlerinin verimliliğini doğru bir şekilde değerlendirmek amacıyla sıcaklık ölçümleri büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, su giriş ve çıkış sıcaklıkları ile depo sıcaklıklarının hassas bir şekilde izlenmesi için termokupl sensörler kullanılacaktır. Termokupllar, geniş bir sıcaklık aralığında hızlı ve güvenilir ölçümler yapabilmek

yeteneğine sahip oldukları için bu tür termal sistemlerde yaygın olarak tercih edilen sensörlerdir.

Termokupl, iki farklı metalin birleşim noktalarında oluşan termoelektrik etkiden yararlanarak sıcaklık ölçümü yapan bir sensördür. Termokupllar, iki farklı metal veya alaşımın uçlarının birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu iki metalin birleştiği noktada, sıcaklık farkına bağlı olarak bir elektrik gerilimi (termoelektrik kuvvet) oluşur. Bu gerilim, ölçülen sıcaklığa orantılıdır ve uygun kalibrasyonla doğrudan sıcaklık değeri olarak okunabilir. Termokuplların çalışma prensibi, Seebeck etkisi olarak bilinen termoelektrik fenomenine dayanmaktadır. Seebeck etkisi, iki farklı metalin birleşim yerlerinde bir sıcaklık farkı olduğunda, bu fark nedeniyle bir elektrik akımı oluşmasını sağlar. Termokupl, bu akımı ölçerek sıcaklık farkını belirler ve sonuç olarak sıcaklığı hesaplar.

Termokupllar, geniş bir sıcaklık aralığında (genellikle -200°C ile $+1800^{\circ}\text{C}$ arasında) hassas ve güvenilir ölçümler yapabilmeleri, mekanik dayanıklılıkları, hızlı tepki süreleri ve düşük maliyetleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda, araştırma laboratuvarlarında ve enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Şekil 3.40'da sistemler için kullanılan termokupl gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Akışkan sıcaklık ölçüm termokupları

Parabolik çanak ve parabolik oluk kolektör sistemlerinde suyun giriş, çıkış ve depo sıcaklıklarının hassas bir şekilde izlenmesi amacıyla Tip K (nikel-krom/nikel-alüminyum) termokupl sensörler kullanılmıştır. Tip K termokupl, geniş bir sıcaklık aralığında (-200°C ile $+1260^{\circ}\text{C}$) yüksek doğrulukla (%0.5 sapma) ölçüm yapabilme kapasitesi ve oksidatif ortamlarda kararlı bir performans sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

3.3.2.4. Rüzgâr sensörü

Parabolik çanak ve oluk kolektör sistemlerinin performans analizinde çevresel faktörlerin etkisini değerlendirmek amacıyla rüzgâr hızının hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, rüzgâr sensörü (anemometre) olarak Ahlborn marka FVA 615-2 modeli kullanılmıştır. Anemometre, yalnızca rüzgâr hızını ölçmek üzere tasarlanmış hassas bir cihaz olup, deneysel verilerin doğruluğunu artırmak ve çevresel koşulların enerji üretim sistemleri üzerindeki etkisini belirlemek için kritik bir rol oynamaktadır.

Ahlborn FVA 615-2 anemometre, yatay rüzgâr hızının ölçümü için kullanılan yüksek hassasiyetli bir sensördür. Bu sensör, 0.5 m/s ile 50 m/s arasındaki rüzgâr hızlarını ± 0.5 m/s veya ölçüm değerinin %3 sapma doğruluğunda ölçebilir. Ölçüm hassasiyeti ise 0.1 m/s olarak belirlenmiştir. Sensör, optoelektronik prensiple (yarık diskli) çalışır ve 9 ila 30 V DC aralığında bir güç kaynağı ile çalışmaktadır. Şekil 3.41’de Almemo FVA 615-2 anemometre gösterilmiştir (Ahlborn, 2023b).



Şekil 3.41. Ahlborn FVA 615-2 anemometre (Ahlborn, 2023b)

Şekil 3.41’de gösterilen sensör, zorlu çevresel koşullarda güvenilir rüzgâr hızı ölçümleri sağlamak üzere tasarlanmış olup, parabolik çanak ve oluk kolektör sistemlerinin performans analizlerinde rüzgârın etkisinin değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

3.4. Yapay Zekâ Algoritmaları

Bu bölümde, parabolik oluk ve çanak kolektör sistemlerinin su çıkış sıcaklıklarını tahmin etmek amacıyla kullanılabilecek farklı yapay zekâ algoritmaları ele alınacaktır. Yapay zekâ, karmaşık veri ilişkilerini modelleme ve tahmin etme yeteneği ile mühendislik problemlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli regresyon yöntemleri kullanılarak su çıkış sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Her bir algoritmanın avantajları, sınırlamaları ve uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu sayede, veri setinin özelliklerine en uygun modelin seçimi ve uygulanması sağlanacaktır.

Algoritma, bir problemin çözümü için adım adım talimatlar veren, girdi değerlerine göre amacı doğrultusunda sonuçlar veren bir mantık tasarımıdır. Yapay zekâ algoritmaları ise bir makineye öğrenmeyi, düşünmeyi ve karar vermeyi adımlarını öğreten algoritmalarlardır. Çalışmada kullanılacak algoritmaların seçimi için bakılacak en önemli kriter verisetinde bulunan parametrelerin tipleri ve birbirleri ile olan ilişkileridir. Makine öğrenmesinde algoritmalar iki temel gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar;

- Sınıflandırma
- Regresyon

Sınıflandırma, bir veri kümesinden öğrenilen bir modeli kullanarak verileri belirli sınıflara (kategorilere) ayırmak için kullanılır. Örneğin, bir sınıflandırma algoritması, bir insanın yaşına göre onun sağlıklı veya sağlıklı olmadığını tahmin etmek için kullanılabilir. Regresyon ise, bir veri kümesinden öğrenilen bir modeli kullanarak veriler arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kullanılır. Örneğin, bir regresyon algoritması, bir evin fiyatının birkaç özelliğe (örneğin, büyüklük, bölge veya yapım tarihi) göre nasıl değişeceğini tahmin etmek için kullanılmaktadır.

Eğer verisetinde sonuç olarak elde edeceğimiz parametre (bağımlı değişken) bir sınıf ise yani 1 veya 0 gibi kesin değerler veriyor ise bu veri seti için sınıflandırma algoritmaları kullanılacaktır. Ancak verisetindeki bağımlı değişken, bağımsız

değerlere (girdi parametreleri) göre değişiyor ve kesin bir sınıf oluşturmuyor ise regresyon algoritmaları kullanılır.

Bağımlı ve bağımsız değişkenler, bir veri kümesinde bulunan ve verilerin birbirleriyle olan ilişkilerini belirten parametrelerdir. Bağımlı değişken, bir modelde tahmin edilen değişkendir ve bağımsız değişkenler tarafından etkilendiği şeklinde düşünülebilir. Örneğin, bir evin fiyatı (bağımlı değişken) birkaç özelliğe (bağımsız değişkenler) göre değişebilir, örneğin büyüklük, bölge ve yapım tarihi. Bağımsız değişkenler, bir modelde tahmin edilmeyen değişkenlerdir ve bağımlı değişkenleri etkilemektedir.

Bağımlı ve bağımsız değişkenler, veri analizi ve makine öğrenimi gibi alanlarda sıklıkla bir model oluşturmak için kullanılır. Örneğin, bir regresyon modeli oluşturmak için bir veri kümesindeki ev fiyatları (bağımlı değişken) ve evin özellikleri (bağımsız değişkenler) kullanılabilir. Bu model sayesinde ev fiyatlarının nasıl değişeceğini tahmin edilmiş olur. Bu örnekten yola çıkarak parabolik oluk ve çanak kolektör sistemlerine ait bir regresyon modeli oluşturmak için, sistemin su çıkış sıcaklığı (bağımlı değişken) ve sistemin su giriş sıcaklığı, depo sıcaklığı, rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı, nem oranı ve güneş ışıınımı gibi çeşitli özellikleri (bağımsız değişkenler) kullanılabilir. Bu model sayesinde, kolektör sisteminin su çıkış sıcaklığının nasıl değişeceğini tahmin etmek mümkün olmaktadır.

Deneyler sonucunda elde edilen veri setlerinin analizini gerçekleştirmek için 4 farklı regresyon modeli kullanılacaktır. Bu regresyon modelleri;

- Polinom Regresyon
- Çoklu Doğrusal Regresyon
- Destek Vektör Regresyonu
- K-EN Yakın Komşular Regresyon

Bu türlerden Polinom Regresyon, doğrusal olmayan ilişkileri yakalamada esnek bir yapı sunduğu için seçilmiştir. Çoklu Doğrusal Regresyon, bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Destek Vektör Regresyonu (SVR) (Support Vector Regression),

özellikle küçük veri setlerinde yüksek genelleme yeteneği ve karmaşık ilişkileri modelleyebilme avantajı nedeniyle tercih edilmiştir. Son olarak, K-En Yakın Komşular Regresyonu (k-NN) ise, örnekler arasındaki benzerlikleri dikkate alarak tahmin yapma yaklaşımıyla, veri yapısındaki örüntüleri öğrenmede etkili olduğu için kullanılmıştır. Bu farklı yaklaşımlar sayesinde, deneysel veriler çok yönlü olarak değerlendirilmiş ve modelleme doğruluğu artırılmaya çalışılmıştır.

Ayrıca kullanılacak modellerin değerlendirilmesi için bazı kriterlere göre incelemeler yapılacaktır. Bu kriterler;

- R^2
- MSE
- RMSE
- MAE
- MAPE

R^2 , regresyon modellerinde bağımlı değişkenin toplam varyansının ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını ölçen bir istatistiksel metrik olarak tanımlanır. Bu metrik, modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkinin gücünü değerlendirmek amacıyla kullanılır. R^2 değeri 0 ile 1 arasında bir değer alır; burada 1, modelin bağımlı değişkenin varyansını tamamen açıkladığını, 0 ise bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki varyansı hiç açıklamadığını gösterir.

R^2 , açıklanan varyansın toplam varyansa oranı olarak da bilinir ve genellikle modelin genel performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu bağlamda, R^2 değeri ne kadar yüksekse, modelin tahmin gücünün o kadar iyi olduğu kabul edilir. Öte yandan, düşük bir R^2 değeri, modelin bağımlı değişkenin varyansını açıklamada yetersiz kaldığını ve dolayısıyla modelin daha fazla iyileştirilmesi veya alternatif bir modelin tercih edilmesi gerektiğini gösterebilir.

R^2 'nin akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmasının temel sebeplerinden biri, regresyon modelinin ne derece iyi bir uyum sağladığını basit ve anlaşılır bir şekilde

ifade edebilmesidir. Ayrıca, R^2 değeri modelin yalnızca genel başarısını değil, aynı zamanda bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin büyüklüğünü de yansıtır. R^2 , bağımsız değişken sayısı arttıkça doğal olarak artma eğilimindedir, bu da modelin performansını olduğundan daha iyi gösterebilir. Özellikle çoklu doğrusal regresyon gibi durumlarda, çok sayıda bağımsız değişken kullanıldığında, bu değişkenler modelin açıklama gücüne fazla katkıda bulunmasa bile R^2 değeri yükselir. Bu nedenle sonucun hata metrikleri ile daha detaylı analiz edilmesi gerekmektedir. Bu metriklerden biri olan MSE (Mean Squared Error), bir regresyon modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan yaygın bir hata metriğidir. MSE, model tarafından tahmin edilen değerler ile gerçek (gözlemlenen) değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını hesaplar. Bu metrik, modelin ne kadar hatalı olduğunu ve tahminlerinin ne ölçüde gerçek değerlerden saptığını belirlemek için kullanılır.

MSE, bir modelin performansını değerlendirmek için güçlü bir araçtır. Modelin tahmin hatalarını kare olarak ortalamasını hesaplar ve büyük hatalara daha fazla önem verir. Ancak, MSE'nin yüksek hassasiyeti ve birim karmaşıklığı gibi bazı dezavantajları da vardır. Bu nedenle, MSE'nin yanı sıra RMSE veya MAE gibi diğer metriklerle birlikte kullanılması, modelin performansını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi sağlar.

RMSE (Root Mean Squared Error), regresyon analizlerinde model performansını değerlendirmek için kullanılan bir hata metriğidir. RMSE, tahmin edilen değerler ile gerçek (gözlemlenen) değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökünü olarak hesaplanır. Bu metrik, modelin tahmin ettiği değerlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu ifade eder ve genellikle MSE'nin daha yorumlanabilir bir versiyonu olarak kullanılır.

RMSE, regresyon analizlerinde modelin tahmin doğruluğunu değerlendirmek için kritik bir metriktir. Modelin tahmin hatalarının ortalama büyüklüğünü ve genel performansını doğrudan bağımlı değişken birimleri cinsinden sunar. MSE'ye benzer şekilde, RMSE de büyük hatalara karşı hassas olup, modelin büyük hatalar yaptığı durumları daha net bir şekilde gösterir. RMSE, hem modelin genel performansını

anlamak hem de farklı modelleri karşılaştırmak için güçlü ve yaygın olarak kullanılan bir araçtır.

MAE (Mean Absolute Error), regresyon analizlerinde model performansını değerlendirmek için kullanılan bir hata metriğidir. MAE, model tarafından tahmin edilen değerler ile gerçek (gözlemlenen) değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını hesaplar. Bu metrik, tahmin hatalarının ortalama büyüklüğünü ve modelin ne kadar doğrulukla tahmin yaptığını anlamak için kullanılır.

Son metrik olan MAPE (Mean Absolute Percentage Error) ise regresyon modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir hata metriğidir. MAPE, model tarafından tahmin edilen değerler ile gerçek (gözlemlenen) değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin yüzdesel olarak ifade edilip ortalamasını hesaplar. Bu metrik, tahmin hatalarının bağımlı değişkenin gerçek değerlerine göre yüzdesel olarak ne kadar büyük olduğunu gösterir ve genellikle tahminlerin göreceli doğruluğunu anlamak için kullanılır.

Sonuç olarak ele alınan R^2 , MSE, RMSE, MAE ve MAPE gibi performans metrikleri, regresyon modellerinin tahmin gücünü ve doğruluğunu değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Her bir metrik, modelin farklı yönlerini ölçme kapasitesine sahip olup, modelin genel başarısını, hata oranlarını ve tahminlerin doğruluğunu detaylı bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. R^2 modelin açıklayıcılık gücünü değerlendirirken, MSE ve RMSE hataların büyüklüğünü ve modelin ne kadar iyi genelleştirildiğini ortaya koyar. MAE, tahmin hatalarının ortalama büyüklüğünü gösterirken, MAPE tahmin doğruluğunu yüzdesel olarak ifade eder, bu da özellikle farklı ölçeklerdeki veri setlerinin karşılaştırılmasında önemlidir. Bu metriklerin bir arada kullanılması, modelin performansını daha kapsamlı ve dengeli bir şekilde değerlendirmenizi sağlar. Her bir metriğin sağladığı farklı bakış açıları, modelin iyileştirilmesi ve en uygun modelin seçimi için kritik bilgiler sunar.

3.4.1. Polinom regresyon

Polinom regresyon, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesine olanak tanıyan bir regresyon tekniğidir. Bu

yöntem, doğrusal regresyonun bir genellemesi olarak kabul edilir ve bağımsız değişkenlerin farklı derecelerinden oluşan polinom terimlerinin eklenmesiyle oluşturulur. Denklem (3.53)'te polinom regresyonunun matematiksel ifadesi verilmiştir (Montgomery vd., 2013).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon_e \quad (3.53)$$

Denklem (3.53)'te verilen y, bağımlı değişkeni, x, bağımsız değişkeni, β değerleri, regresyon katsayılarını, ε_e ise regresyon hatasını ifade etmektedir. Denklemde bulunan regresyon katsayıları bağımsız değişken sayısına bağlı olarak artış gösterebilmektedir.

Polinom regresyon, özellikle bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunda kullanılır. Bu yöntem, mühendislik, ekonomi, biyoloji ve sosyal bilimler gibi çeşitli disiplinlerde yaygın olarak uygulanmaktadır.

3.4.2. Çoklu doğrusal regresyon

Çoklu doğrusal regresyon (MLR), bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkileri modellemek için kullanılan bir regresyon analizidir. Bu model, bağımlı değişkenin birden fazla bağımsız değişkenin doğrusal kombinasyonu olarak ifade edildiği bir doğrusal regresyon modelinin genişletilmiş halidir. Bu model, özellikle bir olayın veya durumun birden fazla faktör tarafından etkilendiği durumlarda kullanılır. Denklem (3.54)'te çoklu doğrusal regresyonun matematiksel ifadesi verilmiştir (Kutner vd., 2005).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon_e \quad (3.54)$$

Denklem (3.54)'te verilen y, bağımlı değişken, x terimleri, bağımsız değişkenleri, β değerleri, bağımsız değişkenlerin regresyon katsayılarını, ε ise hata terimini ifade etmektedir. Çoklu doğrusal regresyon modelinde elde edilen katsayılar β , her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini temsil eder. Örneğin, β katsayısı, x bağımsız değişkenindeki bir birimlik artışın, diğer değişkenler sabit tutulduğunda, bağımlı değişken y üzerinde ortalama olarak ne kadar değişime neden olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, çoklu doğrusal regresyon, birden fazla bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini modellemek için güçlü bir araçtır. Ancak, modelin doğrusal varsayımı ve potansiyel hataları göz önünde bulundurulmalı ve uygun model değerlendirme metrikleri ile modelin performansı dikkatlice incelenmelidir.

3.4.3. Destek vektör regresyonu

Destek Vektör Regresyonu (SVR), makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan bir regresyon tekniğidir. SVR, sınıflandırma problemlerinde kullanılan destek vektör makineleri (SVM) algoritmasının bir uzantısıdır. SVR, verilerin doğrusal olmayan özelliklerini modellemek ve bağımlı değişkeni tahmin etmek için kullanılır. SVR, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkileri belirli bir tolerans aralığında (epsilon aralığı) modelleyerek tahmin eder. Denklem (3.55)'te destek vektör regresyonu genel matematiksel ifadesi verilmiştir (Cortes ve Vapnik, 1995).

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \quad (3.55)$$

Denklem (3.55)'te verilen $f(x)$, bağımsız değişkenleri içeren girdi vektör fonksiyonu, w , modelin öğrenmeye çalıştığı modelin ağırlık vektörü, b , bias değeri, $(w.x)$ ise w ve x vektörlerinin iç çarpımını ifade etmektedir.

3.4.4. K-EN yakın komşular regresyonu

K-EN Yakın Komşular (KNN) regresyonu, makine öğrenimi modelleri arasında basit ancak etkili bir yaklaşımdır. Bu yöntem, bir veri noktasının çıktı değerini, en yakın k komşu noktaların değerlerinin bir fonksiyonu olarak tahmin eder. KNN regresyonunun temel ilkesi, benzer verilerin benzer çıktılar üreteceği varsayımına dayanır. Bu bağlamda, k değeri, modelin karmaşıklığı ve tahmin hassasiyeti arasındaki dengenin sağlanmasında kritik bir parametre olarak karşımıza çıkar.

KNN regresyonunda, bir veri noktasının hedef değeri, genellikle en yakın k komşuların ortalaması ya da ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanır. Bu hesaplama, komşuların mesafelerine dayalı bir şekilde yapılabilir. Örneğin, daha yakın komşulara daha fazla ağırlık verilerek tahminin duyarlılığı artırılabilir. Mesafe hesaplamalarında

genellikle öklidyen mesafe tercih edilmektedir. K değerinin seçimi, model performansı üzerinde doğrudan etkili bir role sahiptir. Düşük k değerleri, modelin aşırı uyum (overfitting) riskini artırırken, yüksek k değerleri ise modelin genelleme kabiliyetini iyileştirir ancak bazen özellikleri yeterince hassas şekilde yakalayamayabilir. K değerin optimizasyonu için genellikle çapraz doğrulama (cross-validation) yöntemi kullanılmaktadır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmanın ana bulguları detaylı bir şekilde sunulacak ve bu bulguların mevcut literatürle ilişkisi ele alınacaktır. Öncelikli olarak, sistemlerin ısı performanslarının matematiksel modellerine odaklanılacak, ardından parabolik oluk ve çanak kolektörlerinin modelleme sonuçları incelenecektir. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi, elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen akış ve termal analiz sonuçları değerlendirilecek, bu bağlamda farklı alıcı modellerinin performansları karşılaştırılacaktır (ANSYS, 2025). Son olarak, yapay zekâ tabanlı model analizleri üzerinden elde edilen bulgular tartışılacak, bu bulguların mühendislik ve bilimsel perspektiften katkıları ortaya konacaktır. Çalışmanın bulguları, alanındaki bilgi birikimine yapılan katkılar ve bu bulguların potansiyel uygulamaları çerçevesinde değerlendirilecektir.

4.1. Sistemlerin Isıl Performans Analizleri

Sistemlerin ısı performanslarının değerlendirilmesi amacıyla sistemlere ait matematiksel modeller ele alınacaktır. Isıl performans, bir enerji sisteminin verimliliğini ve etkinliğini belirlemede kritik bir öneme sahiptir ve bu nedenle doğru ve güvenilir modelleme yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde sunulan modeller, sistemlerin termodinamik ve enerji dengesi prensiplerine dayandırılarak oluşturulmuş olup, sistemlerin tasarım, optimizasyon ve performans değerlendirmelerinde kullanılmak üzere yapılandırılmıştır. Ayrıca, modellerin geçerliliği ve doğruluğu deneysel verilerle karşılaştırılarak değerlendirilecek, modelleme sürecinde yapılan varsayımlar ve bu varsayımların sonuçlar üzerindeki etkileri tartışılacaktır. Sunulan matematiksel modellerin, enerji sistemlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

4.1.1. Parabolik oluk kolektör ısı performans analizi

Parabolik oluk kolektörlerinin ısı performansını değerlendirmek amacıyla geliştirilen matematiksel modelleme süreci ele alınacaktır. Parabolik oluk kolektörler, yüksek verimli güneş enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, bu sistemlerin etkinliği büyük ölçüde ısı performanslarına bağlıdır. Isı performans modellemesi, kolektörlerin enerji dönüşüm süreçlerini anlamak, sistem tasarımını optimize etmek ve gerçek çalışma koşulları altında beklenen performansı tahmin etmek için kritik bir araçtır.

Bu modelleme çalışmasında, parabolik oluk kolektörlerinin enerji denklemleri ve ısı transfer mekanizmaları dikkate alınarak, sistemin genel verimliliğini etkileyen faktörler detaylı bir şekilde analiz edilecektir. Ayrıca, modelin doğruluğunu ve geçerliliğini sağlamak için deneysel verilerle karşılaştırmalar yapılacak ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

Parabolik oluk kolektör ısı performans analizi için ilk olarak ısı kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Isı kayıplarının doğru bir şekilde hesaplanması, parabolik oluk kolektörlerin verimliliğini belirlemede kritik bir rol oynar. Bu kayıpların belirlenmesi için çeşitli ısı transfer katsayıları kullanılır. Öncelikle kolektörün toplam ısı kaybı katsayısı U_L , rüzgâr kaynaklı konveksiyon (h_w), radyasyon (h_r) ve zorlanmış konveksiyon (h_c) ısı transfer katsayıları hesaplanmaktadır.

Isı kayıp analizleri yapıldıktan sonra sistem içerisindeki ısı transfer süreçlerinin değerlendirilmesi için toplam ısı transfer katsayısı hesaplanmaktadır. Sonrasında ise kolektör verim ve ısı taşıma faktörü yukarıda verilen formüller ile hesaplanmaktadır. Son olarak sistemin ürettiği yararlı ısı miktarı (Q_u), hesaplanmaktadır. Çizelge 4.1’de parabolik oluk kolektörün yapılan deneylere ait ortalama ısı performans analiz giriş ve çıkış parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Parabolik oluk kolektör ısı performans parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Güneş Radyasyonu (DNI)	615.44	W/m ²
Ortam Sıcaklığı	32.33	°C
Rüzgâr Hızı	0.41	m/s
PTC Uzunluk	3	m
PTC En	1	m
Alıcı İç Çap	0.018	m
Alıcı Dış Çap	0.02	m
Güneşlenme Süresi	10.6	saat
Kütleli Debi	0.02	kg/s
Rüzgâr Kayıp Katsayısı (h_w)	10.18	W/m ² -K
Radyasyon Kayıp Katsayısı ($h_{r,c-a}$)	5.97	W/m ² -K
Radyasyon Kayıp Katsayısı ($h_{r,r-c}$)	6.58	W/m ² -K
Kolektör Isı Kayıp Katsayısı (U_o)	5.39	W/m ² -K
Kolektör Verim Faktörü	0.9817	-
Isı Taşıma Faktörü	0.9761	-
Su Çıkış Sıcaklığı	73.88	°C
Su Giriş Çıkış Sıcaklık Farkı (ΔT)	18.88	°C

Çizelge 4.1’de sunulan veriler, parabolik oluk kolektör sisteminin ısı performansını kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Çizelgede verilen giriş parametreleri yapılan deney sonuçlarının ortalaması hesaplanarak bulunmuştur. Güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı gibi çevresel faktörler ile sistem parametreleri arasında kurulan ilişkiler, sistemin verimliliği ve enerji dönüşüm süreçlerini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.

4.1.2. Parabolik çanak kolektör ısı performans analizi

Parabolik çanak kolektörler, yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin bir türü olup, güneş ışığını odak noktalarında toplar ve bu enerjiyi ısıya dönüştürürler. Bu sistemler, yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyetleri ve enerji verimlilikleri nedeniyle endüstriyel süreçlerde, elektrik üretiminde ve ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Parabolik çanak kolektörlerin termal performansını modellemek, sistemin enerji verimliliğini artırmak ve optimal tasarım parametrelerini belirlemek için hayati önem taşımaktadır.

Modelleme süreci, güneş ışıınımı, optik kayıplar, ısı iletimi ve taşınımı gibi çeşitli fiziksel süreçlerin dikkate alınmasını gerektirir. Ayrıca, çanak yüzeyinin yansıtma özellikleri, odaklayıcı geometrisi ve toplayıcıda kullanılan malzemelerin termal özellikleri de performansı etkileyen kritik faktörlerdir. Bu bağlamda, parabolik çanak kolektörlerin termal performansını değerlendirmek ve geliştirmek amacıyla yapılan

modelleme çalışmaları, sistemin verimliliğini artırma ve maliyet etkinliğini iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Parabolik çanak kolektörlerinin ısı performans analizleri, güneş enerjisinin etkin bir şekilde toplanması ve bu enerjinin ısıya dönüştürülmesi sürecinde ortaya çıkan çeşitli kayıpların detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmektedir. Bu tür sistemlerdeki enerji dönüşüm verimliliğinin doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla, optik verimden başlayarak sistemin çeşitli kısımlarındaki ısı kayıplarını ve bu kayıpların minimize edilmesine yönelik stratejileri içeren bir dizi denklem kullanılmaktadır. İlk olarak, Denklem (3.41)'de güneş enerjisi miktarının hesaplanmasına odaklanılmaktadır. Bu denklem, parabolik çanak kolektörün üzerine düşen toplam güneş enerjisi miktarını belirlemekte ve sistemin enerji toplama kapasitesinin bir başlangıç noktası olarak kullanılmaktadır. Güneş ışınımı ve alıcı yüzey alanı, sistemin ne kadar enerji toplayabileceğini doğrudan etkilemektedir.

Isı kayıplarının hesaplanması da parabolik çanak kolektörlerin termal performans analizinde kritik öneme sahiptir. Denklem (3.43), Denklem (3.44), Denklem (3.45), Denklem (3.46) ve Denklem (3.47)'de radyasyon, konveksiyon, ısı iletimi ve rüzgâr etkisi gibi ısı kayıp formülleri verilmiştir. Bu denklemler, sistemin topladığı enerjinin ne kadarının kaybolduğunu ve bu kayıpların nasıl minimize edilebileceğini anlamak için kullanılmaktadır.

Faydalı ısı enerjisi ve ısı verimlilik hesaplamaları, sistemin performansını artırmak için yapılan değerlendirmelerde önemli bir yer tutmaktadır. Denklem 3.42'de, parabolik çanak kolektör tarafından toplanan enerjinin ne kadarının faydalı ısı enerjisine dönüştüğü belirlenmektedir. Bu enerji dönüşümü, sistemin genel verimliliğini doğrudan etkilemekte ve kayıpların minimize edilmesi için hangi alanlarda iyileştirme yapılması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca Denklem 3.49'da, sistemin genel ısı verimliliği hesaplanarak, enerji dönüşüm sürecinde ne kadar enerjinin faydalı hale getirilebildiği analiz edilmektedir.

Son olarak, akışkan sıcaklık artışı ve bunun sistem performansına etkileri, Denklem (3.50), Denklem (3.51) ve Denklem (3.52) ile hesaplanmaktadır. Bu denklemler, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı belirleyerek, enerji dönüşüm

verimliliğini daha detaylı bir şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır. Bu sıcaklık artışı, sistemin enerji dönüşüm verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olup, sistem performansını değerlendirmede kritik bir faktör olarak ele alınmaktadır.

Yapılacak bu analiz ve hesaplamalar parabolik çanak kolektör için geliştirilen 3 farklı alıcı için gerçekleştirilecektir. İlk alıcı olan ve Şekil 3.28’de gösterilen konik spiral alıcı, yüksek yüzey alanı ile güneş ışığını daha etkin bir şekilde toplayarak, ısı transferini artırmayı hedeflemektedir. Bakırın yüksek ısıl iletkenliği sayesinde, sistemdeki ısı kayıplarının minimize edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması beklenmektedir.

Diğer bir alıcı olan ve Şekil 3.24’te gösterilen kaviteli tüp alıcı, iç kısmında ısının daha uzun süre tutulmasını sağlarken, dış etkenlerden kaynaklanan ısı kayıplarını da minimize etmektedir. Bu yapı, ısı enerjisinin daha verimli bir şekilde hapsedilmesine ve kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Son alıcı olan ve Şekil 3.26’da gösterilen kavitesiz tüp alıcı, daha basit bir yapıya sahip olup, sistemdeki ısıl performansı değerlendirirken bir referans noktası olarak kullanılacaktır. Kavitesiz tüp alıcının performansı, diğer alıcı tipleriyle karşılaştırılarak, sistemin genel verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilecektir. Çizelge 4.2’de konik spiral alıcıya ait ısıl performans giriş çıkış parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Konik spiral alıcı ısıl performans parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Güneş Radyasyonu (DNI)	615.44	W/m ²
Ortam Sıcaklığı	32.3	°C
Rüzgâr Hızı	0.41	m/s
Parabolik Çanak Çap	2	m
Alıcı Çap	0.3	m
Su giriş Sıcaklığı	55	°C
Kütleli Debi	0.02	kg/s
Radyasyon Kaybı	22.81	W
Konvektif Kayıp Katsayısı	26.52	W/m ² -K
Konveksiyon Kaybı	83.76	W
İletim Kaybı	7.14	W
Rüzgâr Kayıp Katsayısı	6.2	W/m ² -K
Rüzgâr Kaybı	19.39	W
Su Çıkış Sıcaklığı	95.66	°C
Su Giriş Çıkış Sıcaklık Farkı (ΔT)	40.66	°C

Çizelge 4.2'de verilen veriler, parabolik çanak kolektörün konik spiral alıcısına ait ısı performansını deney verileri üzerinden değerlendirmektedir. Bu performans parametreleri, kolektörün nasıl çalıştığını ve çevresel koşullara nasıl tepki verdiğini göstermektedir. Bu verilere genel olarak bakıldığında, parabolik çanak kolektörün konik spiral alıcısının ısı performansının genel olarak yüksek olduğu söylenebilir.

Sonraki aşamada parabolik çanak kolektörün diğer bir alıcısı olan kaviteli tüp alıcının ısı performans analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler Çizelge 4.2’de verilen konik spiral alıcı analizleri ile benzerdir. Yapısal olarak değişiklik gösterse de prensipte analizler birbirlerine eşdeğer şekilde hesaplanmaktadır. Çizelge 4.3’te kaviteli tüp alıcı ısı performans analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kaviteli tüp alıcı ısı performans parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Güneş Radyasyonu (DNI)	609.88	W/m ²
Ortam Sıcaklığı	32.31	°C
Rüzgâr Hızı	0.56	m/s
Parabolik Çanak Çap	2	m
Alıcı Çap	0.4	m
Su giriş Sıcaklığı	55	°C
Kütleli Debi	0.02	kg/s
Radyasyon Kaybı	34.61	W
Konvektif Kayıp Katsayısı	45.06	W/m ² -K
Konveksiyon Kaybı	225.38	W
İletim Kaybı	9.52	W
Rüzgâr Kayıp Katsayısı	8.45	W/m ² -K
Rüzgâr Kaybı	42.2	W
Yararlı Enerji	2483.69	W
Yoğunlaştırılmış Enerji	2795.41	W
Su Çıkış Sıcaklığı	84.66	°C
Su Giriş Çıkış Sıcaklık Farkı (ΔT)	29.66	°C

Çizelge 4.3'te sunulan veriler, parabolik çanak kolektörün iç kaviteli tüp alıcısına ait ısı performans parametrelerini göstermektedir. Bu veriler, sistemin çevresel koşullar altında nasıl çalıştığını ve enerji üretim performansını nasıl etkilediğini detaylandırmaktadır.

Sonraki aşamada parabolik çanak kolektörün diğer bir alıcısı olan kavitesiz tüp alıcının ısı performans analizleri yapılmıştır. Bu analizler diğer 2 alıcının ısı performans verimleri açısından bir referans noktası olarak kullanılacaktır. Çizelge 4.4’te kavitesiz tüp alıcı ısı performans analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kavitesiz tüp alıcı ısı performans parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Güneş Radyasyonu (DNI)	609.47	W/m ²
Ortam Sıcaklığı	30.26	°C
Rüzgâr Hızı	0.41	m/s
Parabolik Çanak Çap	2	m
Alıcı Çap	0.4	m
Su giriş Sıcaklığı	55	°C
Kütleli Debi	0.02	kg/s
Radyasyon Kaybı	36.3	W
Konvektif Kayıp Katsayısı	45.06	W/m ² -K
Konveksiyon Kaybı	120.8	W
İletim Kaybı	9.94	W
Rüzgâr Kayıp Katsayısı	6.2	W/m ² -K
Rüzgâr Kaybı	32.4	W
Su Çıkış Sıcaklığı	76.33	°C
Su Giriş Çıkış Sıcaklık Farkı (ΔT)	21.33	°C

Çizelge 4.4'te sunulan veriler, parabolik çanak kolektörün kavitesiz tüp alıcısına ait ısı performans parametreleri gösterilmiştir. Bu veriler, sistemin çevresel ve işletme koşullarında nasıl çalıştığını ve enerji üretim performansını nasıl etkilediğini değerlendirmemize olanak tanımaktadır.

4.2. Termal Analiz Modellemeleri

Termal analizler, parabolik çanak ve oluk tipi alıcı sistemlerinin akış ve ısı davranışlarının simülasyon yoluyla incelenmesini amaçlamaktadır. Bu analizler, yüksek doğrulukla termal ve akışkan dinamiği performansını değerlendirmek için kullanılan sayısal yöntemlere dayanmaktadır. Simülasyonlar, gerçek dünyada deneysel olarak ölçülmesi zor veya pahalı olabilecek koşulları detaylı bir şekilde inceleyerek, sistem tasarımı ve optimizasyonu için kritik bilgiler sağlayacaktır.

Bu bölümde, çeşitli parabolik çanak ve oluk alıcı modellerinin ısı performansları ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. İlk olarak, Parabolik Oluk Alıcı Modellemesi üzerinde durulmuş ve bu tip alıcıların akış ve termal özellikleri simüle edilmiştir. Bu model, özellikle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan oluk tipi alıcıların performansını artırmak amacıyla gerçekleştirilen analizleri içermektedir.

Bu bölümde, parabolik oluk alıcı, parabolik çanak konik spiral alıcı, parabolik çanak kavite tüp alıcı ve parabolik çanak düz tüp alıcı modelleri ele alınmıştır. Her bir alıcı tipi için, ANSYS yazılımı kullanılarak akış ve termal analizler gerçekleştirilmiştir

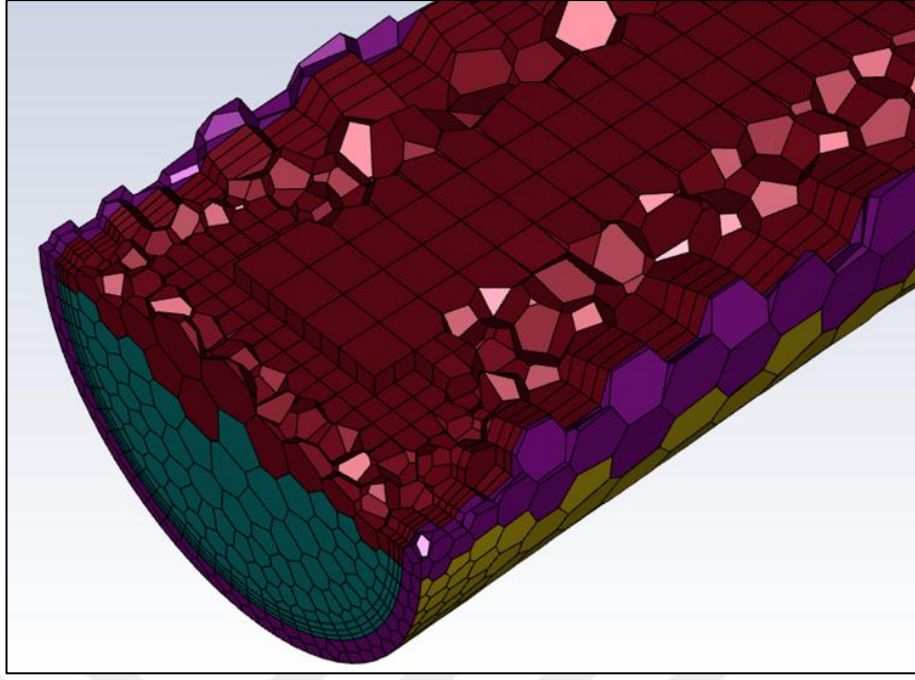
(ANSYS, 2025). Bu analizlerde, her alıcının geometrik ve tasarım özelliklerine göre simülasyonlar yapılmış ve çıkış parametreleri incelenmiştir. Çıkış sıcaklıkları, ısı verimlilikler ve diğer kritik performans göstergeleri değerlendirilerek, farklı alıcı tiplerinin optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, her bir alıcı tipi için performans karşılaştırmaları yapılarak, çalışma koşulları ve tasarım parametreleri için performans sonuçları incelenmiştir.

4.2.1. Parabolik oluk kolektör alıcı modellemesi

Bu bölümde, parabolik oluk kolektörlerin alıcısının termal ve yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi için ANSYS yazılımı kullanılarak bir modelleme yapılacaktır. ANSYS, mühendislik simülasyonları için yaygın olarak kullanılan güçlü bir analiz aracıdır ve bu çalışmada kolektör alıcısının termal performansını değerlendirmek için kullanılacaktır. Bu bağlamda, alıcının termal davranışını simüle ederek farklı çalışma koşullarında verimlilik analizleri gerçekleştirilecektir.

Parabolik oluk kolektörün alıcısının ANSYS yazılımı ile modellenmesi sürecinde belirli aşamalar izlenecektir. İlk olarak, alıcının üç boyutlu geometrisi ANSYS ortamında oluşturulacak ve bu geometriye uygun malzeme özellikleri tanımlanacaktır. Geometrik modelin ardından, hassas bir analiz için gerekli olan ağ (mesh) yapısı oluşturulacak, bu yapının doğruluğu artırılacaktır. Simülasyon sırasında, kolektörün maruz kalacağı çalışma koşulları belirlenip uygun sınır koşulları tanımlanacaktır. Ardından, termal analizler gerçekleştirilerek sıcaklık dağılımı gibi temel performans göstergeleri değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, alıcının termal performansı incelenerek diğer alıcılar ile karşılaştırmaları gerçekleştirilecektir.

Mesh yapısı, parabolik oluk kolektör alıcısının ANSYS simülasyonlarındaki doğruluğunu belirleyen kritik bir faktördür. Alıcının karmaşık geometrisi, özellikle odak hattı ve alıcı boru yüzeyi gibi bölgelerde daha ince bir mesh kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle alıcıya ait su girişi ve çıkışı bölgelerinde daha sık bir mesh yapısı kullanılacaktır. Şekil 4.1’de parabolik oluk kolektör alıcısına ait mesh yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Parabolik oluk kolektör alıcı mesh modellemesi

Görseldeki parabolik oluk kolektör alıcısının ANSYS mesh modellemesi, karmaşık bir geometriye sahip sistemler için optimize edilmiş bir ağ yapısını göstermektedir. Mesh modellemesi, alıcının içyapısını ve yüzeyini doğru bir şekilde temsil etmek için farklı eleman tiplerinin kullanıldığını ortaya koymaktadır.

Modellemede çeşitli boyutlarda heksaedral (küp şekilli) ve poligonal (çokgen) elemanlar kullanılmıştır. Alıcının yüzeyi ve çapraz kesit bölgeleri, daha yoğun ve daha küçük elemanlarla modellenmiş; bu sayede, yüksek doğruluk gerektiren bu bölgelerdeki termal ve yapısal analizlerin hassasiyeti artırılmıştır.

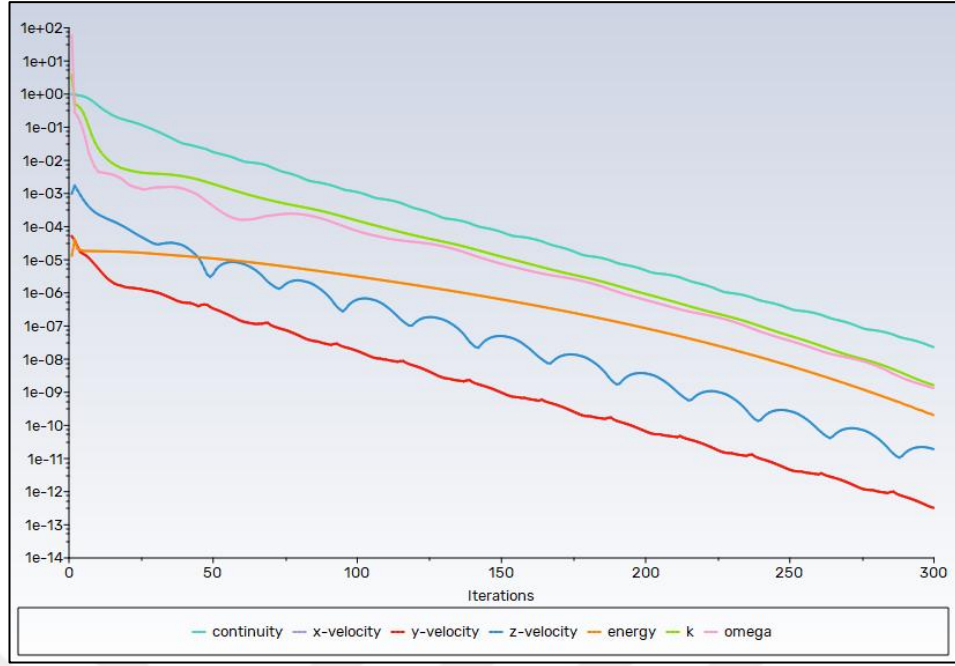
Bu bölümde, parabolik oluk kolektör alıcısının performansını değerlendirmek amacıyla farklı boru çapları ve kütleli debiler kullanılarak toplamda dokuz farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Alıcı borunun çapı ve akışkanın kütleli debisi, sistemin termal performansı ve verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan kritik parametrelerdir. Bu nedenle, çalışmanın amacı, farklı çap ve debi seçeneklerinin alıcının termal verimliliği üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemektir.

Analizlerde üç farklı boru çapı (10 mm, 20 mm, 30 mm) kullanılmış ve her bir boru çapı için üç farklı kütleli debi (0.01 kg/sn, 0.02 kg/sn, 0.03 kg/sn) uygulanmıştır. Bu

varyasyonlar, toplamda dokuz farklı senaryo oluşturarak, alıcı borunun performansını etkileyen çeşitli çalışma koşullarının analizini mümkün kılmıştır.

Termal analiz simülasyonları gerçekleştirilirken sonlu elemanlar yöntemi karşımıza çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik ve fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere ve malzeme özelliklerine sahip sistemlerin davranışını anlamak için problemi daha küçük, basit parçalara, yani elemanlara bölerek çözümler. Her bir eleman için fiziksel denklemler oluşturulup birleştirilir ve bu şekilde tüm sistemin genel davranışı hesaplanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesap yapılırken iteratif çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Bu iterasyonlar başlangıçta tahmin edilen bir çözümle başlamakta ve bu çözüm adım adım iyileştirilerek nihai sonuca ulaşılmaktadır. Sonlu elemanlarda iterasyonlar her bir adımda düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri, gerilmeleri, sıcaklıkları veya diğer ilgilenilen büyüklükleri güncellemektedir. Bu güncellemeler, sonuçlar belirli bir yakınsama kriterine ulaşana kadar devam eder. Bu kriter, ardışık iterasyonlar arasındaki farkın kabul edilebilir bir seviyeye inmesiyle sağlanmaktadır. Yakınsama kriterleri genellikle yer değiştirme, enerji, rezidüel hatalar veya diğer fiziksel büyüklükler üzerindeki değişikliklere göre tanımlanmaktadır. Şekil 4.2’de analizlerde kullanılan yakınsama kriterlerinin iterasyon sayısına göre değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Termal analiz yakınsama kriter değişimleri

Şekil 4.2’de gösterilen yakınsama kriterleri (hata oranları) analiz gerçekleştirilirken analize ait sonuçların ne zaman yakınsamaya girdiğini belirtmektedir. Yakınsama sağlanması analizin doğru bir şekilde sonuç verdiğini göstermektedir. Bu nedenle yakınsama hata kriterlerinin analiz öncesinde azami değerlerinin belirlenmesi veya analiz sırasında hata kriterlerinin göz ardı edilebilecek seviyeye inmesi beklenmelidir. Şekilde gösterilen yakınsama kriterlerinden continuity (süreklilik), akışkanın kütle korunumunu sağlamak için kullanılmakta ve akışkanın kütle korunumu açısından hesaplanan hatalarını temsil etmektedir. Süreklilik hatasının 10^{-3} - 10^{-6} arasında olması kabul edilebilir bir değerdir.

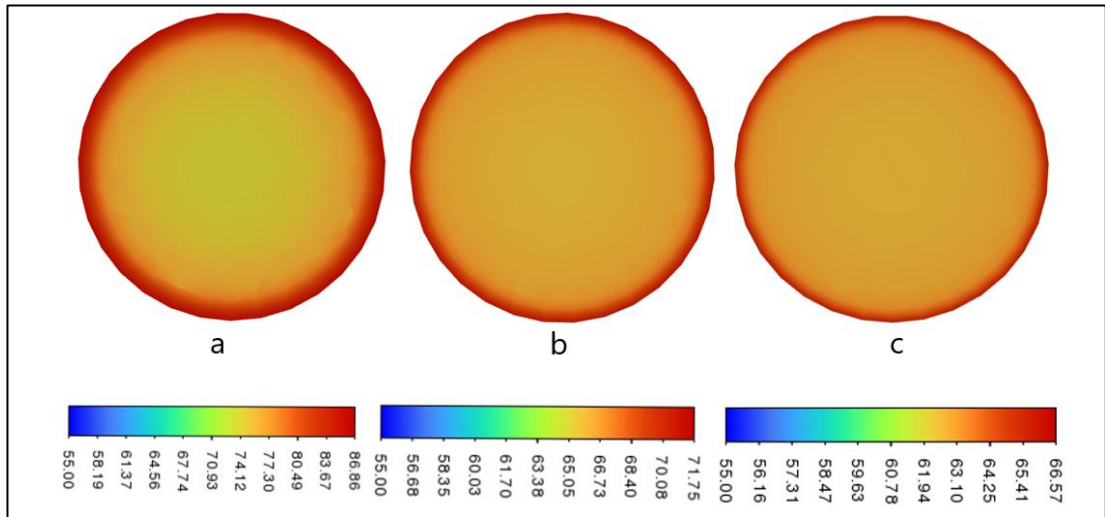
X-Y-Z velocity (hız) değerleri, akışkanın veya parçacıkların modelin X-Y-Z eksenini boyunca olan hareketini temsil etmektedir. Bu kriter eğrileri X-Y-Z yönünde hesaplanan hız bileşenlerindeki hataları göstermektedir. İterasyonlar boyunca bu hataların azalması, X-Y-Z yönündeki hız bileşenlerinde yakınsama sağlandığını göstermektedir. Hız hatalarının 10^{-3} - 10^{-6} arasında olması kabul edilebilir bir değerdir.

Diğer bir hata olan enerji, modeldeki ısı transferi ve enerji korunumu ile ilgili hesaplamaları içermektedir. Grafikte görülen enerji eğrisi, enerji denklemi ile hesaplanan hataları temsil etmektedir. İterasyonlar boyunca enerji hatalarının

azalması, modelin enerji dengesinin sağlandığını göstermektedir. Enerji hatasının 10^{-7} - 10^{-8} arasında olması kabul edilebilir bir değerdir.

Grafikte verilen K değeri, türbülans modellerinde kullanılan türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir. K eğrisi, türbülans kinetik enerjisi için hesaplanan hataları göstermekte ve 10^{-3} - 10^{-5} değerleri arasında yakınsama göstermektedir. Son olarak omega ise türbülans viskozitesini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu değer, türbülanslı akışların doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır ve 10^{-3} - 10^{-5} değerleri arasında yakınsama göstermektedir.

Sonuç olarak, sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizlerde rezidüel hataların titizlikle izlenmesi, modelin doğruluğu ve güvenilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Continuity, hız bileşenleri (X, Y, Z), enerji, türbülans kinetik enerjisi (K) ve omega gibi değişkenler için yakınsama sürecinde rezidüel hataların belirli bir eşik değerin altına indirilmesi, analiz sonuçlarının geçerliliğini ve fiziksel gerçekliği yansıttığını gösterecektir. Bu nedenle çalışmada yapılan bütün analizler için bu hata değerlerinin belirli sınırlar altında tutulması sağlanacaktır. Şekil 4.3'te parabolik oluk kolektörün 10 mm çapa sahip alıcısının farklı kütleli debilerdeki (0.01-0.02-0.03 kg/sn) çıkış analizleri gösterilmiştir.



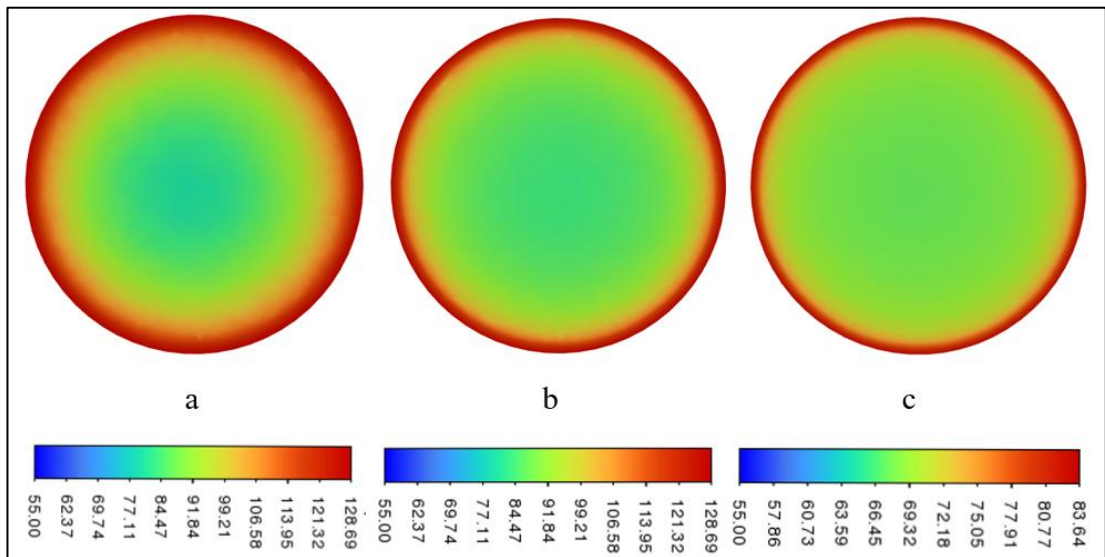
Şekil 4.3. Parabolik oluk kolektör alıcısının (10mm) akışkan çıkış analizleri

Şekil 4.3'te üç farklı kütleli debi durumunda (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) 10 mm çaplı boru için parabolik oluk kolektör alıcılarının termal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Görselde yer alan sıcaklık dağılımlarına göre, her üç durumda da

merkezdeki sıcaklık değerleri düşük olup, çevreye doğru sıcaklıkların artış gösterdiği görülmektedir. En düşük kütleli debiye sahip olan a durumu (0.01 kg/s), 77.18°C'lik ortalama çıkış sıcaklığı ile en yüksek sıcaklığı sağlamıştır. “b” durumunda (0.02 kg/s) ortalama çıkış sıcaklığı 66.65°C olarak belirlenmiş olup, bu değer c durumunda (0.03 kg/s) daha da azalarak 62.96°C olmuştur. Bu sonuçlar, kütleli debinin artmasıyla birlikte akışkanın boru içindeki hızının arttığını, fakat buna bağlı olarak akışkanın boruda daha kısa süre kaldığı için çıkış sıcaklıklarının düştüğünü göstermektedir.

Akışkan hızları incelendiğinde, kütleli debi arttıkça akışkan hızının sırasıyla 0.1295 m/s (a), 0.2590 m/s (b) ve 0.3886 m/s'ye (c) yükseldiği görülmektedir. Bu durum, artan debinin boru içindeki akışkanın hızını doğrudan etkilediğini ve bu hız artışının sıcaklık profili üzerinde belirgin bir etki yarattığını ortaya koymaktadır.

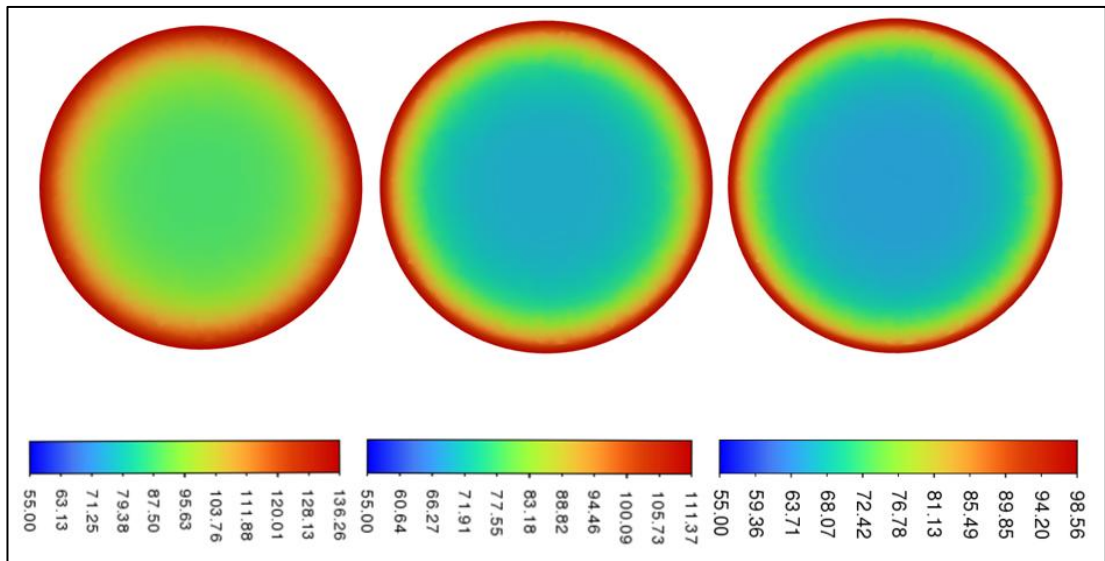
Sonuç olarak, düşük kütleli debide (0.01 kg/s) daha yüksek bir çıkış sıcaklığı elde edilmekte, ancak akışkanın hızının düşük olması nedeniyle sistemde daha uzun süre ısındığı anlaşılmaktadır. Yüksek kütleli debilerde ise (0.03 kg/s) daha düşük çıkış sıcaklıkları gözlemlenmekte olup, bu durum, akışkanın boru içerisinden daha hızlı geçmesi nedeniyle daha kısa süre ısınmasına bağlanmaktadır. Şekil 4.4'te parabolik kolektörün 20 mm çapa sahip alıcısının farklı kütleli debilerdeki (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) çıkış analizleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Parabolik oluk kolektör alıcısının (20mm) akışkan çıkış analizleri

Şekil 4.4'te üç farklı kütleli debi durumunda (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) 20 mm çaplı boru için parabolik oluk kolektör alıcılarının termal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Görseldeki sıcaklık dağılımlarına göre, her üç durumda da boru merkezinde bulunan düşük sıcaklıklar kenarlara geldikçe yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum alıcının aldığı güneş radyasyonu tarafından ısıtılan bölgenin etkisidir. a durumunda (0.01 kg/s) ortalama çıkış sıcaklığı 98.33°C olup, bu durum en düşük kütleli debiye sahip olmasına rağmen en yüksek sıcaklığı sağlamaktadır. Bu, akışkanın boru içerisinden daha yavaş geçmesi nedeniyle daha fazla ısınmasından kaynaklanmaktadır. b durumunda (0.02 kg/s) ortalama çıkış sıcaklığı 78.55°C olarak belirlenmiş olup, c durumunda ise (0.03 kg/s) en yüksek kütleli debiye sahip olup, ortalama çıkış sıcaklığı 70.60°C olarak gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar, kütleli debi arttıkça akışkan hızının yükseldiğini ve bunun da çıkış sıcaklıklarını düşürdüğünü göstermektedir. “a” durumundaki düşük akışkan hızı (0.03193 m/s), akışkanın boru içindeki ısı enerjisi daha fazla absorbe etmesine olanak tanımakta ve bu da daha yüksek bir çıkış sıcaklığına yol açmaktadır. Diğer taraftan, b ve c durumundaki artan akışkan hızları (0.0639 m/s-0.09578 m/s), boru içindeki ısı transfer süresinin kışalmasına neden olmakta ve sonuç olarak daha düşük çıkış sıcaklıkları elde edilmektedir. Şekil 4.5'te parabolik kolektörün 30 mm çapa sahip alıcısının farklı kütleli debilerdeki (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) çıkış analizleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Parabolik oluk kolektör alıcısının (30mm) akışkan çıkış analizleri

Şekil 4.5'te üç farklı kütleli debi durumunda (0.01 kg/s, 0.02 kg/s, 0.03 kg/s) 30 mm çaplı boru için parabolik oluk kolektör alıcılarının termal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarındaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, a durumunda (0.01 kg/s) ortalama çıkış sıcaklığının 99.72°C olduğu ve akışkan hızının 0.01420 m/s olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük kütleli debinin boru içindeki akışkanın daha uzun süre ısı absorbe etmesine izin verdiğini ve bu nedenle daha yüksek bir çıkış sıcaklığı elde edildiğini göstermektedir. “b” durumunda (0.02 kg/s) ortalama çıkış sıcaklığı 80.18°C'ye düşmekte ve akışkan hızı 0.02841 m/s'ye çıkmaktadır. “c” durumunda (0.03 kg/s), ortalama çıkış sıcaklığı daha da azalarak 72.78°C'ye düşmüş olup, akışkan hızı 0.04263 m/s olarak kaydedilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, kütleli debi arttıkça akışkan hızının yükseldiğini, ancak bununla birlikte çıkış sıcaklıklarının düştüğünü ortaya koymaktadır. “a” durumundaki düşük akışkan hızı, akışkanın boru içerisinde daha uzun süre kalmasını sağlamak ve bu da daha yüksek bir ısı transferine olanak tanımaktadır. “b” ve “c” durumlarında artan akışkan hızları, boru içindeki ısı transfer süresini kısaltmakta ve sonuç olarak daha düşük çıkış sıcaklıkları elde edilmektedir.

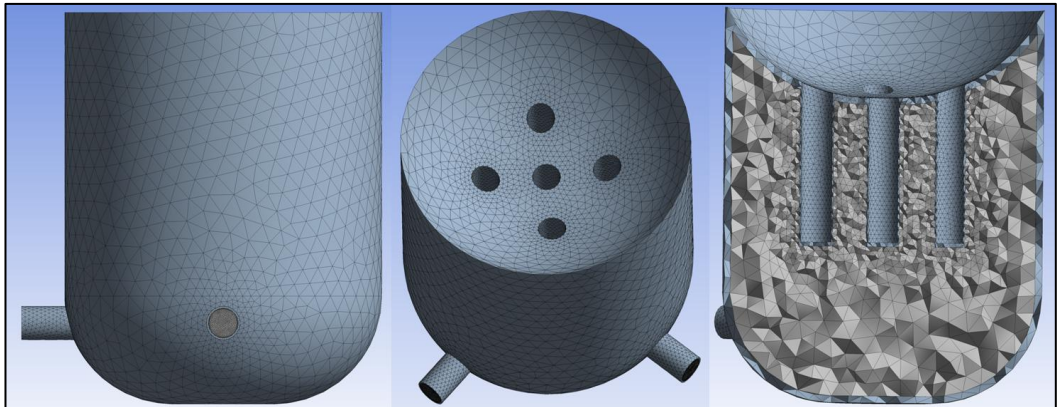
Sonuç olarak her bir boru çapı ve bu borulara ait kütleli debi sonuçları karşılaştırıldığında, boru çapı büyüdükçe, düşük kütleli debilerde yüksek çıkış sıcaklıkları elde edilmekte ve akışkanın hızının daha düşük olması, boru içerisindeki ısı transferini artırmaktadır. Bununla birlikte, daha küçük çaplı borularda, yüksek kütleli debilerde sıcaklık düşüşü daha belirgin hale gelmektedir. Bu, sistemin boyutlandırılması ve termal performansının optimize edilmesi gereken uygulamalarda önemli bir faktördür. Özellikle, yüksek çıkış sıcaklıklarının istenildiği durumlarda daha geniş çaplı borular ve daha düşük debiler tercih edilmelidir. Ancak, debiyi artırmanın akışkan hızını artıracak ve bu nedenle çıkış sıcaklıklarının düşeceği göz önünde bulundurulmalı ve optimum değerler alınmalıdır. Bu analizler sonucunda, 20 mm çapındaki bakır boru, yüksek ortalama çıkış sıcaklığı ve uygun akışkan hızıyla hem ısı transferi hem de hidrolik denge açısından en verimli performansı sunmuştur. Ayrıca, piyasada en yaygın ve kolay bulunabilen boru çapı olması nedeniyle çalışmada tercih edilmiştir.

4.2.2. Parabolik çanak kolektör kavite tüp alıcı modellemesi

Bu bölümde, parabolik çanak kavite tüp alıcının termal performansının sayısal modelleme yoluyla değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Modelleme süreci, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method - FEM) kullanılarak gerçekleştirilecek olup, iki temel aşamadan oluşacaktır: tüpün mesh analizi ve termal analiz. Bu süreçte, FEM'in sunduğu yüksek doğruluk ve çözünürlük avantajlarından yararlanılarak, analizlerin güvenilirliği artırılabilecektir.

İlk aşamada, kavite tüp alıcının geometrik modeli üzerinde detaylı bir mesh analizi yapılacaktır. Mesh yapısının oluşturulmasında, FEM'in doğası gereği, tüp yüzeyi ve içyapısı için uygun eleman boyutları ve şekilleri titizlikle belirlenecektir. Özellikle sıcaklık gradyanlarının yoğun olduğu kritik bölgelerde, daha ince ve yoğun bir mesh yapısı tercih edilerek, analiz sonuçlarının doğruluğu ve kararlılığı sağlanacaktır.

İkinci aşamada, oluşturulan mesh modeli üzerinden FEM tabanlı termal analizler gerçekleştirilecektir. Bu analizler kapsamında, tüp alıcının yüzey sıcaklık dağılımları, ısı transferi ve iç sıcaklık gradyanları FEM kullanılarak incelenecektir. Termal modelleme sürecinde, güneş enerjisinin odaklanması sonucu tüp yüzeyinde ve içyapısında oluşan ısı yüklerinin ve bu yüklerin tüp üzerindeki etkilerinin simülasyonu yapılacaktır. Şekil 4.6'da kaviteli tüp alıcısının gövde mesh modeli gösterilmektedir.

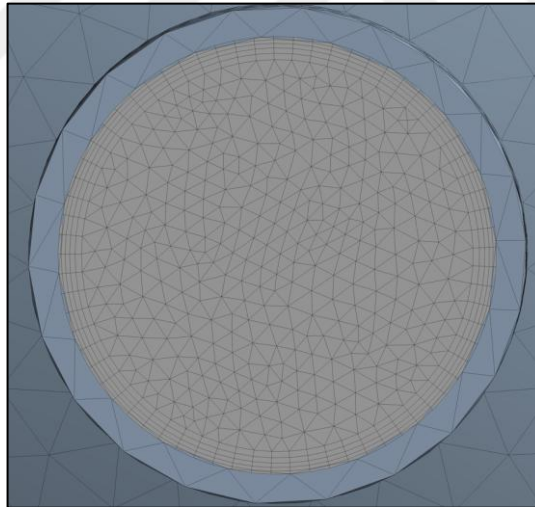


Şekil 4.6. Parabolik çanak kavite tüp alıcı gövde mesh modeli

Şekil 4.6'da gösterilen modellemede, alıcının karmaşık geometrik yapısı dikkate alınarak yüksek doğrulukta bir mesh ağı oluşturulmuştur. Mesh yapısında, üçgen

elemanlar tercih edilmiştir ve bu elemanlar, alıcının yüzeyinde ve iç yapısında yer alan farklı bölgelerde uygun yoğunluklarda kullanılmıştır.

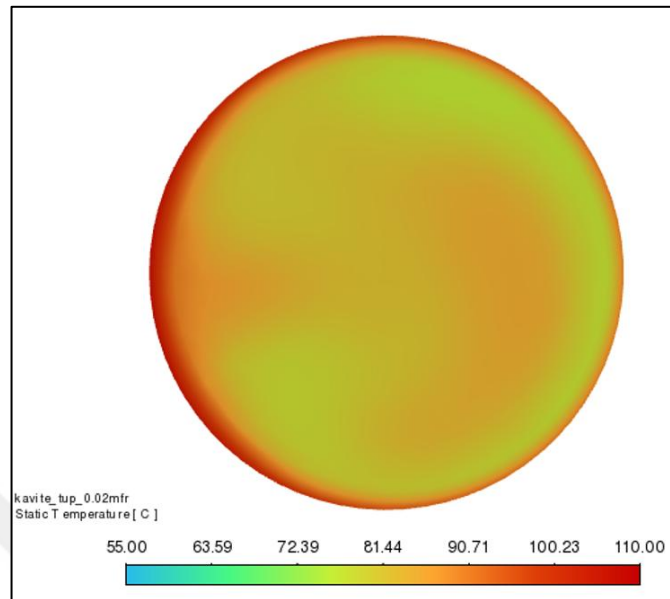
Mesh yoğunluğu, özellikle tüp yüzeyi ve iç bölgelerinde yerel sıcaklık değişimlerini ve ısı transferini hassas bir şekilde simüle edebilmek amacıyla dikkatle ayarlanmıştır. Tüpün kritik bölgelerinde, özellikle çıkış noktası, yüzeydeki delikler ve iç akışkan bölgelerinde, daha küçük boyutlu elemanlar kullanılarak modelleme çözünürlüğü artırılmıştır. Bu yaklaşım, alıcının termal performansını etkileyen yerel fenomenlerin daha iyi yakalanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, tüpün alt ve üst yüzeylerinde, geometrik karmaşıklık nedeniyle yoğun bir mesh ağı uygulanmıştır. Bu strateji, bu bölgelerde meydana gelen termal yüklerin ve ısı transferinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için önemlidir. Kaviteli tüp alıcının analizlerinin gerçekleştirilmesi adına mesh yapısında dikkat edilmesi gereken bir diğer bölge ise akışkan çıkış bölgesidir. Şekil 4.7’de kaviteli tüp alıcıya ait akışkan çıkış bölgesinin mesh yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Parabolik çanak kavite tüp alıcı akışkan çıkış bölgesi mesh modeli

Şekil 4.7’de parabolik çanak kavite tüp alıcısının akışkan çıkış bölgesine ait mesh yapısı gösterilmektedir. Mesh yapısında, akışkan çıkış bölgesinin dairesel geometrisi göz önünde bulundurularak üçgen elemanlar tercih edilmiştir. Bu elemanlar, çıkış bölgesinin kenarlarına doğru daha yoğun olacak şekilde yerleştirilmiştir. Özellikle kenar bölgelerinde elemanların daha küçük boyutlarda seçilmesi, bu kritik bölgede meydana gelen yerel sıcaklık değişimlerinin ve ısı transferinin daha hassas bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, görselde elemanların düzgün bir dağılımı gözlemlenmektedir.

temsil etmektedir. Şekil 4.9’da kaviteli tüp alıcısına ait akışkan çıkış analizi gösterilmiştir.



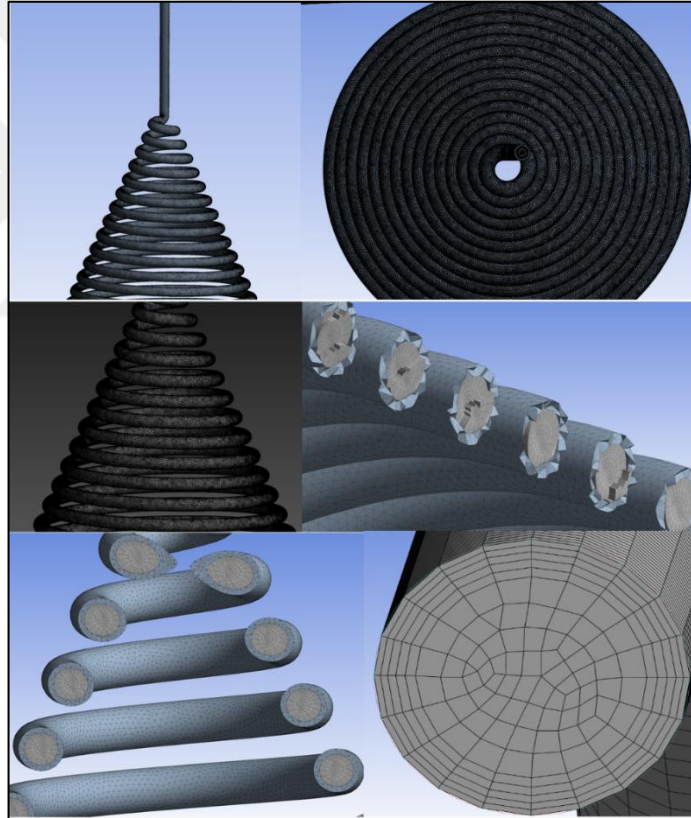
Şekil 4.9. Parabolik çanak kaviteli tüp alıcı akışkan çıkış analizi

Şekil 4.9’da parabolik çanak kaviteli tüp alıcının akışkan çıkış bölgesine ait sıcaklık dağılımı analiz edilmiştir. Bu analize göre çıkıştaki ortalama sıcaklık değeri 87.21°C olmaktadır. Akışkan çıkışında sıcaklıkların kenarlarda merkezden daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Kenarlarda kırmızı ve turuncu tonlarının baskın olduğu bu alanlar, akışkanın bu bölgelerde daha yüksek bir ısı enerjisi taşıdığını göstermektedir. Merkezde ise, sıcaklıkların daha düşük olduğu ve yeşil tonların ağırlıkta olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, akışkanın merkezde daha düşük bir sıcaklıkla çıkış yaptığını ve kenarlara doğru ısı enerjisinin arttığını işaret etmektedir.

4.2.3. Parabolik çanak kolektör konik spiral alıcı modellemesi

Bu bölümde, parabolik çanak sistemleri için tasarlanan konik spiral alıcının termal performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir sayısal modelleme çalışması gerçekleştirilecektir. Alıcı, ısı transferi açısından optimize edilmiş konik bir yapıya sahip olup, spiral bir boru düzenlemesi ile donatılmıştır. Bu yapı, güneş enerjisinin odaklandığı noktalarda ısı enerjisinin akışkana etkin bir şekilde iletilmesi için tasarlanmıştır.

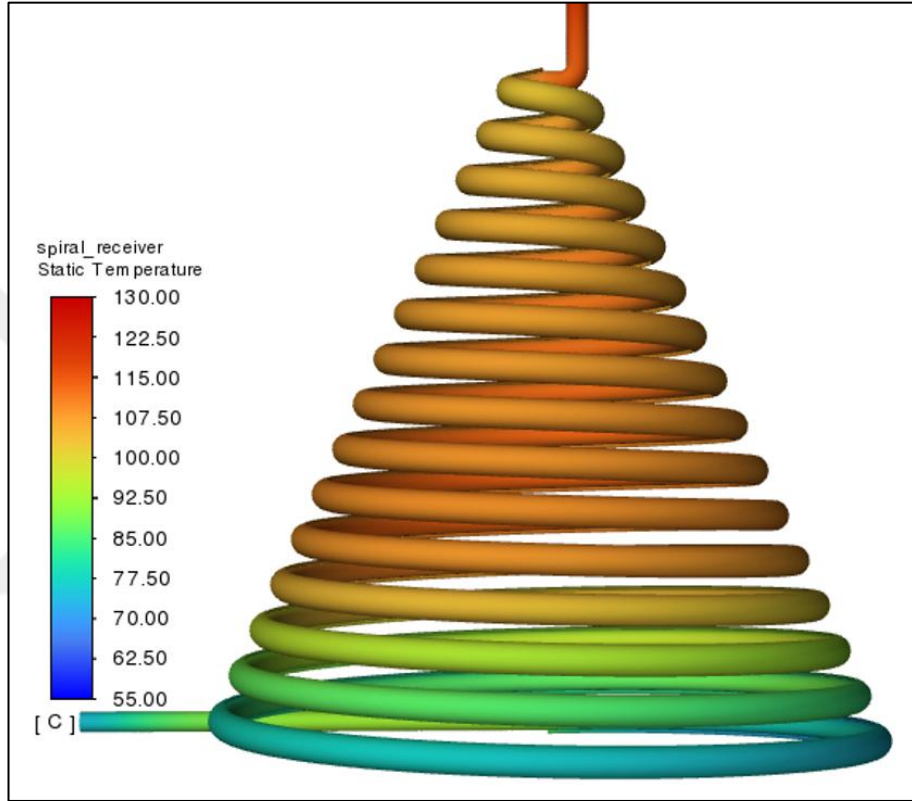
Termal analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacaktır. Analiz sürecinde ilk olarak, alıcının geometrik modeli üzerinden detaylı bir mesh analizi gerçekleştirilecektir. Bu adımda, konik spiral yapının karmaşık geometrik özellikleri dikkate alınarak, hem iç hem de dış yüzeylerde yüksek çözünürlükte bir mesh yapısı oluşturulacaktır. Mesh yoğunluğu, özellikle sıcaklık gradyanlarının yüksek olacağı tahmin edilen spiral boru yüzeylerinde artırılabilecektir. Bu, akışkanın boru boyunca ilerlerken maruz kalacağı ısı yüklerinin daha hassas bir şekilde simüle edilmesine olanak tanıyacaktır. Mesh analizi tamamlandıktan sonra, alıcı üzerinde termal analizler gerçekleştirilecektir. Bu analizlerde, spiral borular içinde akan akışkanın sıcaklık dağılımı ve ısı transferi incelenecektir. Şekil 4.10'da parabolik çanak kolektör konik spiral alıcı mesh modellemesi gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Parabolik çanak konik spiral alıcı mesh modellemesi

Şekil 4.10'da bulunan görselde parabolik çanak sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanan konik spiral alıcının mesh analizlerine ait farklı perspektifler ve detaylar gösterilmektedir. Mesh yapısının genel karakteristiği, spiral boru yapısının karmaşıklığına uygun şekilde optimize edilmiştir. Görselde, alıcının hem makro hem de mikro düzeydeki mesh yapısı detaylandırılmıştır. Spiral boruların düzgün ve

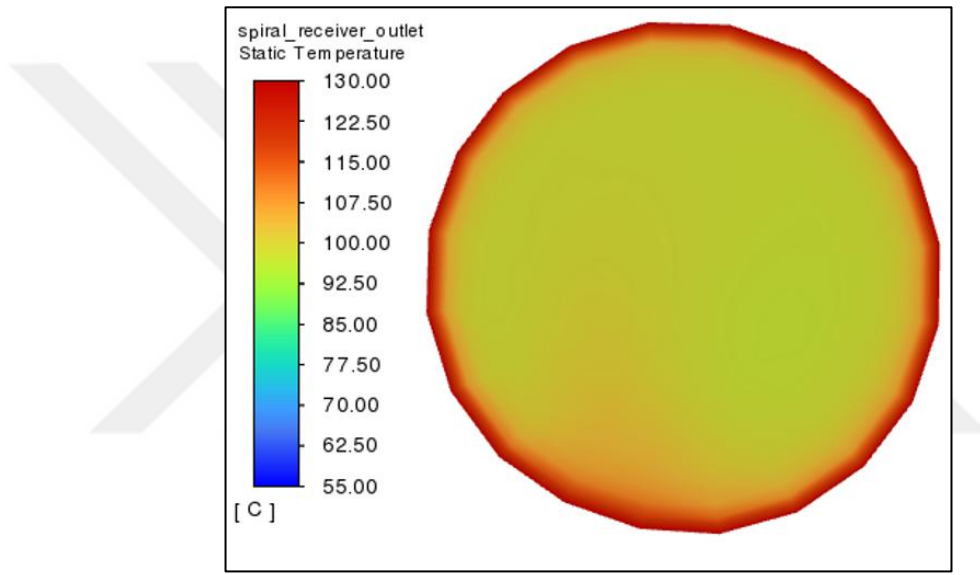
homojen bir şekilde mesh'lenmesi, termal analizlerin doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Mesh elemanlarının boru çevresindeki dağılımı, ısı transferinin doğru bir şekilde modellenmesi amacıyla yoğunlaştırılmıştır. Bu yoğunlaştırılmış mesh yapısı, özellikle spiral yapının iç ve dış yüzeylerinde sıcaklık gradyanlarının doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu sıcaklık dağılımları Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Parabolik çanak konik spiral alıcı sıcaklık dağılımı

Şekil 4.11'de parabolik çanak konik spiral alıcının akışkan sıcaklık dağılımına ilişkin analiz sonuçları gösterilmektedir. Bu analiz, spiral borular boyunca hareket eden akışkanın sıcaklık değişimlerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, akışkanın spiral alıcıya giriş noktasında (en alt kısımda) daha düşük bir sıcaklıkla (55°C) başladığı ve boru boyunca yukarı doğru ilerledikçe sıcaklığının arttığı gözlemlenmektedir. Spiral yapının üst kısımlarında, sıcaklık değerlerinin en yüksek seviyelere (pik değerler) (yaklaşık 110°C) ulaştığı görülmektedir. Bu sıcaklık artışı, akışkanın boru boyunca ilerledikçe güneşten gelen yoğun enerjiyi absorbe etmesi sonucunda gerçekleşmektedir.

Sıcaklık dağılımı, spiral yapının her noktasında düzgün bir artış göstermekte olup, bu da alıcının termal verimliliğinin yüksek olduğunu ve ısının boru boyunca etkin bir şekilde transfer edildiğini göstermektedir. Spiral yapının tasarımı, akışkanın maksimum ısı enerjisini absorbe etmesi için optimize edilmiştir ve bu da alıcının üst kısımlarında daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesini sağlamıştır. Parabolik çanak konik spiral alıcının tasarımının, akışkanın sıcaklığını girişten çıkışa kadar başarılı bir şekilde artırdığını ve bu süreçte ısı transferinin etkin bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Şekil 4.12’de parabolik çanak kolektör konik spiral alıcının akışkan çıkış bölgesi termal analizi gösterilmiştir.

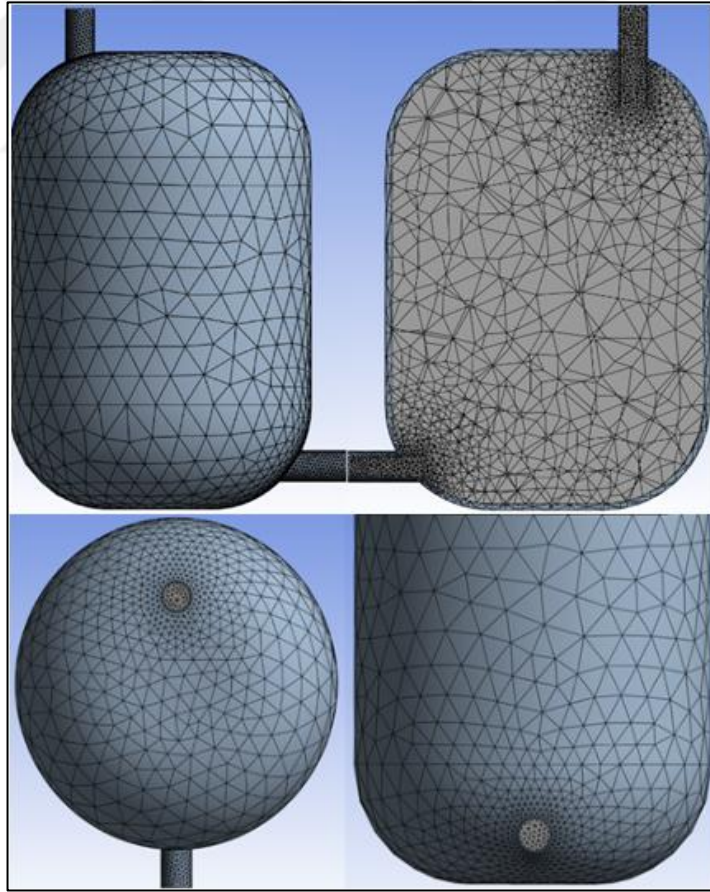


Şekil 4.12. Parabolik çanak konik spiral alıcı çıkış sıcaklık dağılımı

Şekil 4.12’de parabolik çanak kolektör konik spiral alıcısının akışkan çıkışındaki sıcaklık dağılımı analiz sonuçları gösterilmektedir. Renk skalası, akışkanın çıkış noktasındaki sıcaklık değerlerini temsil etmekte olup, merkezdeki renkler nispeten daha düşük sıcaklıkları, kenarlardaki renkler ise daha yüksek sıcaklıkları göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, akışkanın çıkışında ortalama sıcaklık 98 °C olarak hesaplanmıştır. Görselde, merkezden kenarlara doğru belirgin bir sıcaklık gradyanı gözlemlenmektedir. Merkezde, sıcaklıklar daha düşük olup sarı tonlarında yoğunlaşmışken, kenarlarda sıcaklıkların daha yüksek olduğu ve kırmızı tonların hâkim olduğu görülmektedir. Bu durum, kenarlardaki akışkanın merkezdeki akışkana göre daha fazla ısındığını ve bu bölgelerde daha yüksek bir ısı birikimi olduğunu göstermektedir.

4.2.4. Parabolik çanak kolektör kavitesiz tüp alıcı modellemesi

Bu bölümde, parabolik çanak sistemleri için tasarlanan kavitesiz tüp alıcının termal performansını değerlendirmek üzere sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Kavitesiz tüp alıcılar, basit ve etkili bir ısı transfer mekanizması sağlamak amacıyla tasarlanmıştır ve güneş ışınlarının odaklandığı noktada maksimum enerji birikimini hedeflemektedir. Termal analizlerin, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacağı bu çalışmada, alıcının geometrik özellikleri doğrultusunda detaylı bir mesh analizi gerçekleştirilecektir. Mesh yapısının optimize edilmesiyle, akışkanın alıcı içindeki sıcaklık dağılımı ve ısı transferi doğru bir şekilde simüle edilecektir. Bu analizlerin sonucunda, kavitesiz tüp alıcının farklı çalışma koşulları altındaki termal davranışı değerlendirilecek ve bu alıcı sistemde kullanılan diğer alıcılar için bir referans noktası oluşturacaktır. Şekil 4.13'te kavitesiz tüp alıcının mesh model analizi gösterilmiştir.



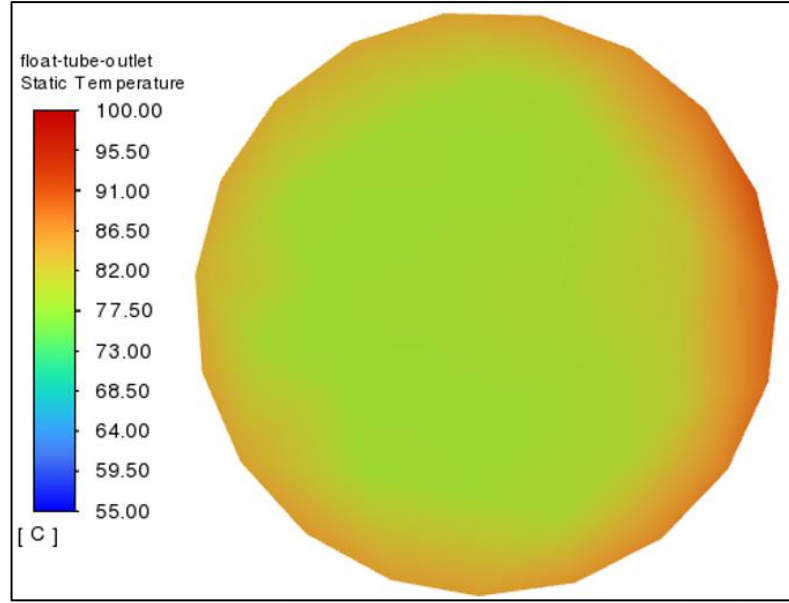
Şekil 4.13. Parabolik çanak kavitesiz tüp alıcı mesh modellemesi

Şekil 4.13'te parabolik çanak kolektör sistemi için tasarlanan kavitesiz tüp alıcının mesh modellemesi gösterilmektedir. Mesh yapısı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulmuş olup, alıcının geometrik özelliklerine göre optimize edilmiştir.

Kavitesiz tüp alıcının mesh modeli, tüpün hem dış yüzeyi hem de iç bölgelerini kapsayacak şekilde detaylandırılmıştır. Üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulan mesh, özellikle alıcının giriş ve çıkış bölgelerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu yoğun mesh yapısı, bu bölgelerde meydana gelebilecek yüksek sıcaklık gradyanlarını ve ısı transferi süreçlerini hassas bir şekilde simüle etmek amacıyla seçilmiştir. Giriş ve çıkış bölgelerinde daha küçük eleman boyutlarının kullanılması, bu alanlarda oluşacak akışkan davranışlarının ve ısı etkilerinin daha doğru bir şekilde yakalanmasını sağlamaktadır.

Alıcının alt ve üst yüzeylerinde, geometrik farklılıklar göz önünde bulundurularak farklı mesh yoğunlukları uygulanmıştır. Özellikle tüpün alt kısmında, daha fazla mesh elemanı kullanılarak sıcaklık dağılımlarının ve ısı yüklerinin doğru bir şekilde modellenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, kavitesiz tüp alıcının tüm yüzeylerinde ısı transferinin etkin bir şekilde simüle edilmesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak, bu mesh modellemesi, parabolik çanak kavitesiz tüp alıcısının termal performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için gerekli olan temel altyapıyı sunmaktadır. Eleman boyutları ve yoğunluklarının optimize edilmesiyle, sistemin genel termal verimliliğini artırmaya yönelik detaylı analizler gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 4.14'te parabolik çanak kolektör kavitesiz tüp alıcısına ait sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Parabolik çanak kavitesiz tüp alıcı çıkış sıcaklık dağılımı

Şekil 4.15'te parabolik çanak kavitesiz tüp alıcısının akışkan çıkış sıcaklık dağılımına ilişkin analiz sonuçları gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, alıcının çıkışındaki ortalama sıcaklık 79.58°C olarak hesaplanmıştır. Görselde, sıcaklığın merkezde nispeten daha düşük olduğu (mavi ve yeşil tonları) ve kenar bölgelere doğru yüksek sıcaklıklara (turuncu ve kırmızı tonları) ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu sıcaklık gradyanı, alıcının çıkış noktasında, akışkanın merkezden kenarlara doğru ısı transferi sürecinde sıcaklık değerlerinin arttığını göstermektedir.

Bu sıcaklık dağılımı, alıcının termal performansının etkinliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Merkezdeki daha düşük sıcaklıklar, akışkanın bu bölgede daha az ısı topladığını göstermektedir. Öte yandan, kenarlardaki yüksek sıcaklıklar, bu bölgelerde ısının daha yoğun bir şekilde biriktiğini ve bu alanların ısı transferinde daha etkili olduğunu işaret etmektedir.

4.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, parabolik çanak ve parabolik oluk kolektörlerin alıcıları üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ayrıntılı olarak değerlendirilecektir. Deneylerde, parabolik oluk kolektörün alıcısı olarak 20 mm çapa ve 3 metre uzunluğa sahip bakır boru kullanılmıştır. Parabolik çanak kolektör için ise kavite tüp alıcı, konik spiral alıcı ve düz tüp alıcı olmak üzere üç farklı alıcı tasarımı incelenmiştir. Bu alıcılar üzerindeki

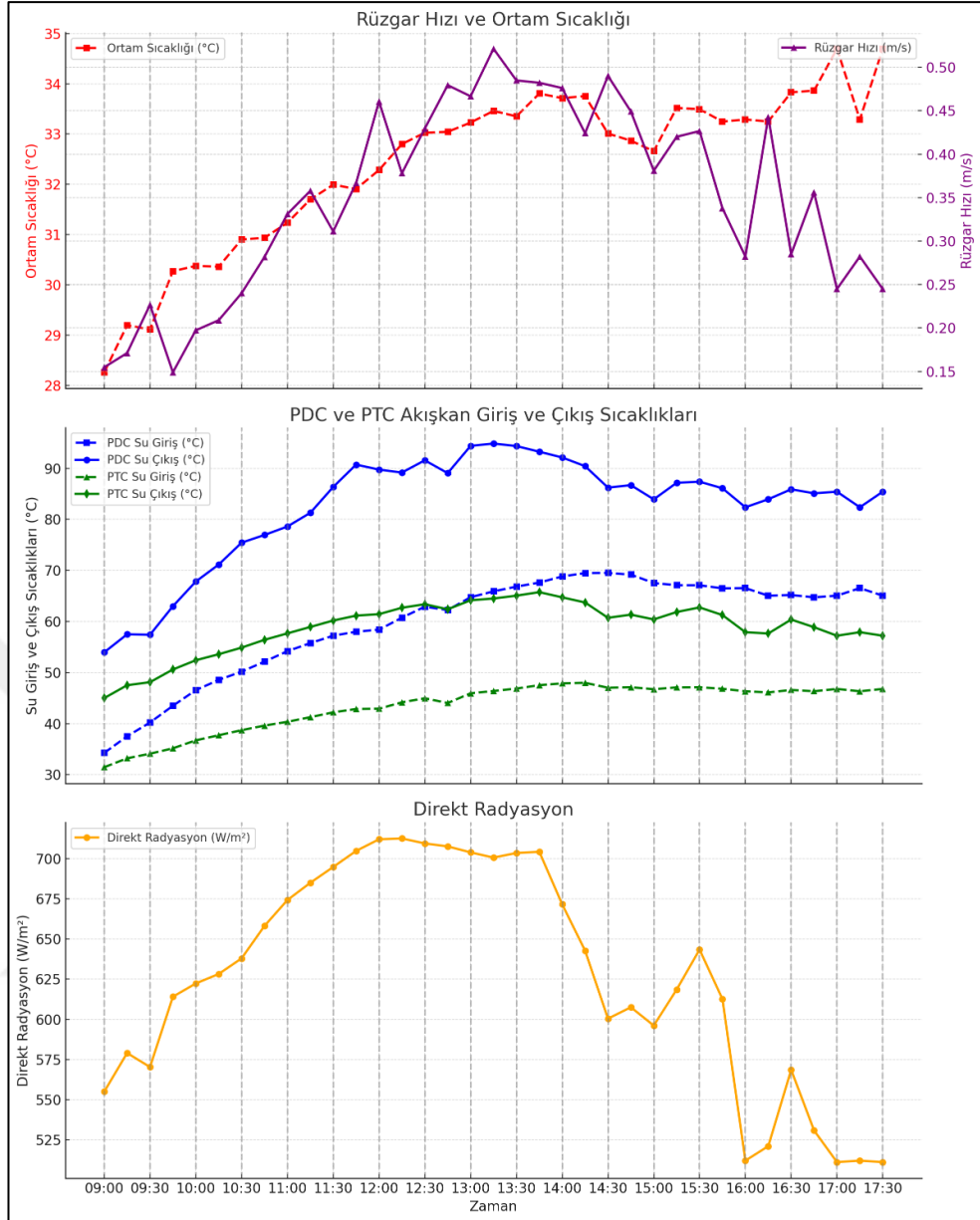
deneysel çalışmalar, sistemlerin performansını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Deneysel bağımlı değişken olarak akışkan çıkış sıcaklığı dikkate alınmıştır. Bağımsız değişkenler ise direkt radyasyon, akışkan giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı olarak belirlenmiştir. Bu değişkenler, sistemlerin termal verimliliği ve genel performansı üzerinde etkili olan temel parametreler olarak seçilmiştir. Yapılan ölçümler ve hesaplamalar, alıcı tipine ve çevresel koşullara bağlı olarak akışkan çıkış sıcaklığındaki değişimlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen veriler, deneysel sonuçların kapsamlı bir şekilde analizi ve karşılaştırılması amacıyla detaylı olarak incelenmiş ve bilimsel bir bakış açısıyla yorumlanmıştır. Bu değerlendirme sürecinde, parabolik çanak ve oluk kolektör sistemlerinin tasarım ve uygulama aşamalarında dikkate alınması gereken kritik parametreler belirlenmiştir. Ayrıca, çevresel değişkenlerin sistem performansına olan etkileri, farklı alıcı tipleri arasında gözlemlenen verimlilik farklarıyla ilişkilendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, her bir parabolik çanak (PDC) alıcısı için üç günlük bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Konik Spiral Alıcı, Kavite Tüp Alıcı ve Kavitesiz Tüp Alıcı sistematik olarak test edilerek performansları analiz edilmiştir. PDC alıcılarıyla yapılan deneyler sırasında, eş zamanlı olarak parabolik oluk (PTC) kolektör sistemi üzerinde de deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, farklı sistemlerin aynı çevresel koşullar altında eş zamanlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.

Her bir alıcı tasarımı için aynı deney koşulları ve prosedürleri uygulanmış, elde edilen veriler, hem PDC alıcılarının kendi aralarındaki performans farklılıklarını hem de PDC ile PTC sistemleri arasındaki karşılaştırmalı değerlendirmeleri detaylı şekilde ortaya koymak amacıyla kaydedilmiştir. Bu yöntem, deney sonuçlarının tutarlılığını ve karşılaştırma analizlerinin doğruluğunu artırmıştır. Şekil 4.16'da parabolik çanağa ait konik spiral alıcılı sistem ve parabolik oluk kolektör sistemi için eş zamanlı deney sonuçlarının 15 dakikalık ortalamasını göstermektedir.



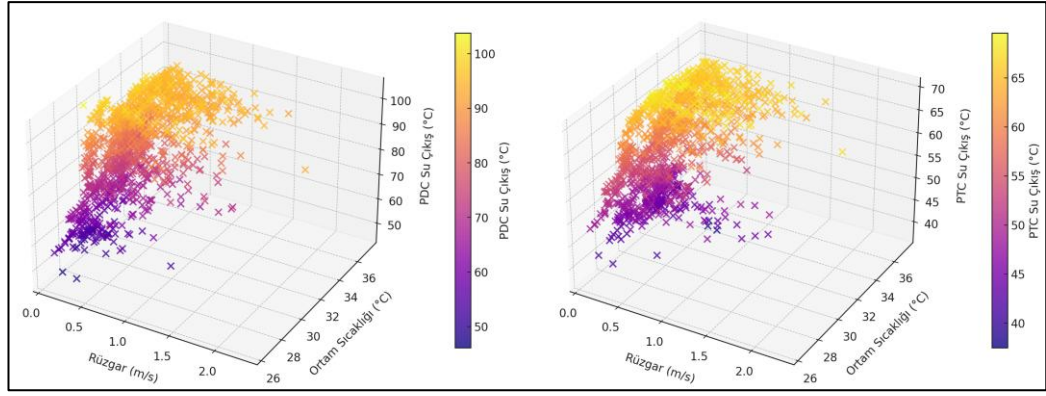
Şekil 4.16. PDC konik spiral alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri

Şekil 4.16’da bulunan grafikler, parabolik çanak (PDC) (Parabolic Dish Collector) sisteminde konik spiral alıcı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara ve aynı zamanda parabolik oluk (PTC) (Parabolic Trough Collector) sistemine ait verilerin zamana bağlı değişimlerini göstermektedir. Bu grafiklerde bağımlı değişken olan PDC ve PTC’e ait akışkan çıkış sıcaklıklarının; direkt radyasyon, rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı ve akışkan giriş sıcaklık değerlerine göre değişimleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde sabah saatlerinden itibaren artış eğilimi gösteren radyasyon değerleri, öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaşmış (yaklaşık 700 W/m²) ve ardından gün boyunca azalarak sonlanmıştır. Bu tipik radyasyon profili, güneş enerjisiyle çalışan sistemlerin performansını doğrudan etkileyen en kritik parametrelerden biridir.

Radyasyon değerlerindeki bu artış ve azalışlar, hem parabolik anak (PDC) hem de parabolik oluk (PTC) sistemlerinin akışkan sıcaklıklarındaki değişimle doğrudan ilişkilidir. PDC ve PTC sistemlerinin akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarına ilişkin grafik incelendiğinde, PDC sisteminde kullanılan konik spiral alıcının termal verimliliğinin PTC sistemine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu görölmektedir. PDC sisteminde, akışkanın çıkış sıcaklıkları gün boyunca yaklaşık 90°C'ye kadar yükselmiştir ve bu, sistemin güneş ısınımını etkin bir şekilde topladığını ortaya koymaktadır. Giriş sıcaklıkları ortalama 60°C civarında seyretmiştir. Bu, PDC sisteminin, gelen radyasyonu termal enerjiye dönüştürme kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

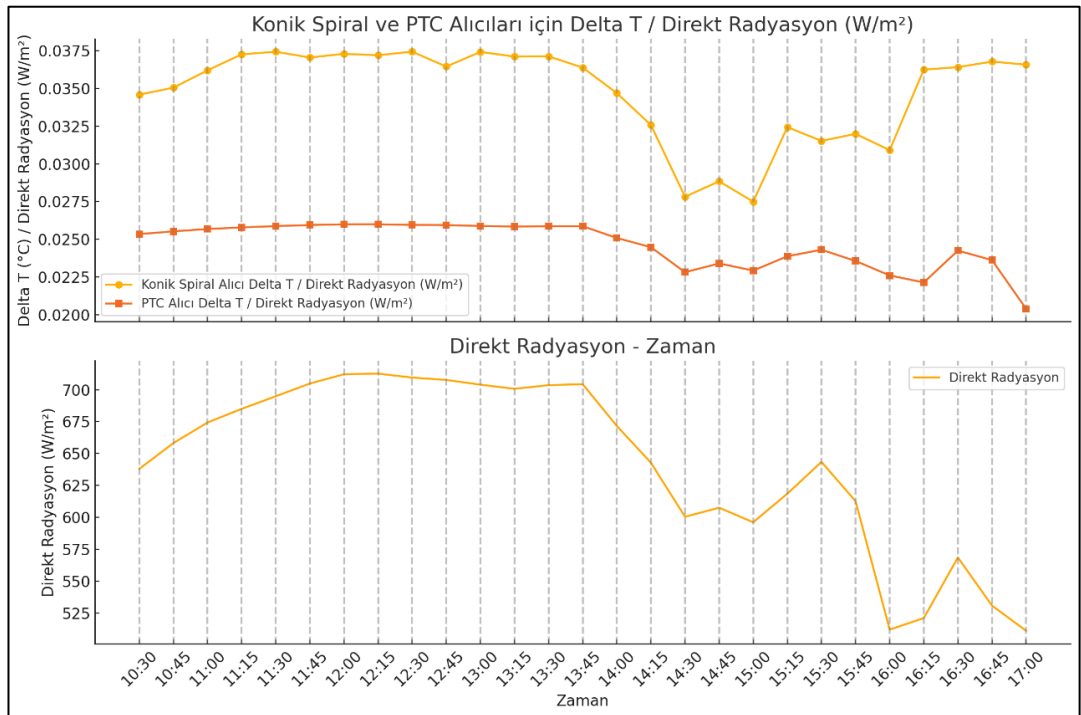
Öte yandan, PTC sisteminde akışkan çıkış sıcaklıkları yaklaşık 60°C seviyelerine ulaşmış, ancak PDC sistemine kıyasla daha düşük bir artış göstermiştir. Bu durum, PTC sisteminin termal verimliliğinin sınırlı olduğunu ve direkt radyasyondan daha az etkin bir şekilde yararlandığını göstermektedir. Her iki sistemde de giriş sıcaklıklarının benzer seyretmesi, başlangıç koşullarının benzer olduğunu, ancak çıkış sıcaklıklarındaki farkın kullanılan alıcı tasarımından (konik spiral) ve sistem eksen farklılığından (tek-çift eksen) kaynaklandığını açıkça ortaya koymaktadır.

Son olarak ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi çevresel parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri, termal yalıtım ve tasarım özelliklerinden dolayı doğrudan bu grafikler üzerinden tam anlamıyla yorumlanamamaktadır. Bu parametrelerin sistem performansına olan katkıları veya olumsuz etkilerinin anlaşılabilmesi için, ölçölen verilerin istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi gerekmektedir. Ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı parametrelerinin akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki ilişkilerin daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi için veri dağılım görselleştirme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17'de rüzgâr ve ortam sıcaklığı bağımsız değişkenlerinin PDC ve PTC akışkan çıkış sıcaklıkları ile olan değişimi gösterilmiştir.



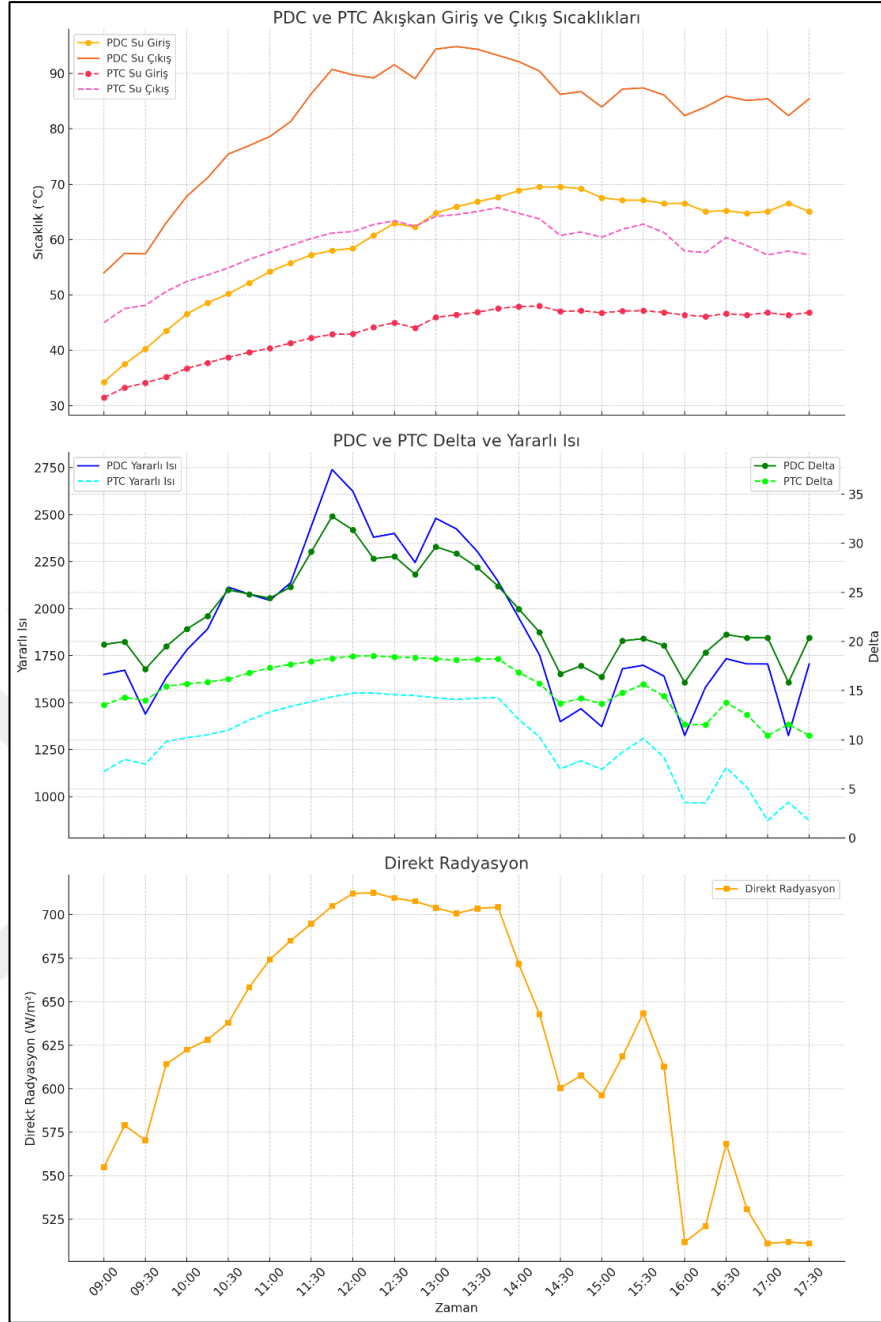
Şekil 4.17. PDC konik spiral alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi

Şekil 4.17’de bulunan grafikler PDC konik spiral alıcı ve PTC sistemlerinin su çıkış sıcaklıklarının, çevresel değişkenler olan ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı ile olan ilişkisini üç boyutlu bir perspektifle sunmaktadır. Grafığe göre konik spiral alıcıya ait akışkan çıkış sıcaklığı, ortam sıcaklığına karşı yüksek hassasiyet sergilerken, rüzgâr hızı daha sınırlı bir etki yaratmaktadır. PTC akışkan çıkış sıcaklığı ise ortam sıcaklığından etkilenmekle birlikte, bu etki daha homojen bir şekilde gerçekleşmektedir. Her iki sistemde de rüzgâr hızının etkisi ortam sıcaklığı kadar belirgin olmamıştır. Parabolik çanak ait konik spiral alıcı ve parabolik oluk sistemlerinin karşılaştırılması adına Şekil 4.18’de sistemlerin birim radyasyon başına elde ettikleri ΔT grafiği ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.18. PDC konik spiral ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri

Şekil 4.18’de gösterilen grafiğe göre direkt radyasyon değişimlerine göre konik spiral alıcı ve parabolik oluk kolektör alıcısının birim radyasyon başına düşen Δ_T değeri pozitif bir korelasyon ile değişim göstermektedir. Konik spiral alıcı, PTC sistemine kıyasla daha yüksek performans sergilemektedir. Özellikle gün ortasında direkt radyasyonun maksimum olduğu saatlerde belirgin bir üstünlük göstermektedir. Bununla birlikte, konik spiral alıcı performansındaki dalgalanmalar, tasarımın çevresel değişimlere daha duyarlı olduğunu işaret etmektedir. PTC sistemi ise daha sabit bir performans eğrisi ile öne çıkmakta ve termal kararlılığı sayesinde tutarlı bir çalışma sergilemektedir. Bu sonuçlar, konik spiral alıcının yüksek enerji dönüşüm kapasitesine sahip olduğunu ancak kararlılık açısından iyileştirmelere ihtiyaç duyabileceğini göstermektedir. Yukarıda verilen grafikleri desteklemek açısından Şekil 4.19’da bu sistemlere ait yararlı ısı, Δ_T , akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.

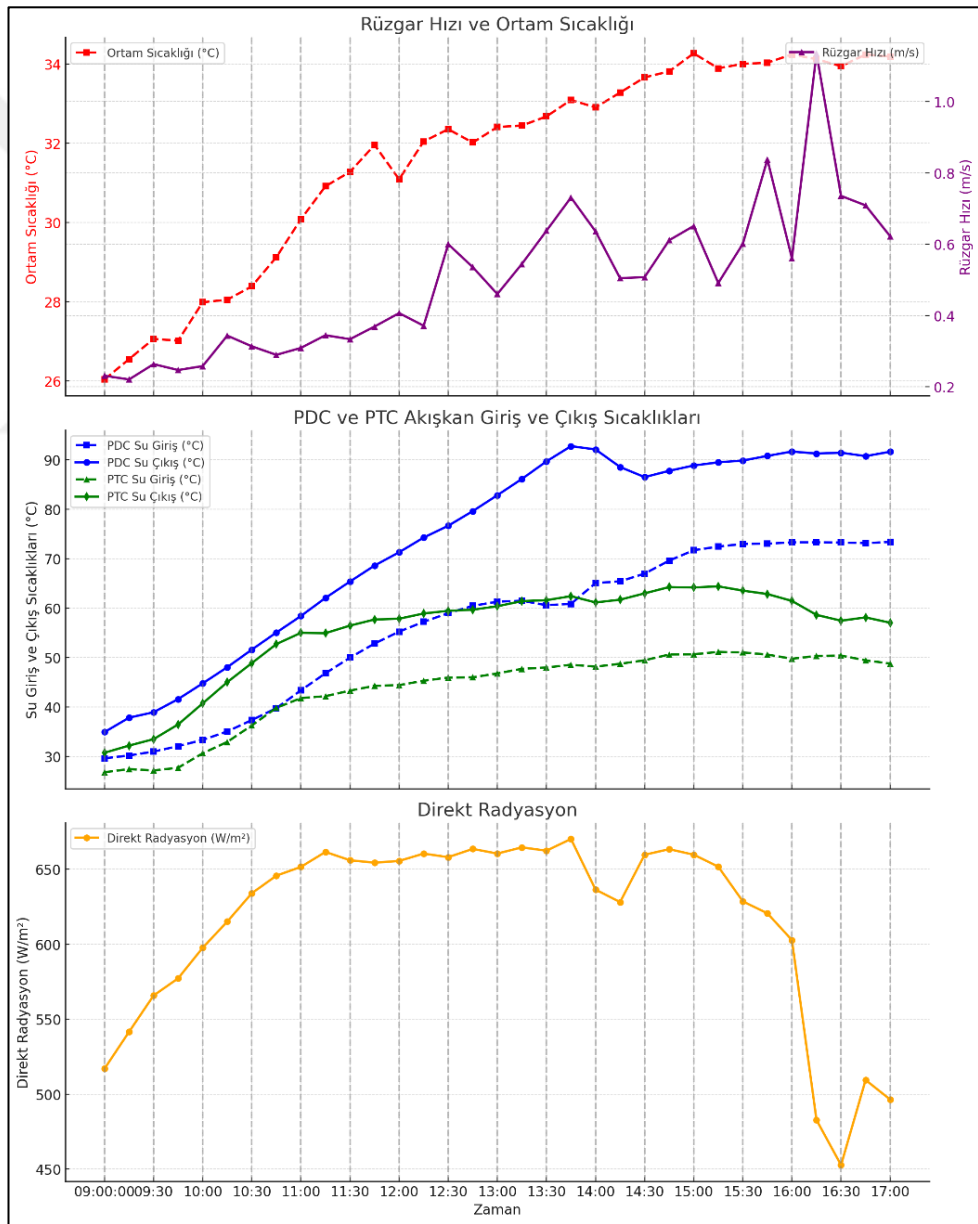


Şekil 4.19. PDC konik spiral ve PTC alıcısı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri

Şekil 4.19’da verilen grafiklere göre, PDC sisteminin PTC’ye kıyasla daha yüksek bir termal performans ve enerji toplama kapasitesine sahip olduğunu açıkça göstermektedir. PDC sisteminin çıkış sıcaklıkları 90°C seviyelerine ulaşırken, PTC sisteminde bu değerler 70°C civarında kalmaktadır. Benzer şekilde, PDC sisteminin delta sıcaklık değerleri zaman içinde 35°C’ye kadar yükselirken, PTC sistemi için bu değer 20°C civarında sabit kalmıştır. Yararlı ısı açısından da PDC sistemi, gün ortasında yaklaşık 2750 W değerine ulaşırken, PTC sistemi maksimumda 1500 W

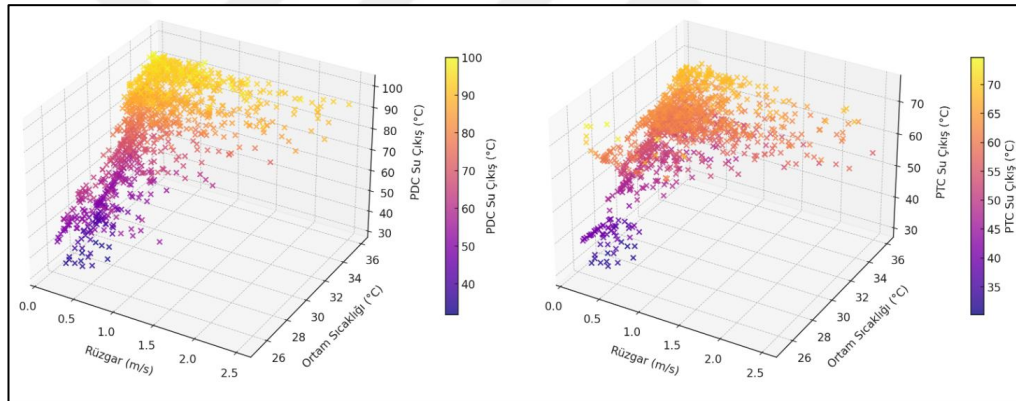
seviyelerinde kalmıştır. Ancak, PDC sisteminin performansı, özellikle direkt radyasyonun azaldığı saatlerde dalgalanmalar göstermektedir. Bu durum, PDC tasarımının çevresel koşullara daha duyarlı olduğunu işaret etmektedir. PTC sistemi ise daha düşük bir performans sergilemesine rağmen termal olarak daha kararlı bir yapıya sahiptir.

Deneyleri yapılan bir diğer PDC alıcısı ise kaviteli tüp alıcısıdır. Şekil 4.20’de parabolik çanağa ait kaviteli tüp alıcılı sistem ve parabolik oluk kolektör sistemi için eş zamanlı deney sonuçlarının 15 dakikalık ortalaması gösterilmiştir.



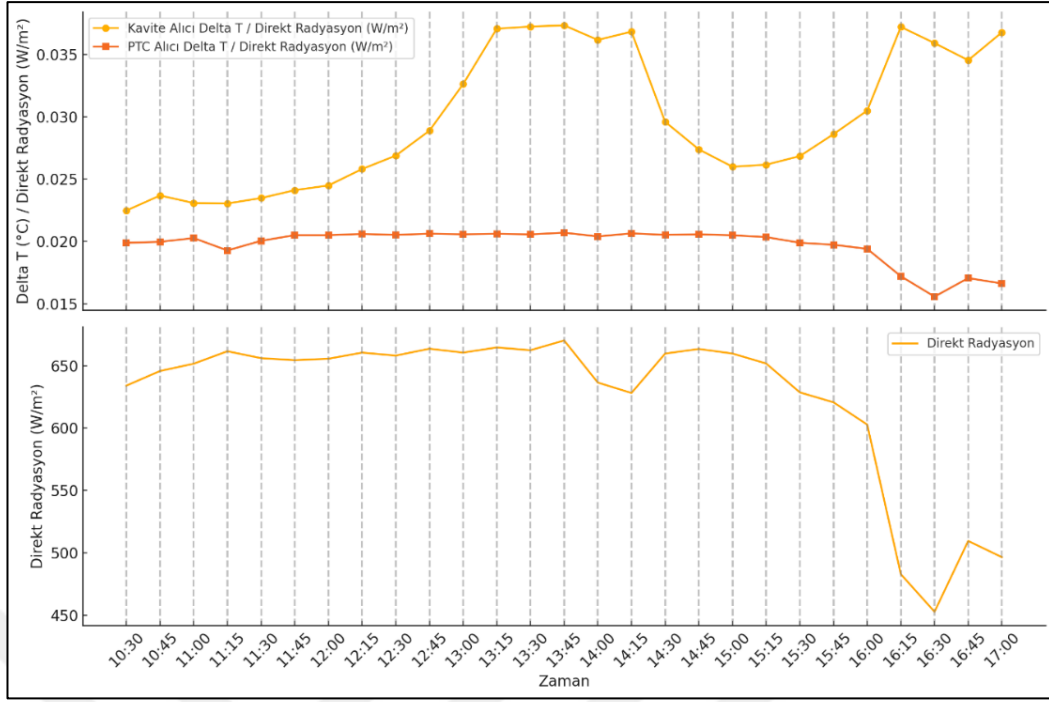
Şekil 4.20. PDC kaviteli tüp alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri

Şekil 4.20’de verilen grafiklere göre, kaviteli tüp alıcı (PDC) sisteminin parabolik oluk alıcı (PTC) sistemine kıyasla daha yüksek bir termal performans sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. PDC’nin kaviteli tüp alıcısına ait çıkış sıcaklıkları, ısı toplama kapasitesi ve termal verimliliği PTC’ye kıyasla oldukça üstündür. Ancak, PDC sisteminin performansı rüzgâr hızındaki ve direkt radyasyondaki değişimlere daha duyarlı görünmektedir. PTC sistemi ise daha sabit bir performans sergilemekte, ancak termal kapasitesi daha sınırlı kalmaktadır. Bu sonuçlar, konik spiral alıcı da olduğu gibi PDC’nin PTC’e göre daha yüksek verimliliği ile öne çıktığını, ancak dış koşullara daha bağımlı bir tasarım sergilediğini göstermektedir. Ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı parametrelerinin akışkan çıkış sıcaklıkları arasındaki ilişkilerin daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi için veri dağılım görselleştirme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21’de rüzgâr ve ortam sıcaklığı bağımsız değişkenlerinin PDC ve PTC akışkan çıkış sıcaklıkları ile olan değişimi gösterilmiştir.



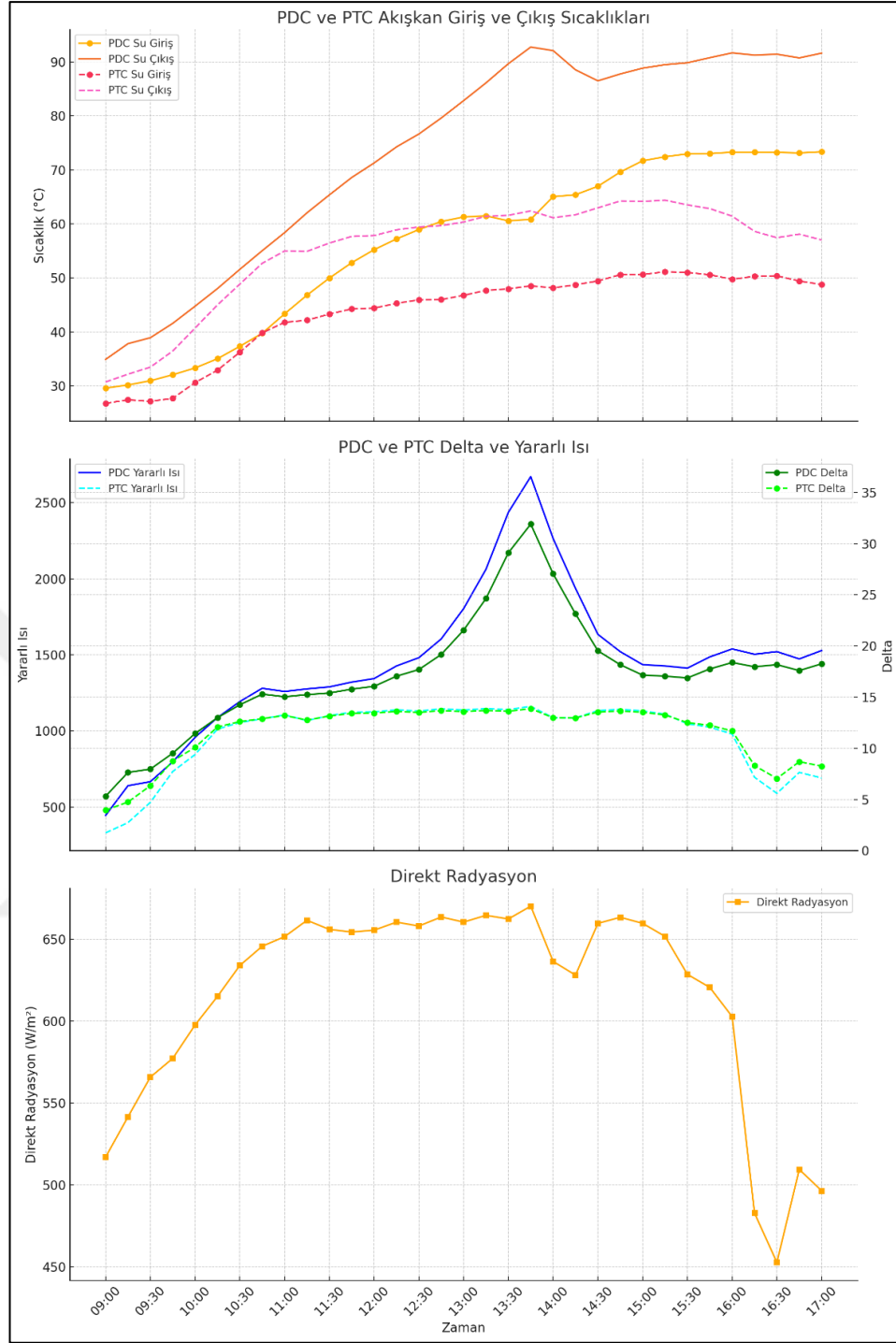
Şekil 4.21. PDC kaviteli alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi

Şekil 4.21’de PDC ve PTC sistemlerine ait çıkış sıcaklıklarının, rüzgâr hızı ve ortam sıcaklığıyla olan ilişkisi üç boyutlu bir perspektifte sunulmaktadır. PDC çıkış sıcaklıkları 40°C ile 100°C arasında değişirken, düşük rüzgâr hızları ve yüksek ortam sıcaklıklarında maksimum değerlere ulaşmıştır. Bu durum, PDC’nin yüksek termal verimlilik sunduğunu ancak çevresel koşullara daha duyarlı olduğunu göstermektedir. PTC çıkış sıcaklıkları ise 35°C ile 70°C arasında daha sınırlı ve stabil kalmış, rüzgâr hızındaki artışlarla performansı belirgin şekilde düşmüştür. Sonuç olarak, PDC’e ait kaviteli tüp alıcı daha yüksek enerji verimliliği sağlarken, PTC alıcısı daha kararlı ancak daha düşük performans sergilemektedir. Parabolik çanak sistemine ait kavite tüp alıcı ve parabolik oluk alıcı karşılaştırılması adına Şekil 4.22’de sistemlerin birim radyasyon başına elde ettikleri ΔT grafiği ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.22. PDC kaviteli tüp ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri

Şekil 4.22’de konik spiral alıcılı sistemde olduğu gibi kaviteli tüp sisteminin de termal performans açısından PTC sistemine göre daha verimli olduğunu açıkça göstermektedir. Kaviteli tüp sistemi, normalize edilmiş ΔT /direkt radyasyon oranlarında belirgin bir üstünlük sağlarken, performansı çevresel koşullara (örneğin, radyasyonun azalması) daha duyarlı görünmektedir. PTC sistemi ise daha düşük termal performans sağlarken sistem olarak daha kararlı bir performans sergilemektedir. Şekil 4.23’te bu sistemlere ait yararlı ısı, ΔT , akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.

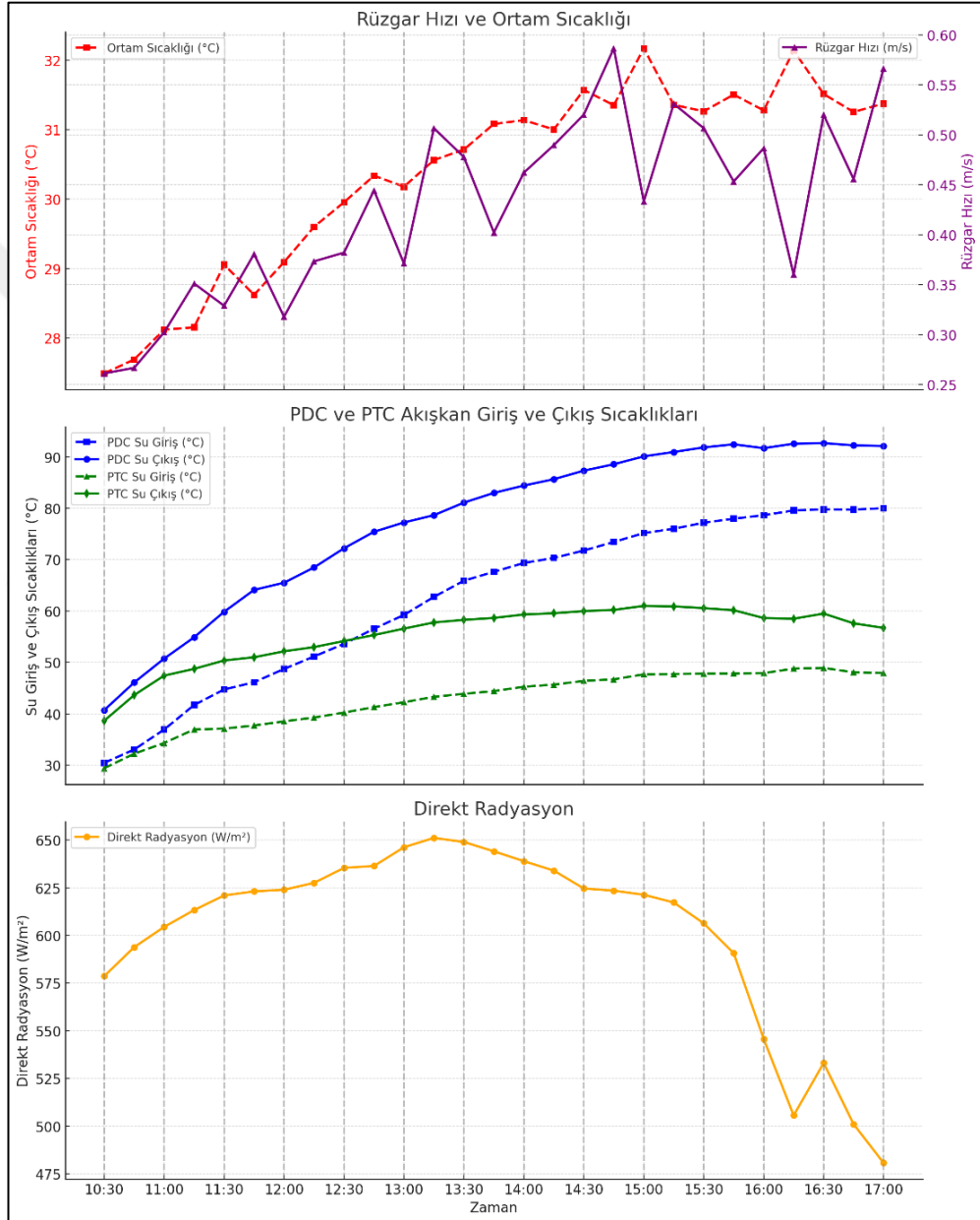


Şekil 4.23. PDC kaviteli tüp ve PTC alıcı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri

PDC'nin PTC'ye kıyasla termal performans açısından belirgin bir üstünlük sağladığını göstermektedir. PDC alıcısının çıkış sıcaklıkları 90°C'ye kadar yükselirken, PTC sistemi yalnızca 70°C seviyelerinde kalmıştır. Benzer şekilde, ΔT değerlerinde PDC 30°C, PTC ise 15°C seviyelerine ulaşmıştır. Yararlı ısı açısından PDC sistemi 2500 W, PTC sistemi ise yalnızca 1000 W seviyesindedir. Ancak, PDC sistemi çevresel

faktörlere (örneğin radyasyon düşüşü) daha duyarlı bir yapı sergilerken, PTC sistemi daha kararlı ancak düşük verimlilikte bir performans göstermektedir.

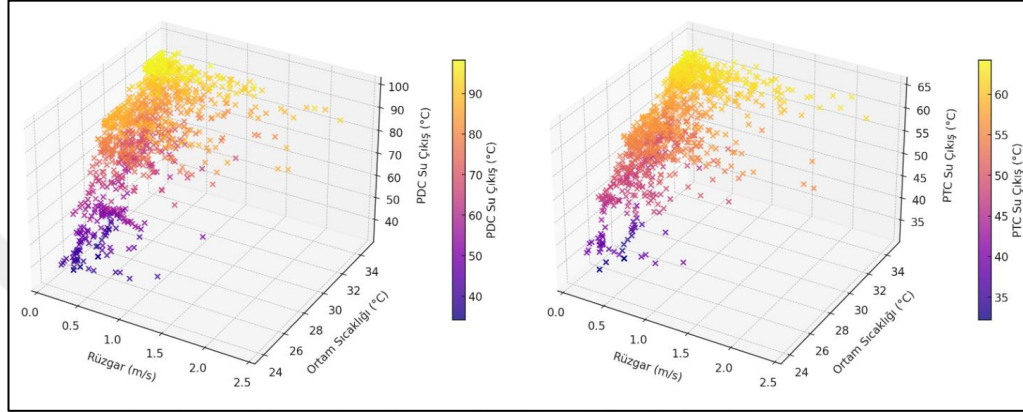
Deneyleri yapılan son PDC alıcısı ise kavitesiz tüp alıcıdır. Şekil 4.24'te parabolik çanağa ait kavitesiz tüp alıcılı sistem ve parabolik oluk kolektör sistemi için eş zamanlı deney sonuçlarının 15 dakikalık ortalaması gösterilmiştir.



Şekil 4.24. PDC kavitesiz tüp alıcı ve PTC bağımlı-bağımsız değişken grafikleri

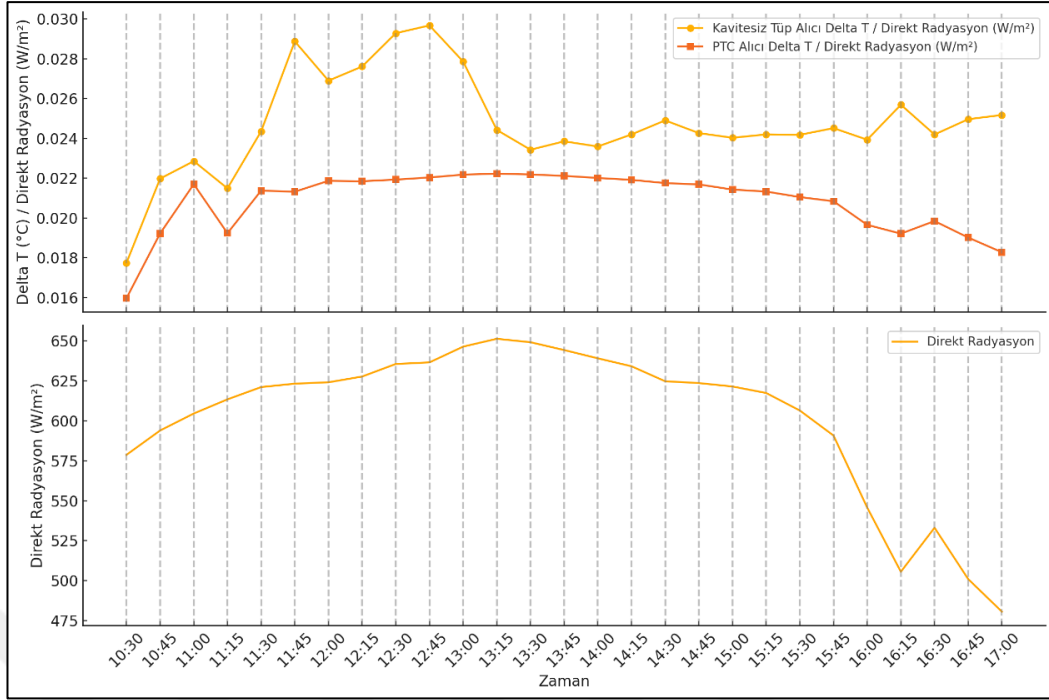
Şekil 4.24'te verilen grafikler, kavitesiz alıcı sisteminin PTC'ye kıyasla termal performans açısından üstün olduğunu göstermektedir. PDC çıkış sıcaklıkları

maksimum 90°C seviyelerine ulaşırken, PTC yalnızca 60°C seviyesinde kalmıştır. PDC alıcısı (kavitesiz tüp) daha yüksek enerji toplama ve dönüştürme kapasitesi sunmakla birlikte, çevresel koşullara daha duyarlı bir yapı sergilemektedir. Buna karşılık, PTC sistemi daha düşük performans sergilemesine rağmen termal olarak daha istikrarlı bir çalışma göstermektedir. Şekil 4.25'te rüzgâr ve ortam sıcaklığı bağımsız değişkenlerinin PDC ve PTC akışkan çıkış sıcaklıkları ile olan değişimi gösterilmiştir.



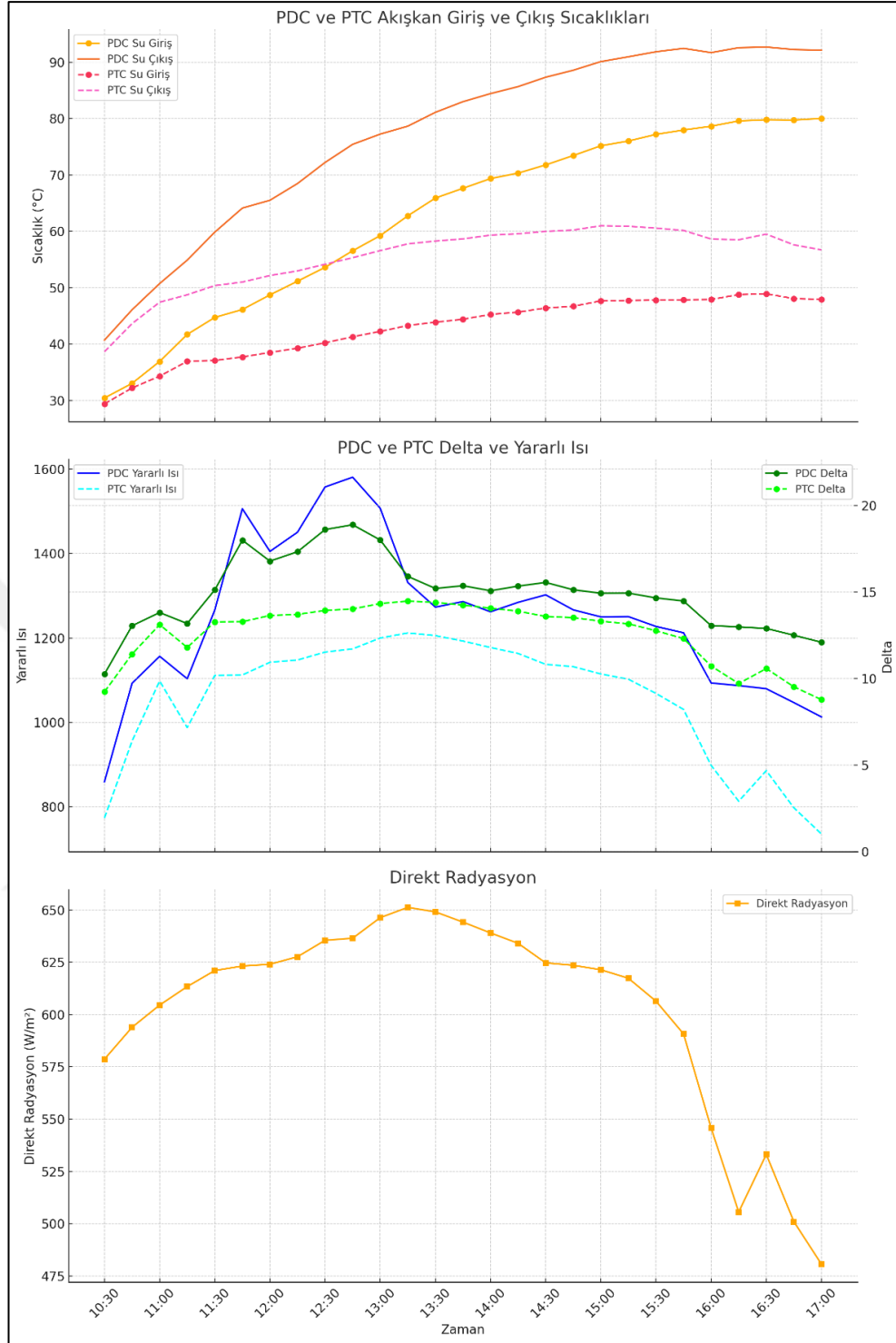
Şekil 4.25. PDC kavitesiz alıcı (sol) ve PTC (sağ) çevresel parametreler analizi

Şekil 4.25'te verilen grafiğin kavitesiz tüp alıcılı PDC sisteminin termal performans açısından PTC'ye kıyasla daha yüksek çıkış sıcaklıkları sunduğu açıkça görülmektedir. PDC'nin çıkış sıcaklıkları hem düşük rüzgâr hızlarında hem de yüksek ortam sıcaklıklarında PTC'den yaklaşık 20-30°C daha yüksektir. Özellikle düşük rüzgâr hızlarında ve yüksek ortam sıcaklıklarında, PDC'nin performansı belirgin şekilde artarak maksimum çıkış sıcaklıklarına ulaşmıştır. PTC ise, daha düşük sıcaklık değerlerinde çalışmasına rağmen çevresel koşullara karşı daha kararlı bir performans sunmaktadır. Bu bulgular, PDC'nin yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygun olduğunu, PTC'nin ise düşük ve orta sıcaklık gereksinimleri için ideal bir seçenek olduğunu göstermektedir. Parabolik çanak sistemine ait kavitesiz tüp alıcı ve parabolik oluk alıcı karşılaştırılması adına Şekil 4.26'da sistemlerin birim radyasyon başına elde ettikleri ΔT grafiği ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.26. PDC kavitesiz tüp ve PTC alıcısı ΔT -DNI değerleri

Şekil 4.26’da kavitesiz tüp alıcı ve PTC alıcının normalize edilmiş $\Delta T /$ direkt radyasyon (W/m^2) performansını zaman içerisinde karşılaştırmaktadır. Kavitesiz tüp alıcı, normalize edilmiş değerlerde PTC’ye kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Özellikle sabah saatlerinden itibaren $\Delta T /$ direkt radyasyon (W/m^2) değerinde hızlı bir artış sergileyen kavitesiz tüp alıcı, maksimum 0.03 seviyelerine ulaşmıştır. PTC alıcının performansı ise 0.02 seviyelerinde sabit kalmış, sınırlı bir değişim göstermiştir. Bu fark, kavitesiz tüp alıcının enerji toplama ve ısıya dönüştürme kapasitesinin PTC’den daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Direkt radyasyonun gün ortasında ($\sim 650 \text{ W/m}^2$) maksimum seviyeye ulaşmasıyla her iki alıcının performansı da artış göstermiş, öğleden sonra radyasyon azaldıkça özellikle kavitesiz tüp alıcının performansında dalgalanmalar gözlenmiştir. Genel olarak, kavitesiz tüp alıcı daha yüksek verimlilik sağlarken, PTC daha kararlı ancak düşük bir performans sergilemektedir. Şekil 4.27’de bu sistemlere ait yararlı ısı, ΔT , akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları ve direkt radyasyon grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.27. PDC kavitesiz tüp ve PTC alıcı sistemlerine ait akışkan sıcaklıkları, ΔT -yararlı ısı ve DNI değerleri

Şekil 4.27’de kavitesiz tüp PDC ve PTC sistemlerinin termal performanslarını, akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları, delta sıcaklıkları ve yararlı ısı değerleri açısından karşılaştırmaktadır. PDC sistemi, çıkış sıcaklıklarında 90°C seviyesine ulaşarak, PTC’nin maksimum 60°C değerini belirgin bir şekilde geride bırakmıştır. Delta

sıcaklık açısından da PDC, maksimum 20°C ile PTC'nin 10°C seviyesindeki performansını ikiye katlamıştır. Bu fark, PDC'nin daha yüksek bir enerji dönüşüm kapasitesine ve etkin bir ısı transfer mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Yararlı ısı değerlerinde PDC, gün ortasında 1600 W seviyesine ulaşırken, PTC sisteminin 1200 W seviyelerinde kalması, PDC'nin termal verimlilikteki üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Direkt radyasyonun maksimum olduğu saatlerde ($\sim 650 \text{ W/m}^2$), PDC'nin performansında gözle görülür bir artış yaşanırken, PTC daha kararlı ancak daha sınırlı bir ısı üretimi sergilemiştir. Bununla birlikte, PDC'nin çevresel faktörlere (özellikle direkt radyasyon düşüşlerine) daha duyarlı bir yapı sergilediği görülmektedir.

Verilen grafikler kapsamında, konik spiral, kaviteli tüp alıcı, kavitesiz tüp alıcı ve parabolik oluk (PTC) alıcılarının termal performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeye göre, konik spiral alıcı, normalize edilmiş ΔT /direkt radyasyon (W/m^2) ve maksimum çıkış sıcaklıklarında diğer alıcılara üstünlük sağlamış, yüksek verimliliği ile öne çıkmıştır. Kaviteli tüp alıcı ise benzer şekilde yüksek performans sergilerken daha kararlı bir çalışma profili sunmuş, çevresel koşullara karşı dayanıklılığını göstermiştir. Kavitesiz tüp alıcı, PTC'ye kıyasla daha yüksek bir termal verimlilik sunmasına rağmen, daha düşük çıkış sıcaklıkları ile orta düzey enerji gereksinimleri için uygun bir seçenek olarak öne çıkmıştır. PTC sistemi, düşük çıkış sıcaklıkları ve yararlı ısı üretimi ile sınırlı bir performans göstermiş, ancak çevresel faktörlere karşı kararlı yapısı ile düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için güvenilir bir çözüm olmuştur. Sonuç olarak, konik spiral ve kaviteli tüp alıcılar yüksek enerji dönüşümü gerektiren uygulamalara uygunken, kavitesiz tüp alıcı ve PTC sistemleri daha düşük enerji taleplerine yönelik kararlı çözümler sunmaktadır.

4.4. Yapay Zekâ Model Analizleri

Yenilenebilir enerji sistemlerinin performans analizlerinde yapay zekâ tabanlı yöntemler, karmaşık sistemlerin davranışlarını modelleme ve optimize etme süreçlerinde giderek daha önemli bir araç haline gelmiştir. Bu yöntemler, enerji sistemlerinin dinamiklerini anlamak, farklı tasarım parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek ve sistem optimizasyonu için etkili çözümler sunmak açısından vazgeçilmezdir. Bu bağlamda, çalışmamızda parabolik

çanak ve parabolik oluk kolektör sistemleri ile yapılan deneylerden elde edilen veri setleri, çeşitli yapay zekâ tabanlı regresyon yöntemleri ile incelenmiştir. Bu bölümde, deneysel verilere en iyi uyumu sağlayan modeli belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için 4 farklı regresyon modeli kullanılmıştır. Bunlar:

- Polinom regresyon
- Çoklu doğrusal regresyon
- Destek vektör regresyon
- K-EN Yakın Komşular (KNN) regresyon

Bu analiz yöntemlerinin başarısı, belirli performans kriterleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir modelin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama kare hatası (MSE), kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) gibi metrikler üzerinden analiz edilmiştir.

4.4.1. Polinom regresyon modellemesi

Polinom regresyon modellemesi, deneysel olarak elde edilen veriler arasında doğrusal olmayan ilişkileri açıklamak ve bu ilişkilerden yola çıkarak sistem davranışlarını modellemek için yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım, özellikle doğrusal regresyon yöntemlerinin yetersiz kaldığı karmaşık sistemlerde, parametreler arasındaki etkileşimleri daha detaylı bir şekilde analiz edebilme avantajı sunar. Polinom regresyon modelleri, bağımsız değişkenlerin yüksek dereceli ifadelerini kullanarak, gözlemlenen sistem davranışlarını daha hassas bir şekilde temsil etmeyi mümkün kılar. Bu özellikleri, yenilenebilir enerji sistemleri gibi çok değişkenli ve karmaşık süreçlerin analizinde bu yöntemi değerli kılmaktadır.

Bu bölümde, parabolik oluk kolektör (PTC) ve parabolik çanak kolektör (PDC) sistemlerinden elde edilen deneysel veriler, polinom regresyon modelleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Her iki sistemden de elde edilen veriler, güneş ışıınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve akışkan giriş- çıkış sıcaklıkları gibi çeşitli parametreleri

kapsamaktadır. Polinom regresyon analizi ile bu parametreler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler ortaya konulmuş ve her bir sistem için performans üzerinde etkili olan faktörler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

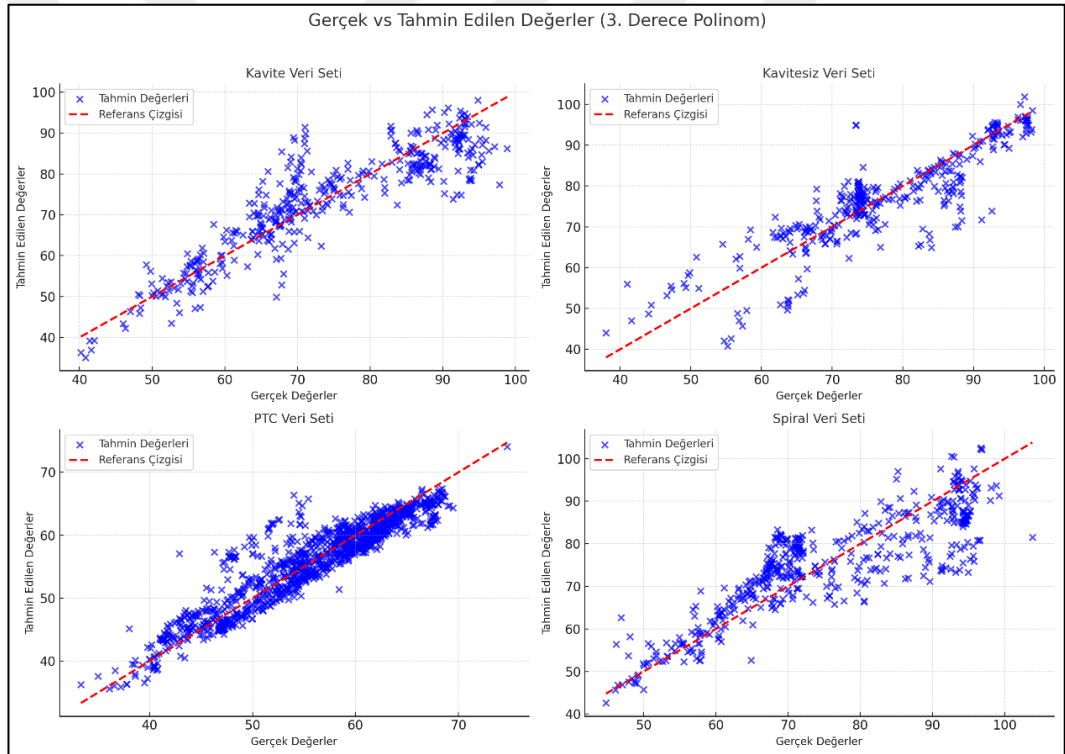
Polinom regresyon modellemesinde farklı derecelerdeki modellerinin uygulanması, sistemlerin performans parametrelerini tahmin etmedeki doğruluk ve güvenilirlik düzeylerinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Polinom derecesinin artırılması, genellikle modelin veri setine daha iyi uyum sağlamasını sağlarken, modelin karmaşıklığını ve aşırı öğrenme riskini de beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle, analiz kapsamında optimal polinom derecesi belirlenerek model performansı ile gerçek deneysel veriler arasındaki uyum değerlendirilmiştir. Çizelge 4.5'te PDC ve PTC alıcılarının polinom regresyon dereceleri ve bu derecelere karşılık gelen performans metrikleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. PDC ve PTC alıcıları polinom regresyon model performans metrikleri

Alıcı	Derece	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R ²
Konik Spiral Alıcı	1	87.9144	9.3762	7.7176	10.4761	0.5456
	2	63.9178	7.9948	6.3744	8.4194	0.6696
	3	52.3222	7.2334	5.7149	7.4947	0.7295
	4	52.2936	7.2314	5.466	7.2015	0.7297
Kavite Tüp Alıcı	1	66.2812	8.1413	6.7885	9.6355	0.6591
	2	41.5060	6.4425	5.0316	6.8642	0.7865
	3	39.3815	6.2754	4.6709	6.3389	0.7975
	4	36.5745	6.0476	4.3605	5.8729	0.8119
Kavitesiz Tüp Alıcı	1	45.5623	6.7499	5.5794	7.6923	0.6981
	2	38.5643	6.21	4.9704	6.8259	0.7445
	3	37.2509	6.1033	4.4063	6.1829	0.7532
	4	60.2185	7.76	4.2777	6.0276	0.6011
PTC Alıcı	1	8.9872	2.9978	2.2941	4.2425	0.8365
	2	8.0465	2.8366	2.1398	3.9523	0.8536
	3	7.4014	2.7205	2.0270	3.7475	0.8653
	4	6.4698	2.5435	1.865	3.4401	0.8823

Çizelge 4.5'te verilen sonuçlar, dört farklı alıcı veri setleri (Kavite, Kavitesiz, PTC ve Spiral) üzerinde gerçekleştirilen polinom regresyon analizi ile elde edilen performans metriklerini kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, bağımlı değişken olan akışkan çıkış sıcaklığına yönelik tahmin performansının, polinom derecesinin artırılmasıyla genel olarak iyileştiği gözlemlenmiştir. Özellikle kavite tüp alıcı deney veri setinde, R² değerinin birinci dereceden polinom için 0.659 iken, dördüncü derecede 0.812'ye yükselmesi, model karmaşıklığının artırılmasının tahmin doğruluğunu artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, ortalama hata değerleri (MAE

ve RMSE) ve yüzdesel hata oranı (MAPE), daha yüksek polinom derecelerinde azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, daha yüksek dereceli polinomlar, modelin fazla öğrenme (overfitting) sorununa yol açma potansiyeline sahiptir. Overfitting, modelin yalnızca eğitildiği veri setine odaklanarak genel geçerliliğini kaybetmesine neden olabilmektedir. Çizelge 4.5’te bulunan tabloya göre, dördüncü dereceli polinomların MSE ve RMSE değerlerindeki düşüş oranı, önceki derecelere kıyasla genellikle sınırlı kalmıştır. Bu durum, artan model karmaşıklığının tahmin doğruluğunu belirli bir noktadan sonra sınırlı şekilde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu nedenle polinom regresyon modellemesinde 3. derece polinom analizi tercih edilmiştir. Şekil 4.28’de PDC ve PTC alıcılarının gerçek ve tahmin edilen değerlerinin polinom regresyon model grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.28. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin polinom regresyon modelleri

Şekil 4.28’de gösterilen grafikler, polinom regresyon modeli kullanılarak dört farklı veri seti (Kavite, Kavitesiz, PTC ve Spiral) için tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafiklerde mavi noktalar, her bir veri noktası için tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki dağılımı temsil ederken, kırmızı kesik çizgi ideal uyumu ifade etmektedir ($y = x$ doğrusu). Grafiklerdeki veri noktalarının büyük çoğunluğu referans çizgisine ($y = x$) yakın bir dağılım sergilemekte

ve dolayısıyla modelin yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı veri noktalarının referans çizgisinden sapması, modelin belirli koşullarda hata yapabildiğini ve tahmin performansının verisetine bağlı olarak değişiklik gösterebileceğini işaret etmektedir. Modelin veri setlerinin büyük bir bölümünde başarılı tahminler yaptığı, doğruluğunun yüksek olduğu ve tahmin performansının güvenilir olduğu görülmektedir.

4.4.2. Çoklu doğrusal regresyon modellemesi

Çoklu doğrusal regresyon modeli, bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkileri tanımlamak için etkin bir öngörü yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Çoklu doğrusal regresyon modeli, enerji sistemlerinden elde edilen verilerde yer alan karmaşık ilişkilerin anlaşılması ve bu ilişkilerin öngörülebilir hale getirilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Modelin matematiksel yapısı, bir bağımlı değişkenin, birden fazla bağımsız değişkenin etkisi altında nasıl değiştiğini ifade etmek üzere tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, analiz edilen değişkenlerin seçimi, modelin güvenilir sonuçlar verebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Sistem performansı üzerinde etkili olabileceği öngörülen başlıca değişkenler (ortam sıcaklığı, direkt radyasyon, rüzgâr hızı, akışkan giriş sıcaklığı) incelenmiş ve bu değişkenlerin bağımlı değişken (akışkan çıkış sıcaklığı) üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.6’da PDC ve PTC alıcı verisetleri ile gerçekleştirilen çoklu doğrusal regresyon analizlerine ait performans metrikleri verilmiştir.

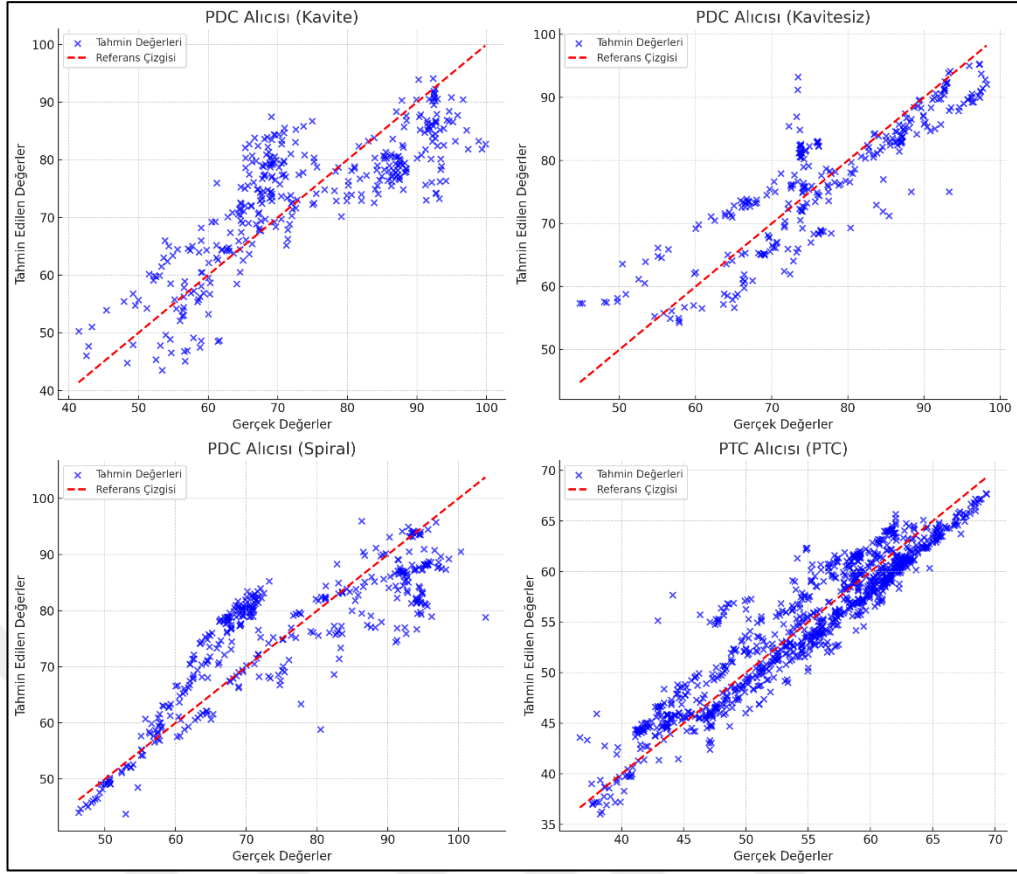
Çizelge 4.6. PDC ve PTC alıcıları çoklu doğrusal regresyon performans metrikleri

Alıcı	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R ²
Konik Spiral Alıcı	60.60	7.7846	6.3265	0.0841	0.7039
Kavite Tüp Alıcı	67.022	8.1866	6.8922	0.0953	0.644
Kavitesiz Tüp Alıcı	33.9364	5.8254	4.6942	0.0653	0.7623
PTC Alıcı	6.2921	2.5084	2.0417	0.0383	0.8855

Çizelge 4.6’da yapılan çoklu doğrusal regresyon analizinde, dört modelin performans metrikleri incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modellerin performansı, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranını (R²), tahmin hatalarını (MSE, RMSE, MAE) ve yüzdesel hata oranını (MAPE) değerlendiren çeşitli kriterlerle analiz edilmiştir. Kavitesiz ve PTC alıcılarına ait veritabanları, diğer iki modele kıyasla daha yüksek açıklama gücüne sahiptir. Özellikle, PTC veritabanı modeli, R² değeri 0.886

ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklamadaki etkinliğini en iyi şekilde göstermektedir. Bu modelde tahmin hataları oldukça düşüktür; RMSE 2.50, MAE 2.04 ve yüzdesel hata oranı (MAPE) %3.83'tür. Bu sonuçlar, PTC veritabanında bağımlı değişkeni etkileyen ilişkilerin model tarafından güçlü bir şekilde temsil edildiğini göstermektedir. Kavitesiz veritabanı ise R^2 değeri 0.762 ile kabul edilebilir bir açıklama gücüne sahiptir. Tahmin hataları düşük olup, RMSE 5.83, MAE 4.69 ve MAPE %6.54'tür. Bu durum, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenle olan ilişkisini yeterli düzeyde yansıttığını ortaya koymaktadır.

Diğer yandan, kavite ve spiral alıcı veritaban modelleri, açıklama gücü açısından makul düzeyde performans sergilemektedir. Kavite modelinin R^2 değeri 0.644, Spiral modelinin ise 0.704'tür; bu durum, bağımsız değişkenlerin bu modellerde bağımlı değişkeni açıklamada yeterli bir katkı sağladığını göstermektedir. Tahmin hatalarına bakıldığında, kavite modelinde RMSE 8.19 ve MAPE %9.53 olarak hesaplanırken, spiral modelinde RMSE 7.78 ve MAPE %8.41 ile daha iyi bir performans gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, modellerin PTC ve kavitesiz modeller kadar olmasa da bağımlı değişkeni anlamlı ölçüde tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.29'da PDC ve PTC alıcılarının gerçek ve tahmin edilen değerlerinin çoklu doğrusal regresyon model grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.29. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin çoklu doğrusal regresyon modelleri

Şekil 4.29’da kavite, kavitesiz, spiral ve PTC alıcılarına ait çoklu doğrusal regresyon modelleriyle elde edilen tahmin değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması sunulmaktadır. Her bir alt grafik, bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler kullanılarak modellenmesi sonucunda elde edilen tahminlerin doğruluğunu görsel olarak inceleme imkânı sunmaktadır. Mavi noktalar, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerlerin ilişkisinin dağılımını gösterirken, kırmızı kesikli çizgi, ideal durumu temsil eden "Referans Çizgisi" olarak, tahmin edilen değerlerin birebir gerçek değerlerle örtüştüğü teorik doğrusal ilişkiyi ifade etmektedir.

Kavite, kavitesiz, spiral ve PTC alıcılarına ait modellerde, tahmin edilen değerlerin genellikle referans çizgisine yakın bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Kavitesiz modeli, tahminlerin referans çizgisine düzenli bir şekilde yakın olmasıyla öne çıkarken, kavite modeli ise genel olarak başarılı bir performans göstermesine rağmen bazı gözlemlerde referans çizgisinden sapmalar sergilemiştir. Spiral modeli, tahminlerinin büyük ölçüde referans çizgisine yakın kümelenmesiyle olumlu bir performans ortaya koymuş, ancak bazı noktalarda Kavite modeline benzer sapmalar

gözlenmiştir. PTC modeli ise tahminlerin referans çizgisine en yakın kümelendiği model olarak dikkat çekmektedir ve bağımlı değişkenin tahmininde diğer modellere göre daha yüksek bir doğruluk oranı sunmaktadır. Genel olarak, modelin performansı büyük ölçüde olumlu değerlendirilebilmekle birlikte, belirli koşullarda daha dengeli bir tahmin yeteneği için iyileştirme potansiyeli mevcuttur.

4.4.3. Destek vektör regresyon modellemesi

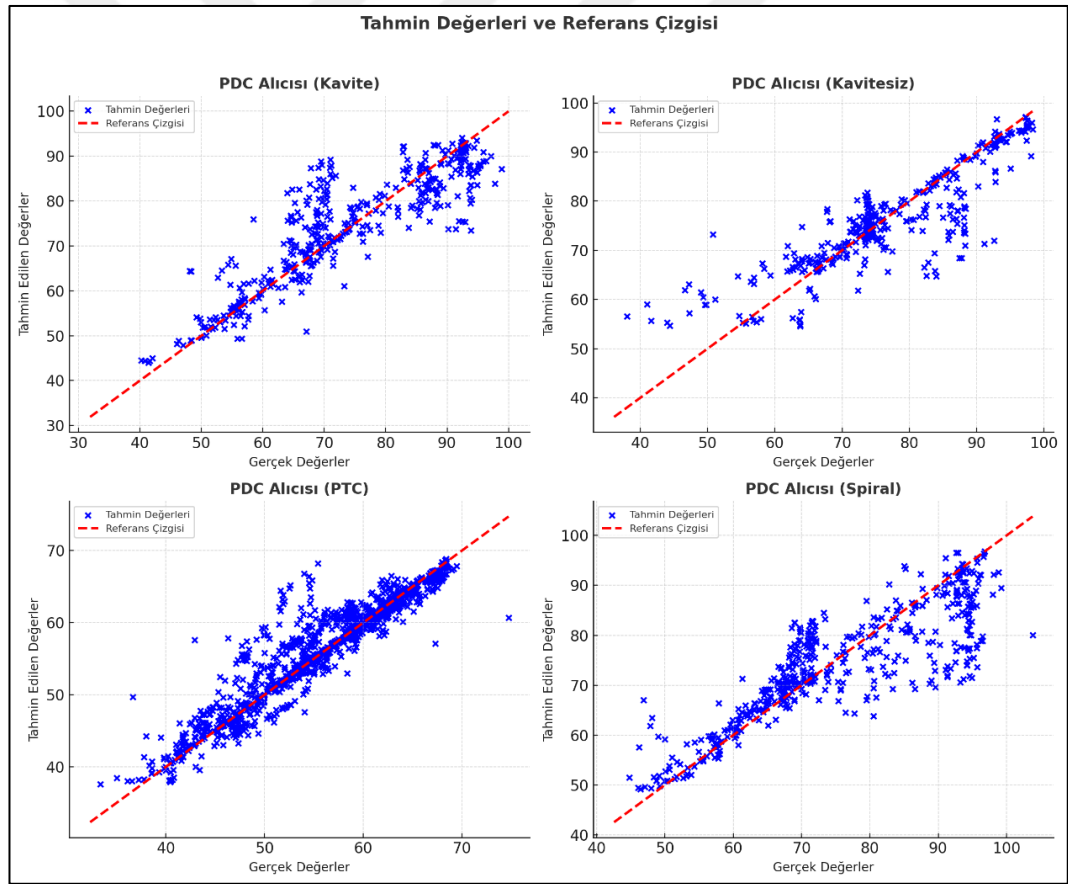
Yapay zekâ yöntemleri, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde önemli bir rol oynar. Parabolik çanak (PDC) ve parabolik oluk (PTC) alıcı sistemleri, termal performans açısından yüksek derecede değişken çevresel koşullara bağlıdır. Bu değişkenlik, sistemlerin analizini zorlaştırmakta ve doğrusal yöntemlerle açıklanmasını sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda, doğrusal olmayan regresyon modelleri arasında yer alan destek vektör regresyonu (SVR), enerji sistemleri analizinde önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu bölümde, PDC ve PTC sistem alıcıları için deneysel veriler kullanılarak SVR modeli oluşturulmuş ve sistem performanslarının tahmin doğruluğu değerlendirilmiştir. Çizelge 4.7’de PDC ve PTC alıcı verisetleri ile gerçekleştirilen destek vektör regresyon analizlerine ait performans metrikleri verilmiştir.

Çizelge 4.7. PDC ve PTC alıcıları destek vektör regresyon performans metrikleri

Alıcı	Çekirdek Fonksiyonu	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R ²
Konik Spiral Alıcı	Doğrusal	97.8448	9.8916	7.3941	0.103	0.4942
	Polinomiyal	88.3198	9.3978	8.0672	0.1011	0.5435
	RBF	60.8731	7.8021	5.8085	0.0762	0.6853
	Laplace	55.4074	7.4436	5.253	0.0675	0.7136
Kavite Tüp Alıcı	Doğrusal	71.005	8.4264	6.692	0.0968	0.6348
	Polinomiyal	98.3132	9.9153	8.2042	0.1096	0.4944
	RBF	46.641	6.8294	4.9359	0.0681	0.7601
	Laplace	44.6893	6.685	4.7623	0.0655	0.7702
Kavitesiz Tüp Alıcı	Doğrusal	52.0757	7.2163	5.1682	0.0734	0.655
	Polinomiyal	64.1787	8.0111	5.9516	0.0819	0.5748
	RBF	40.2656	6.3455	4.313	0.0608	0.7332
	Laplace	37.2879	6.1063	4.1134	0.058	0.7529
PTC Alıcı	Doğrusal	11.4183	3.3791	2.0525	0.0396	0.7922
	Polinomiyal	22.2343	4.7153	3.5387	0.0677	0.5955
	RBF	7.2622	2.6948	1.6729	0.0318	0.8678
	Laplace	7.0981	2.6642	1.6112	0.0306	0.8708

Çizelge 4.7’de destek vektör regresyonu (SVR) algoritmasının farklı çekirdek fonksiyonları (Doğrusal, Polinomiyal, RBF ve Laplace) kullanılarak dört farklı veri

seti (Kavite, Kavitesiz, PTC ve Spiral) üzerinde performans analizi gerçekleştirilmiştir. Performans değerlendirmesi; R^2 , ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama karesel hata (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama Mutlak yüzde hata (MAPE) gibi istatistiksel metrikler üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, özellikle Laplace çekirdek fonksiyonunun tüm veri setlerinde dikkate değer bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Diğer çekirdek fonksiyonlarına kıyasla daha yüksek R^2 değerleri ve daha düşük hata metrikleri (MSE, RMSE, MAE ve MAPE) sunmuştur. Bu durum, Laplace çekirdeğinin doğrusal olmayan yapıları modellemede etkili bir çözüm sunduğunu ve özellikle çalışılan veri setleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 4.30'da PDC ve PTC alıcılarının gerçek ve tahmin edilen değerlerinin destek vektör regresyon (Laplace) model grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.30. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin destek vektör regresyon (Laplace) modelleri

Şekil 4.30'da PDC ve PTC alıcılarına ait dört farklı veri seti (Kavitesiz, Kavite, Spiral ve PTC) için tahmin edilen değerler ile gerçek değerlerin karşılaştırması

sunulmaktadır. Mavi "x" sembolleri tahmin edilen değerleri, kırmızı kesikli çizgi ise ideal durumu temsil etmektedir. Kavitesiz veri setinde tahmin edilen değerlerin büyük ölçüde referans çizgisi etrafında toplandığı gözlenirken, düşük değer aralıklarında bazı sapmalar dikkat çekmektedir. Kavite veri setinde ise referans çizgisinden daha belirgin sapmalar gözlenmiş olup, orta ve yüksek değer aralıklarında modelin doğruluk oranında azalmalar meydana gelmiştir. Spiral veri setinde tahmin değerlerinin referans çizgisine yakın seyretmesi modelin yüksek doğruluk sağladığını gösterirken, bazı yüksek değer bölgelerinde sapmalar bulunmaktadır. PTC veri seti, tüm veri setleri arasında referans çizgisine en yakın dağılımı göstermekte olup, en düşük hata oranları burada elde edilmiştir. Genel olarak, Laplacian çekirdeği kullanılarak oluşturulan model, doğrusal olmayan yapıları başarıyla modellemiş ve tüm verisetlerinde tatmin edici bir performans sergilemiştir.

4.4.4. K-EN yakın komşular regresyon modellemesi

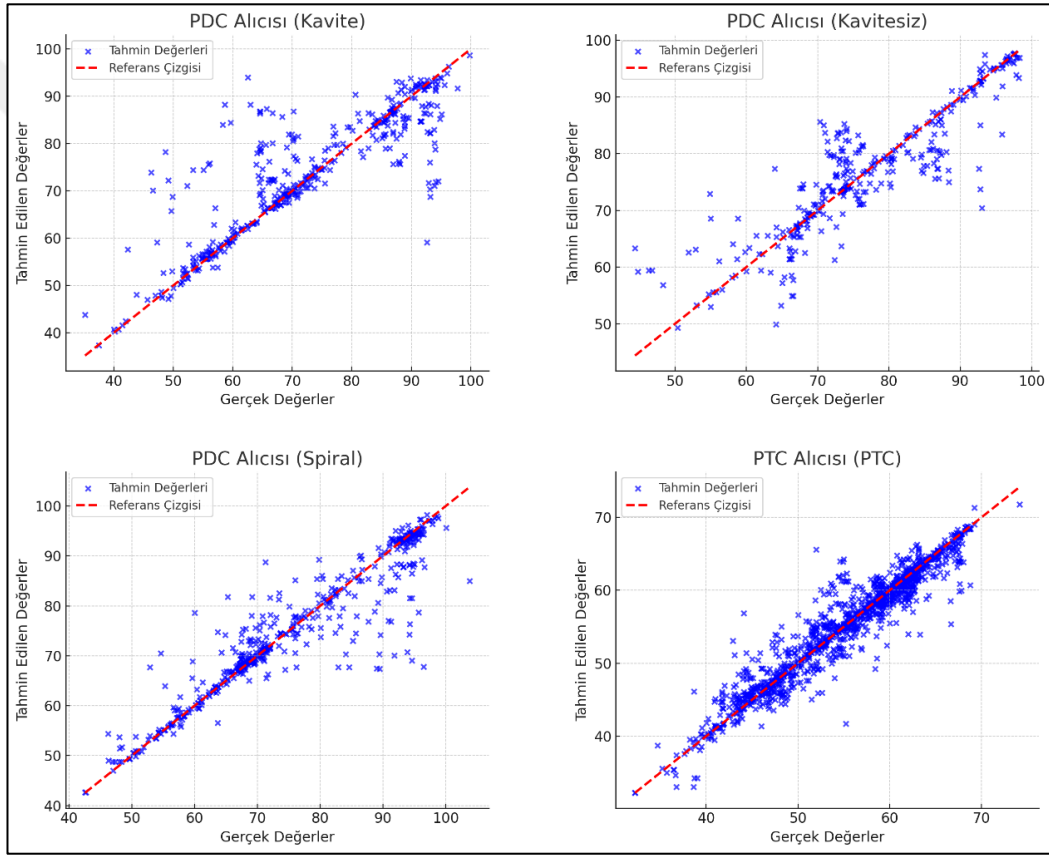
Deneyisel verilerin doğruluğunu artırmak ve hataları minimize etmek amacıyla K-En Yakın Komşular (K-Nearest Neighbors, KNN) regresyon modeli uygulanmıştır. Bu modelin seçilmesindeki temel neden, veriler arasında doğrusal olmayan ilişkilerin yakalanmasındaki başarısıdır. Modelin performansını değerlendirmek için Hata Kareleri Ortalaması (MSE), Kök Ortalama Hata (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ve R^2 (Determinasyon Katsayısı) gibi performans metrikleri kullanılmıştır. Ayrıca, modelin tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki uyumu ve artık değerlerinin dağılımı detaylı grafiklerle görselleştirilmiştir. Çizelge 4.8’de PDC ve PTC alıcı verisetleri ile gerçekleştirilen k-en yakın komşular regresyon analizlerine ait performans metrikleri verilmiştir.

Çizelge 4.8. PDC ve PTC alıcıları KNN regresyon performans metrikleri

Alıcı	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R^2
Konik Spiral Alıcı	25.8	5.08	2.64	3.41	0.8716
Kavite Tüp Alıcı	56.27	7.5	4.06	5.96	0.7365
Kavitesiz Tüp Alıcı	27.28	5.22	3.27	4.58	0.7950
PTC Alıcı	5.11	2.26	1.44	2.71	0.9122

Çizelge 4.8’de gösterilen tabloda kavite, kavitesiz, PTC ve spiral veri setleri için KNN regresyon modeli uygulanmış ve modelin performansı MSE, RMSE, MAE, MAPE ve R^2 metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, PTC veri seti, en düşük

hata değerleri (MSE: 5.11, RMSE: 2.26) ve en yüksek R^2 skoru (0.9122) ile modelin en iyi performansı sergilediği veri seti olmuştur. Spiral veri seti ise R^2 skoru (0.8716) ve düşük hata değerleri (RMSE: 5.08, MAE: 2.64) ile yüksek bir doğruluk ortaya koymuştur. Kavitesiz veri setinde model, kabul edilebilir düzeyde bir başarı sergileyerek (R^2 : 0.7950, RMSE: 5.22) bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini açıklama gücünü göstermiştir. Bununla birlikte, kavite veri setinde hata değerlerinin daha yüksek (MSE: 56.27, RMSE: 7.50) ve R^2 skorunun daha düşük (0.7365) olduğu görülmüştür. Şekil 4.31’de PDC ve PTC alıcılarının gerçek ve tahmin edilen değerlerinin KNN regresyon model grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.31. PDC ve PTC alıcıları gerçek ve tahmin edilen değerlerinin KNN regresyon modelleri

Şekil 4.31’de PDC alıcısı (kavite, kavitesiz, spiral) ve PTC alıcısı veri setleri için K-En Yakın Komşular (KNN) regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmin edilen değerler ile gerçek değerlerin karşılaştırması sunulmaktadır. Grafikte, tahmin edilen değerler yatay ekseninde gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve referans çizgisi (kırmızı kesikli çizgi) ile tahmin doğruluğu görselleştirilmiştir. PTC alıcısı veri setinde, tahmin edilen değerlerin referans çizgisine daha yakın olduğu ve dolayısıyla modelin yüksek

doğrulukla çalıştığı görülmektedir. Spiral alıcısı veri setinde de benzer şekilde tahminlerin referans çizgisine oldukça yakın olduğu ve modelin tutarlı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Kavitesiz ve kavite veri setlerinde tahmin edilen değerler ile referans çizgisi arasındaki sapma diğerlerine göre daha fazla olsa da, tahminlerin genel olarak referans çizgisine yakın dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, KNN regresyon modelinin farklı veri setlerinde değişken doğruluk seviyelerine sahip olabileceğini, ancak genel olarak tutarlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu analiz, modelin veri setleri arasındaki farklılıkları yakalayabildiğini ve özellikle PTC ve spiral veri setlerinde üstün bir performans sağladığını kanıtlamaktadır.

Bu çalışmada, güneş enerjisi temelli yoğunlaştırıcı kolektör sistemlerinin tasarımı, deneysel performans analizi ve yapay zekâ yöntemleriyle modellenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, biri tek eksenli güneş takip sistemine sahip parabolik oluk kolektör (PTC), diğeri ise iki eksenli güneş takip sistemine sahip parabolik çanak kolektör (PDC) olmak üzere iki farklı yoğunlaştırıcı sistem tasarlanmış, imal edilmiş ve deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu sistemlerin elektronik kontrol birimleri, mekanik altyapıları, güneş takip algoritmaları ve alıcı tasarımları özgün biçimde geliştirilmiş, gerçek çevresel koşullarda performansları test edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, tek eksenli güneş takip mekanizmasına sahip parabolik oluk kolektör (PTC) sistemi için, farklı çaplara sahip alıcı borular kullanılarak ısı performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 10 mm, 20 mm ve 30 mm dış çapa sahip üç farklı alıcı boru için, 0.01 kg/s, 0.02 kg/s ve 0.03 kg/s olmak üzere üç farklı kütleli debi değeri göz önünde bulundurulmuş ve her bir kombinasyon için ANSYS yazılımında termal analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin gerçekleştirilmesindeki temel amaç, parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılabilecek farklı alıcı boru çaplarının ve debi değerlerinin, sistemin ısı performansı üzerindeki etkilerini detaylı şekilde inceleyerek en uygun tasarım parametrelerini belirlemektir. Güneş enerjisinden elde edilen termal enerjinin alıcı boru vasıtasıyla akışkana aktarımında, alıcının geometrik özellikleri ve akış koşulları önemli rol oynamaktadır. Boru çapı, ısı transfer yüzey alanını doğrudan etkilerken; kütleli debi, akışkanın boru içerisinde kalış süresi ve dolayısıyla enerji kazanım miktarını belirlemektedir. Bu bağlamda, 10 mm, 20 mm ve 30 mm çaplar için yapılan

ANSYS termal analizleri ile farklı çap-debi kombinasyonlarının akışkan çıkış sıcaklığı ve hızına olan etkileri sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

ANSYS analizlerinden elde edilen termal dağılım görselleri (Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5) ve ilgili sıcaklık-akışkan verileri, parabolik oluk kolektör sisteminde kullanılan alıcı borunun çapı ile sistemde dolaşan akışkanın debisinin, çıkış sıcaklığı ve akışkan hızı üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Çap sabit tutulup debi artırıldığında, akışkanın boru içerisindeki kalış süresi azalmakta; bu da çıkış sıcaklığında düşüşe neden olmaktadır. Ancak bu durum, boru içindeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale gelmesini sağlamak ve bu sayede malzeme üzerindeki sıcaklık farklarından kaynaklanan ısıl gerilimlerin azalmasına katkı sunmaktadır. Isıl gerilimlerin azaltılması, sistemin yapısal ömrünü uzatmak ve uzun süreli kararlı çalışma sağlamak açısından önem arz etmektedir.

Küçük çaplı borularda akışkan daha hızlı hareket etmekte ve dolayısıyla ısıyı yeterince absorbe edemeden sistemden çıkmaktadır. Bu durum, düşük çaplı borularda daha düşük çıkış sıcaklıkları elde edilmesine sebep olmakla birlikte, daha hızlı ısı transferi ile oluşabilecek ani sıcaklık farklarını da beraberinde getirmektedir. Tüm bu analizlerin ışığında, hem termal performans hem de sistem güvenliği açısından en uygun sonuçların 20 mm çaplı alıcı boruda elde edildiği belirlenmiştir. Bu çapta, özellikle 0.01–0.02 kg/s debi aralığında hem yeterli sıcaklık artışı sağlanmakta hem de akışkan hızı, homojen ısı dağılımı için ideal seviyelerde seyretmektedir. Daha küçük çaplı alıcılar yüksek akışkan hızı nedeniyle yeterli ısı emilimini gerçekleştiremezken, daha büyük çaplı alıcılarda ise akışkanın yavaş hareket etmesi sebebiyle oluşan ısı birikimleri uzun vadede ısıl gerilmelere yol açabilecek riskler barındırmaktadır.

Sonuç olarak, PTC sistemlerinde alıcı çapı ve debi parametrelerinin sistem verimliliği ve yapısal kararlılık açısından optimize edilmesinin hayati öneme sahip olduğunu göstermektedir. Analiz sonuçlarına dayanarak, 20 mm çap ve 0.02 kg/s debi kombinasyonu, enerji verimliliği ile ısıl güvenlik arasında optimum dengeyi sağlayan ideal tasarım parametresi olduğu belirlenmiştir.

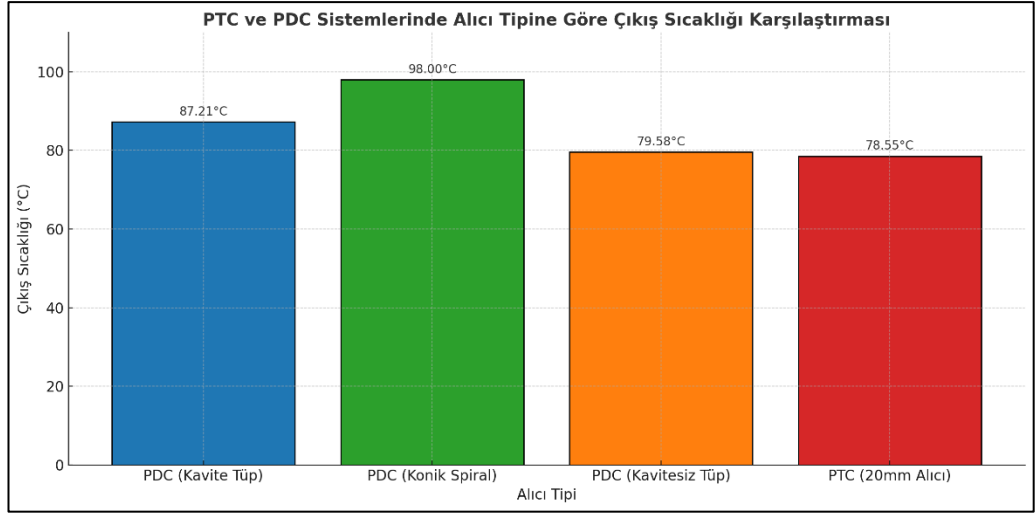
Çalışmanın ikinci aşamasında, çift eksenli güneş takip sistemine sahip parabolik çanak kolektör (PDC) için özgün alıcı tasarımları geliştirilmiş ve sistemin termal performans

karakteristikleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Güneş ışıınının iki ekseninde takip edilmesi sayesinde, yoğunlaştırılmış enerji yüksek odak hassasiyetiyle alıcının merkezine yönlendirilmiş; böylece alıcı tiplerinin odak noktasındaki ısı davranışları gerçekçi koşullarda değerlendirilmiştir. Bu kapsamda üç farklı alıcı tipi kavite tüp alıcı, konik spiral alıcı ve kavitesiz tüp alıcı tasarlanarak, her biri için ANSYS ortamında termal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kavite tüp alıcı tasarımı, ışıınının odaklandığı noktada ısıyı hapsedebilen içyapısı sayesinde belirgin bir sıcaklık yoğunlaşması oluşturmuştur. Bu durum, Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıkların özellikle alıcının merkez bölgesinde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Ancak bu merkezileşmiş sıcaklık dağılımı, yüksek ısı gradyanlarına yol açarak yapısal bölgelerde ısıl gerilim riskini artırabilmektedir. Termal analiz sonucunda elde edilen 87.21 °C’lik çıkış sıcaklığı, Şekil 4.9’da görüldüğü gibi sistemin ısıl verimliliğinin orta düzeyde kaldığını göstermektedir.

Kavitesiz düz tüp alıcı ise en basit yapıya sahip olup, gelen radyasyonun doğrudan yüzeye çarpıp düzensiz bir şekilde dağılmasına neden olmaktadır. Bu durum, Şekil 4.14’te sunulan sıcaklık dağılımından da anlaşılacağı üzere, yüzeyde belirgin sıcaklık farklarının oluşmasına yol açmış; odaklanmış ışıınının etkin şekilde absorbe edilmesini engellemiştir. Şekil 4.15’te görüldüğü gibi bu alıcı tipinde elde edilen 79.58 °C’lik çıkış sıcaklığı, sistemin toplam ısı kazanımının sınırlı kaldığını ortaya koymuştur.

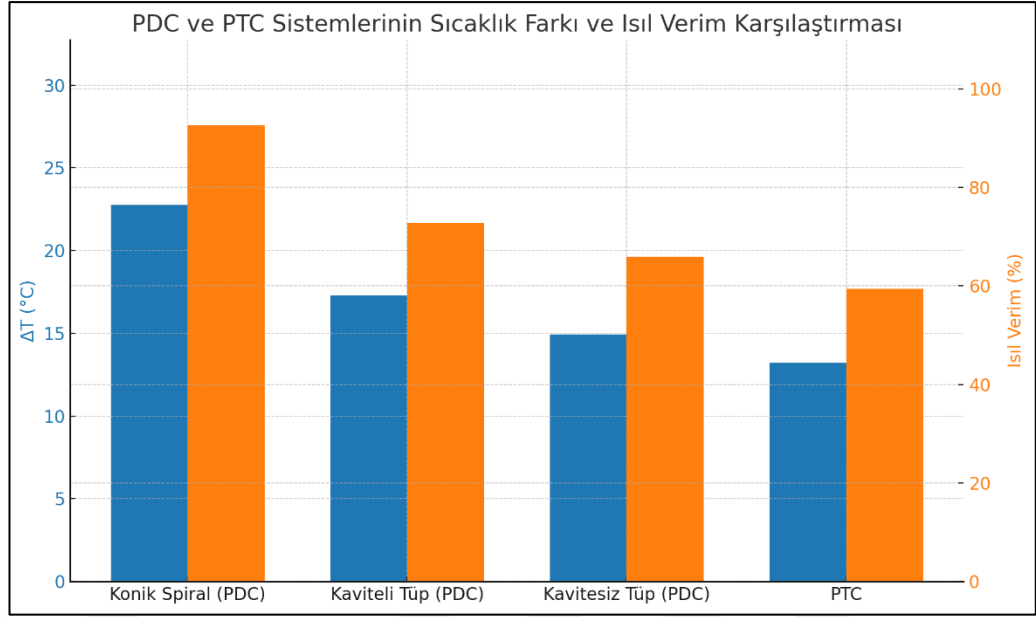
Konik spiral alıcı tasarımı ise PDC sisteminde en yüksek performansı sergilemiştir. Konik formun spiral düzende yükselen yapısı sayesinde ışıınının, alıcı yüzeyine Şekil 4.11’de görüldüğü gibi kademeli ve yaygın bir şekilde dağılmakta; bu da daha homojen bir sıcaklık gradyeni oluşturmaktadır. Böylece hem yüksek sıcaklık elde edilmekte hem de ısıl gerilimler minimize edilmektedir. Elde edilen 98 °C’lik çıkış sıcaklığı, Şekil 4.12’de görüldüğü üzere, konik spiral tasarımın diğer iki alıcıya kıyasla açık bir üstünlük sağladığını göstermektedir. Şekil 4.32’de PTC ve PDC sistemlerine ait alıcıların analiz sonuçlarına göre çıkış sıcaklıkları gösterilmiştir.



Şekil 4.32. PTC ve PDC alıcı çıkış sıcaklık sonuçları (termal analiz)

ANSYS analizlerinden elde edilen sayısal model sonuçlarının ardından, sistemlerin ısı performansları teorik hesaplamalarla da analiz edilmiş ve bu değerler tablo hâlinde (Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4) karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalarda; güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, gibi parametreler dikkate alınmış, konveksiyon ve radyasyon kayıpları hesaplanarak sistemlerin net enerji kazançları ve ısı verimleri belirlenmiştir.

Çalışmada, teorik ve termal analiz haricinde yapılan deneysel çalışmalar, PTC ve PDC sistemlerinin eş zamanlı olarak çalıştırılmasıyla elde edilen sıcaklık farkı (ΔT) ve ısı verim (%) verilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Üç farklı alıcı tasarımına sahip PDC sistemleriyle yapılan ölçümler, iki eksenli güneş takip sisteminin sunduğu odaklanma avantajı sayesinde PTC sistemine kıyasla daha yüksek performans değerleri ortaya koymuştur. PDC sisteminde konik spiral alıcı, ortalama 22.75 °C sıcaklık farkı ile en yüksek ısı artışını sağlamış ve konik spiral alıcının ısı verim ortalaması %92.63'ye ulaşmıştır. Kaviteli tüp alıcılı PDC sisteminde ortalama sıcaklık farkı 17.28 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer, konik spiral alıcıya kıyasla daha düşük kalmıştır. Ayrıca ısı verim ortalaması %72.81 olarak ölçülmüştür. Kavitesiz tüp alıcıda ise sıcaklık farkı ortalama 14.93 °C olarak ölçülmüş ve bu değer, PDC sistemleri arasında en düşük seviyede kalmıştır. Isı verimi %65.97 olarak belirlenmiştir. Sistem deneyleri esnasında elde edilen ortalama PTC sıcaklık farkı 13.22 °C, ortalama ısı verim ise 0.5945 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.33'te PTC ve PDC sistemlerine ait alıcıların deneysel sonuçlara göre olan sıcaklık farkı ve ısı verim karşılaştırmaları gösterilmiştir.

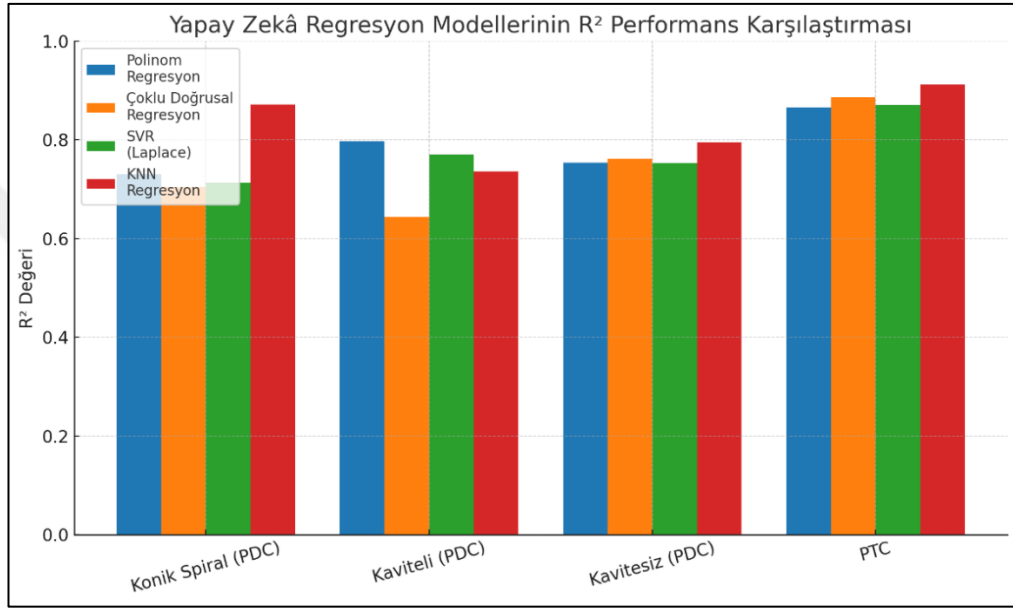


Şekil 4.33. PTC ve PDC alıcı sistem deneysel performans karşılaştırılması

Deneysel veriler yüzdesel olarak değerlendirildiğinde, konik spiral alıcılı PDC sistemi, PTC sistemine göre sıcaklık farkı açısından yaklaşık %72 daha yüksek performans göstermiştir (22.75 °C'ye karşı 13.22 °C). Isıl verimlilik açısından ise konik spiral alıcı, PTC'ye kıyasla yaklaşık %56 daha verimli çalışmıştır (%92.63'e karşı %59.45). Kaviteli tüp alıcı, PTC sistemine göre sıcaklık farkında %31, verimde ise yaklaşık %22.5 daha yüksek değerler sunmuştur. Kavitesiz tüp alıcı da PTC sistemine göre ΔT açısından %13, verim açısından ise yaklaşık %11 daha iyi sonuç vermiştir. Bu oranlar, PDC sistemlerinin her alıcı tipiyle birlikte, PTC sistemine kıyasla belirgin verim artışı sağladığını ortaya koymaktadır.

Çalışmada geliştirilen deneysel sistemlerin ve termal analizlerin ardından, elde edilen verilerin daha etkin biçimde değerlendirilmesi ve sistemlerin performansını tahmin edebilecek modellerin oluşturulması amacıyla yapay zekâ tabanlı analiz yöntemlerine başvurulmuştur. Güneş enerjisi sistemleri, birçok değişkenin aynı anda etkili olduğu dinamik yapılar içerdiğinden, klasik matematiksel modelleme yöntemleri çoğu zaman yeterli düzeyde doğruluk ve esneklik sağlayamamaktadır. Bu noktada, çok değişkenli ve doğrusal olmayan ilişkilere dayalı veri kümelerini yüksek doğrulukla işleyebilen yapay zekâ algoritmaları, özellikle regresyon temelli yöntemler, alternatif ve güçlü bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen PDC ve PTC sistemlerinin deneysel performans verileri, çeşitli yapay zekâ temelli regresyon yöntemleriyle modellenmiş ve elde edilen tahmin sonuçları çoklu metriklerle değerlendirilmiştir. Kullanılan

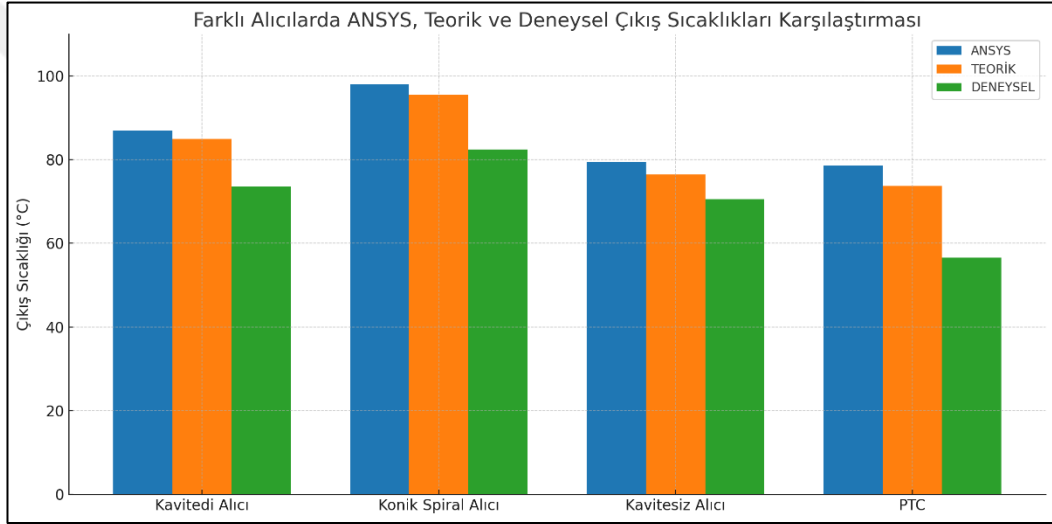
regresyon modelleri; polinom regresyon (1. ile 4. derece arası), çoklu doğrusal regresyon, destek vektör regresyonu (farklı çekirdek fonksiyonlarıyla) ve K-en yakın komşular regresyonudur. Her bir modelin tahmin doğruluğu, ortalama kare hatası (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve belirleme katsayısı (R^2) gibi ölçütlerle analiz edilmiştir. Şekil 4.34'te yapay zeka regresyon modellerinin R^2 performans karşılaştırmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.34. PTC ve PDC alıcı sistem R^2 performans karşılaştırılması

Yapılan yapay zekâ model analizleri sonucunda, Şekil 4.34'te görüldüğü gibi dört farklı regresyon yönteminin (polinom, çoklu doğrusal, destek vektör ve KNN) PDC ve PTC sistemleri üzerindeki tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Polinom regresyon modelleri arasında, 3. derece polinom en başarılı sonuçları vermiş; PTC sisteminde $R^2 = 0.8653$ ile yüksek doğruluk sağlarken, PDC sistemlerinde konik spiral için 0.7295, kaviteli için 0.7975 ve kavitesiz için 0.7532 değerleri elde edilmiştir. Çoklu doğrusal regresyonda ise PTC sisteminin doğrusal yapıya daha uygun olduğu görülmüş, $R^2 = 0.8855$ ile en iyi sonucu verirken, PDC sistemlerinde bu değerler daha düşük kalmıştır (0.644–0.762 arası). Destek vektör regresyon modellerinde Laplace çekirdeği en yüksek başarıyı sağlamış; PTC için $R^2 = 0.8708$, PDC alıcıları içinse 0.7136–0.7702 aralığında değerler elde edilmiştir. KNN regresyon ise tüm modeller arasında en yüksek performansı sunmuş, PTC'de $R^2 = 0.9122$ 'ye ulaşmış, konik spiral, kavitesiz ve kaviteli alıcılarda sırasıyla %87.16, %79.50 ve %73.65 korelasyon

değerleri sağlamıştır. Genel olarak, PTC sisteminin daha öngörülebilir ve doğrusal ilişkilere sahip olduğu; PDC sistemlerinin ise daha karmaşık yapıları nedeniyle doğrusal olmayan modellere daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca her alıcı tipine özgü en uygun model farklılık göstermekte olup, bu durum model seçiminin sistem türüne göre optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Geliştirilen modeller, yalnızca mevcut sistemlerin analizinde değil, aynı zamanda benzer sistemlerin ön tasarım süreçlerinde öngörü ve optimizasyon için de etkin biçimde kullanılabilir niteliktedir. Şimdiye kadar çalışmada; teorik hesaplama, termal analiz ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.35'te termal analiz, teorik ve deneysel çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Sistem alıcıları ANSYS, teorik ve deneysel sonuç karşılaştırması

Şekil 4.35'te PTC ve PDC sistemlerine ait dört farklı alıcı (kavite tüp, konik spiral, kavitesiz ve PTC) için yapılan ANSYS, teorik ve deneysel analizlerde elde edilen çıkış sıcaklıklarının karşılaştırması gösterilmektedir. Veriler değerlendirildiğinde, konik spiral alıcı, ANSYS analizinde 98 °C, teorik hesaplamada 95.66 °C ve deneysel uygulamada 82.48 °C çıkış sıcaklığına ulaşmıştır. Bu durumda, teorik ile deneysel değerler arasında 13.18 °C fark oluşmuş ve bu %13.78'lik bir sapmaya karşılık gelmiştir. ANSYS ile deney arasındaki fark 15.52 °C olup %15.84'lik bir azalma gözlenmiştir. ANSYS ile teorik arasındaki fark ise 2.34 °C (%2.39) düzeyindedir.

Kaviteli alıcıda ANSYS değeri 87.21 °C, teorik 84.66 °C ve deneysel 73.67 °C olarak belirlenmiş; teorik-deney farkı 10.99 °C (%12.98), ANSYS-deney farkı 13.54 °C

(%15.53) ve ANSYS-teorik farkı 2.55 °C (%2.92) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, kaviteli alıcının modelleme ile deney arasında daha uyumlu bir sonuç verdiğini ortaya koymaktadır.

Kavitesiz alıcıda ise teorik çıkış sıcaklığı 76.33 °C, deneysel 70.81 °C ve ANSYS değeri 79.58 °C olarak belirlenmiştir. Teorik ile deney arasında %7.23; ANSYS ile deney arasında %11.02 fark oluşmuştur. ANSYS ile teorik fark ise %4.08 ile sınırlı kalmıştır. Bu durum, sistemin daha az değişkenli ısı karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

PTC sisteminde ise deneysel çıkış sıcaklığı 56.53 °C ile en düşük değer olarak belirlenmiştir. Teorik çıkış sıcaklığı 73.88 °C ve ANSYS çıktısı 78.55 °C'dir. Deneysel veriler teorik modele göre %23.48; ANSYS modeline göre ise %28.03 daha düşük kalmıştır. ANSYS ile teorik değer arasındaki fark %5.95 seviyesindedir. Bu büyük sapma, deneysel uygulamada sistemden kaynaklı kayıpların (yüzey yansımaları, çevresel etkiler, mekanik kayıplar) etkisini göstermektedir.

Bu analizler genel olarak değerlendirildiğinde, konik spiral alıcı tüm sistemler arasında en yüksek çıkış sıcaklığına ulaşarak (ANSYS: 98 °C, deney: 82.48 °C) en verimli ısı transferini sağlamıştır. Aynı zamanda teorik ve deneysel veriler arasındaki farkın %13.78 ile sınırlı kalması, modelin öngörülebilirliğini de güçlendirmiştir. Kaviteli alıcı, konik spiral alıcıya göre daha düşük sıcaklık üretmiş olsa da (%15.53 ANSYS-deney farkı ile), teorik ve deneysel uyumunun %12.98 sapmayla daha dengeli olduğu görülmektedir. Bu, sistemin daha kararlı ısı performans sergilediğini göstermektedir.

Kavitesiz düz tüp alıcı ise 70.81 °C'lik deneysel sıcaklık ile PDC sistemleri içinde en düşük değeri üretmiş; buna rağmen modelleme sonuçlarıyla olan uyumu, diğer sistemlere kıyasla daha iyi seviyede olmuştur (teorik-deney farkı %7.23). Bu durum, sistemin daha sade yapısının tahmin edilebilirliği artırdığını göstermektedir. Öte yandan, PTC sistemi tüm alıcı tipleri arasında en düşük deneysel sıcaklığı (56.53 °C) üretmiş ve en yüksek teorik-deney (%23.48) ve ANSYS-deney (%28.03) sapmasını göstermiştir. Bu büyük fark, PTC sisteminde ısı kayıplarının ve dışsal etkilerin daha belirgin olduğunu ve sistem verimliliğinin düşüklüğünü ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, güneş enerjisi tabanlı yoğunlaştırıcı kolektör sistemlerinin ısı performanslarının belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Parabolik oluk kolektör (PTC) ve parabolik çanak kolektör (PDC) sistemlerine yönelik olarak yapılan analizler; sayısal modelleme, teorik hesaplamalar, deneysel ölçümler ve yapay zekâ tabanlı regresyon analizlerini içerecek şekilde çok boyutlu olarak yürütülmüştür. Böylelikle her bir sistem ve alıcı tipi için sadece anlık performanslar değil, aynı zamanda modelleme doğruluğu ve sistem öngörülebilirliği de detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

ANSYS ortamında yapılan termal analizler, PTC sisteminde alıcı boru çapı ve debi kombinasyonlarının akışkan çıkış sıcaklığı ve ısı dağılımı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu analizler sonucunda, 20 mm çaplı borunun 0.02 kg/s debi ile birlikte kullanılması durumunda hem yeterli sıcaklık artışı hem de dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlanarak optimum verim elde edilmiştir. Aynı şekilde PDC sisteminde geliştirilen üç farklı alıcı tipi arasında en yüksek çıkış sıcaklığı 98 °C (termal model) ile konik spiral alıcıda ölçülmüş, bu tasarım hem verimlilik hem de yapısal denge açısından üstün bir performans sergilemiştir. Kaviteli alıcı ise sıcaklık merkezileşmesi nedeniyle orta düzey performans sunarken, kavitesiz düz tüp alıcı sistemin en düşük ısı kazancını sağlamıştır.

Deneysel bulgular da bu verileri destekleyici nitelikte olmuş; PDC sistemlerinin PTC'ye kıyasla daha yüksek sıcaklık farkı ve verim sağladığı belirlenmiştir. Konik spiral alıcı 82.48 °C çıkış sıcaklığı ve %92.63 verim ile öne çıkarken, kaviteli ve kavitesiz alıcılar sırasıyla %72.81 ve %65.97 verim değerlerine ulaşmıştır. PTC sisteminin deneysel verim değeri %59.45 ile en düşük seviyede kalmış ve bu da sistemin tek eksenli odaklanma sınırlılığı ile açıklanmıştır. Ayrıca teorik, deneysel ve ANSYS sonuçları arasındaki sapmalar incelendiğinde konik spiral alıcı %2.39-%15.84 bandında sapma göstererek yüksek öngörülebilirlik sunmuştur. PTC sisteminde ise %5.95-%28.03 düzeyindeki farklar, sistemin çevresel kayıplara açık yapısını yansıtmaktadır.

Tüm bu analizlerin ardından, regresyon tabanlı yapay zekâ modelleri kullanılarak sistem performanslarının analizi yapılmıştır. Polinom regresyon, çoklu doğrusal regresyon, destek vektör regresyonu ve KNN modelleri farklı alıcı tipleri için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. PTC sistemi KNN ile $R^2 = 0.9122$ gibi yüksek doğrulukta temsil edilmiş, bu da sistemin yapay zekâ tabanlı öngörülemezliğe en yatkın yapı olduğunu göstermiştir. PDC sistemlerinde ise konik spiral alıcı %87.16 R^2 ile yine öne çıkarken; kaviteli ve kavitesiz alıcılarda bu oranlar %73.65-%79.50 aralığında kalmıştır. Bu sonuçlar, özellikle çok değişkenli ve doğrusal olmayan yapılar içeren enerji sistemlerinde yapay zekâ tekniklerinin hem veri analizi hem de sistem optimizasyonu açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Bu tez kapsamında yürütülen çok yönlü analizler neticesinde, güneş enerjisi tabanlı yoğunlaştırıcı kolektör sistemlerinin tasarımında ve performans değerlendirmesinde hem fiziksel parametrelerin hem de yapay zekâ tabanlı modelleme yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesinin, sistem başarımı üzerinde belirleyici rol oynadığı ortaya konulmuştur. Parabolik oluk kolektör (PTC) sisteminde yapılan analizler, 20 mm çapındaki alıcı borunun 0.02 kg/s debi ile birlikte kullanılması durumunda optimum ısı performans sağladığını ve bu konfigürasyonda %59.45'lik bir ısı verim değerine ulaşıldığını göstermiştir. Parabolik çanak kolektör (PDC) sisteminde ise en başarılı sonuç, konik spiral alıcı tasarımıyla elde edilmiş; bu yapı deneysel olarak 82.48 °C çıkış sıcaklığına ve %92.63'lük yüksek bir ısı verime ulaşarak tüm sistemler arasında en üstün performansı sergilemiştir.

Teorik, deneysel ve sayısal (ANSYS) analizlerin karşılaştırılması sonucunda; konik spiral alıcıda modelleme ile deneysel sonuçlar arasındaki sapmanın %13.78 seviyesinde kalması, sistemin öngörülebilirliğinin ve modelleme doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu ortaya koymuştur. PDC sisteminde kaviteli ve kavitesiz alıcılar sırasıyla %72.81 ve %65.97 ısı verim değerleriyle orta düzey performans sergilemiş, PTC sisteminde ise bu oran %59.45'te kalmıştır. Bu veriler, iki eksenli güneş takip sisteminin ve uygun alıcı tasarımının termal kazanç üzerinde çarpıcı bir etki yarattığını doğrulamaktadır.

Yapay zekâ tabanlı modelleme sonuçları, PTC sisteminin KNN regresyon modeliyle $R^2=0.9122$ gibi yüksek bir doğrulukla temsil edilebildiğini ortaya koyarken; PDC

sistemlerinde en iyi sonuçlar konik spiral alıcı için %87.16, kavitesiz alıcı için %79.50 ve kaviteli alıcı için %73.65 R^2 değeri ile elde edilmiştir. Bu bulgular, sistemin dinamik yapısının doğrusal ve doğrusal olmayan algoritmalarla modellenenebilirliğini göstermiş; özellikle çok değişkenli enerji sistemlerinin analizinde yapay zekâ tekniklerinin ne denli güçlü bir araç olabileceğini kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma; yüksek verimli, öngörülebilir ve yapısal olarak dengeli bir yoğunlaştırıcı güneş kolektör sistemi tasarımının hem mühendislik temelli optimizasyon hem de yapay zekâ destekli analizlerle mümkün olduğunu göstermiştir. Elde edilen tüm bulgular, hem mevcut sistemlerin performans artırımı hem de gelecekteki sürdürülebilir enerji teknolojilerinin tasarımında yol gösterici niteliktedir.



KAYNAKLAR

- Abu-Hamdeh, N. H., Alnefaie, K. A., & Almitani, K. H. (2013). Design and performance characteristics of solar adsorption refrigeration system using parabolic trough collector: experimental and statistical optimization technique. *Energy Conversion and Management*, 74, 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.043>
- Acar, C., & Kılınçdemir, İ. (2019). Güneş enerji sistemleri. EMO. https://www.emo.org.tr/ekler/c7f5e8dc51a49_ek.pdf. (Son erişim tarihi: 07 Temmuz 2023)
- International Energy Agency (IEA). (2022). World energy outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (Son erişim tarihi: 07 Temmuz 2023)
- Ahlborn (2023a). Ahlborn global irradiance sensor. <https://www.ahlborn.com/assets/uploads/general/Produkte/Sensoren/Messkopf-fuer-optische-Strahlung/Optical-radiation.pdf>. (Son erişim tarihi: 17 Mayıs 2023)
- Ahlborn (2023b). Ahlborn wind sensor. <https://www.ahlborn.com/assets/uploads/general/Produkte/Sensoren/Windrichtungsgeber/Wind-sensor.pdf>. (Son erişim tarihi: 21 Mayıs 2023)
- Ahmed, A., Abdullah, M. N., Soomro, D., Nassar, M., Memon, Z., & Shaikh, P. (2020). Design of parabolic solar dish tracking system using arduino. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), 914-921. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp914-921>
- Ajbar, W., Parrales, A., Silva Martínez, S., Bassam, A., Jaramillo, O. A., & Perez, J. A. (2021). Identification of the relevant input variables for predicting the parabolic trough solar collector's outlet temperature using an artificial neural network and a multiple linear regression model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13, 043701. <https://doi.org/10.1063/5.0055992>
- Al-Dulaimi, M. J., & Amori, K. E. (2022). Effect of receiver geometry on the optical and thermal performance of a parabolic trough collector. *Heat Transfer*, 51(3), 2437-2457. <https://doi.org/10.1002/htj.22406>
- Al-Sulaiman, F. A. (2014). Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic rankine cycles. *Energy Conversion and Management*, 77, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.013>
- Amelia, A. R., Irwan, Y. M., Safwati, I., Leow, W. Z., Mat, M. H., & Rahim, M. S. A. (2020). Technologies of solar tracking systems: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 767(1), 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/767/1/012052>

- ANSYS (2025). ANSYS student. <https://www.ansys.com/academic/students> (Son erişim tarihi: 12 Ocak 2025)
- Arduino (2023). Arduino mega 2560 rev3. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. (Son erişim tarihi: 21 Kasım 2023)
- Arslan, Ö., Üçgül, İ., Elibüyük, U., & Emen, Y. (2019). Parabolik oluk yoğunlaştırıcı sistemlerin ısparta organize sanayi bölgesinde kullanımı. *Yekarum*, 4(2), 40-48.
- Atilgan, B., & Azapagic, A. (2015). Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 106, 555-564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.046>
- Aydin, D. (2020). Performance analysis of a medium temperature solar concentrator for domestic water heating. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, 5(1), 21-33.
- Bahrami, M., Madadi Avargani, V., & Bonyadi, M. (2019). Comprehensive experimental and theoretical study of a novel still coupled to a solar dish concentrator. *Applied Thermal Engineering*, 151, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.103>
- Balghouthi, M., Ali, A. B. H., Trabelsi, S. E., & Guizani, A. (2014). Optical and thermal evaluations of a medium temperature parabolic trough solar collector used in a cooling installation. *Energy Conversion and Management*, 86, 1134-1146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.095>
- Barreto, G., & Canhoto, P. (2017). Modelling of a stirling engine with parabolic dish for thermal to electric conversion of solar energy. *Energy Conversion and Management*, 132, 119-135. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.011>
- Bayraktar, F. S., Yazıcı, M., & Köse, R. (2023). Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) teknolojileri ve Türkiye’de CSP’ye yönelik politikalar. *Journal of Scientific Reports-B*, 7, 1-13.
- Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2015). A novel parabolic trough solar collector model-validation with experimental data and comparison to engineering equation solver (EES). *Energy Conversion and Management*, 106, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>
- Bellos, E., Bousi, E., Tzivanidis, C., & Pavlovic, S. (2019). Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Conversion and Management*: X, 2, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100013>
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018). Analytical expression of parabolic trough solar collector performance. *Designs*, 2(1), 1-17. <https://doi.org/10.3390/designs2010009>

- Bharti, A., Dixit, A., & Paul, B. (2018). Experimental analysis of a solar parabolic trough collector. *Journal of Mechanical Engineering*, 16(3), 102-112.
- Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., & Lara-Coira, M. (2001). Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), 431-441. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
- Blum, N. B., Wilbert, S., Nouri, B., Lezaca, J., Huckebrink, D., Kazantzidis, A., Heinemann, D., Zarzalejo, L. F., Jiménez, M. J., & Pitz-Paal, R. (2022). Measurement of diffuse and plane of array irradiance by a combination of a pyranometer and an all-sky imager. *Solar Energy*, 232, 232-247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.064>
- Boles, Michael & Cengel, Yunus. (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Ohio. McGraw-Hill Education.
- Bouvier, J.-L., Michaux, G., Salagnac, P., Nepveu, F., Rochier, D., & Kientz, T. (2015). Experimental characterisation of a solar parabolic trough collector used in a micro-CHP (micro-cogeneration) system with direct steam generation. *Energy*, 83(1), 474-485. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.050>
- British Petroleum (2021). Statistical review of world energy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. (Son erişim tarihi: 01 Ağustos 2023)
- Cebotari, S. (2015). Romanian Electricity Market In The Light Of Fast Development Of Renewable Energies: General Presentation And Critical Assessment. *Perspectives of Renewable Energy in the Danube Region*. March 26-27, Hungary, 113-124.
- Cervantes-Bobadilla, M., Hernández-Pérez, J. A., Juárez-Romero, D., Bassam, A., García-Morales, J., Huicochea, A., & Jaramillo, O. A. (2021). Control scheme formulation for a parabolic trough collector using inverse artificial neural networks and particle swarm optimization. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(4), 176. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02862-4>
- Chafie, M., Ben Aissa, M. F., Bouadila, S., Balghouthi, M., Farhat, A., & Guizani, A. (2016). Experimental investigation of parabolic trough collector system under Tunisian climate: design, manufacturing and performance assessment. *Applied Thermal Engineering*, 101, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.073>
- Chafie, M., Ben Aissa, M. F., & Guizani, A. (2018). Energetic end exergetic performance of a parabolic trough collector receiver: an experimental study. *Journal of Cleaner Production*, 171, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.012>

- Chafiou, H., & Üçgöl, İ. (2022). Komor adaları'nda parabolik oluk güneş kollektörü ile enerji üretimi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 14(1), 30-39. <https://doi.org/10.55974/utbd.1065773>
- Chandrasekhar, V., Marthuvanan, M., Ramkumar, M. M., Shriram, R., Manickavasagam, V. M., & Ramnath, B. V. (2013). MCDM Approach For Selecting Suitable Solar Tracking System. *2013 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, January 4-5, India, 148-152.
- Cheng, Z. D., He, Y. L., Du, B.C., Wang, K., & Liang, Q. (2015). Geometric optimization on optical performance of parabolic trough solar collector systems using particle swarm optimization algorithm. *Applied Energy*, 148, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.079>
- Cheng, Z. D., Zhao, X. R., & He, Y. L. (2018). Novel optical efficiency formulas for parabolic trough solar collectors: computing method and applications. *Applied Energy*, 224, 682-697. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.033>
- Clifford, M. J., & Eastwood, D. (2004). Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 77(3), 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.009>
- Coccia, G., Di Nicola, G., & Sotte, M. (2015). Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat. *Renewable Energy*, 74, 727-736. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.077>
- COMSOL (2024). COMSOL. <https://www.comsol.com/> (Son erişim tarihi: 1 Ağustos 2024)
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), 333-346. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4)
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Çıtıröğlu, A. (2000). Güneş enerjisinden yararlanarak elektrik üretimi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 41(485), 32-37.
- D. Frejo, J. R., & F. Camacho, E. (2020). Centralized and distributed model predictive control for the maximization of the thermal power of solar parabolic-trough plants. *Solar Energy*, 204, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.033>
- de Sá Campos, M. H., & Tiba, C. (2021). npTrack: a n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection. *Energies*, 14(4), 1-13. <http://dx.doi.org/10.3390/en14040925>
- Deleidi, M., Mazzucato, M., & Semieniuk, G. (2020). Neither crowding in nor out: public direct investment mobilising private investment into renewable electricity projects. *Energy Policy*, 140, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111195>

- Dinca, C., Badea, A., & Apostol, T. (2010). Life cycle impact assessment of fossil fuels. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 71(1), 115-126.
- Doğan, M. (2015). *Yenilenebilir Enerjide Tarımın Rolü*. (Bitirme Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi)
- Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C., & Matschoss, P. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press.
- El-Ghafour, S., Mikhael, N., & Elghandour, M. (2021). Design and three-dimensional simulation of a solar dish-stirling engine. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 82(1), 51-76. <https://doi.org/10.37934/arfmts.82.1.5176>
- El Ydrissi, M., Ghennioui, H., Bennouna, E. G., & Farid, A. (2020). Techno-economic study of the impact of mirror slope errors on the overall optical and thermal efficiencies- case study: solar parabolic trough concentrator evaluation under semi-arid climate. *Renewable Energy*, 161, 293-308. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.015>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- ETKB (2023). Türkiye global güneş radyasyon ve güneşlenme süresi. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>. (Son erişim tarihi: 07 Temmuz 2023)
- ETKB (2024a). Güneş enerjisi. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>. (Son erişim tarihi: 25 Mart 2024)
- ETKB (2024b). Türkiye'de güneş enerjisi. <https://enerji.gov.tr/gunes-bilgimerkezi>. (Son erişim tarihi: 7 Ocak 2024)
- Fathabadi, H. (2016). Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. *Applied Energy*, 173, 448-459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.109>
- Fernández-García, A., Rojas, E., Pérez, M., Silva, R., Hernández-Escobedo, Q., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat. *Journal of Cleaner Production*, 89, 272-285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.018>

- Forristall, R. (2003). Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. Rapor No: NREL/TP-550-34169, 146s.
- Fuentes-Morales, R. F., Diaz-Ponce, A., Peña-Cruz, M. I., Rodrigo, P. M., Valentín-Coronado, L. M., Martell-Chavez, F., & Pineda-Arellano, C. A. (2020). Control algorithms applied to active solar tracking systems: a review. *Solar Energy*, 212, 203-219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.071>
- García-Cortés, S., Bello-García, A., & Ordóñez, C. (2012). Estimating intercept factor of a parabolic solar trough collector with new supporting structure using off-the-shelf photogrammetric equipment. *Applied Energy*, 92, 815-821. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.032>
- Gately, D. (1984). A ten-year retrospective: OPEC and the world oil market. *Journal of Economic Literature*, 22(3), 1100-1114.
- Ghodbane, M., & Boumeddane, B. (2018). Engineering design and optical investigation of a concentrating collector: case study of a parabolic trough concentrator. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 10(2), 148-171. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i2.11>
- Ghodbane, M., Boumeddane, B., Khechekhouché, A., & Largot, S. (2022). Study of the effect of the position and metal of the receiver tube on the performance of a parabolic trough solar collector. *Materials Today: Proceedings*, 51(7), 2144-2151. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.497>
- Gholamalizadeh, E., & Chung, J. D. (2017). Design of the collector of a solar dish-stirling system: a case study. *IEEE Access*, 5, 20754-20762. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758354>
- GSA (2022). Türkiye ışıınım haritası. <https://globalsolaratlas.info/downloads/turkey>. (Son erişim tarihi: 24 Haziran 2022)
- GSA (2023a). Europe and central asia irradiation map. <https://globalsolaratlas.info/download/europe-and-central-asia>. (Son erişim tarihi: 04 Mayıs 2023)
- GSA (2023b). Global yatay ışıınım haritası. <https://globalsolaratlas.info/map>. (Son erişim tarihi: 21 Ekim 2023)
- GSA (2023c). Isparta ili güneş verileri. <https://globalsolaratlas.info/detail?c=37.831868,30.526789,18&s=37.8324,30.527444&m=site>. (Son erişim tarihi: 25 Eylül 2023)
- GSA (2024). Global photovoltaic power potential by country. <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>. (Son erişim tarihi: 21 Eylül 2023)

- GRE (2023). Concentrated solar thermal: collecting heat from the sun. <https://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/csttechnologies.php>. (Son erişim tarihi: 07 Temmuz 2023)
- Güneş, M., & Arslan, T. (2018). Enerji bağımlılığında Avrupa Birliği, Rusya, Türkiye üçgeni ve Doğu Akdeniz alanı. *Uluslararası Beşeri Bilimler ve Eğitim Dergisi*, 4(7), 32-60.
- Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: technologies and trackers drive types - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754-782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
- Hassan, A., Quanfang, C., Abbas, S., Lu, W., & Youming, L. (2021). An experimental investigation on thermal and optical analysis of cylindrical and conical cavity copper tube receivers design for solar dish concentrator. *Renewable Energy*, 179, 1849-1864. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.145>
- Haykin, S. S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. New Jersey, Prentice Hall.
- Hoogendoorn, C. J. (1984). Reviews of renewable energy resources: M. S. Sodha, S. S. Mathur and M. A. S. Malik, Vol. 1, Wiley Eastern Lim., New Delhi, 1983, 368 pp. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(4), 636. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90038-3)
- Hoseinzadeh, H., Kasaeian, A., & Behshad Shafii, M. (2018). Geometric optimization of parabolic trough solar collector based on the local concentration ratio using the Monte Carlo method. *Energy Conversion and Management*, 175, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.001>
- Jaramillo, O. A., Borunda, M., Velazquez-Lucho, K. M., & Robles, M. (2016). Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: an analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts. *Renewable Energy*, 93, 125-141. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.046>
- Jeter, S. M., Jarrar, D. I., & Moustafa, S. A. (1983). Geometrical effects on the performance of trough collectors. *Solar Energy*, 30(2), 109-113. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90201-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90201-3)
- Jilte, R., Ahmadi, M. H., Kalamkar, V., & Kumar, R. (2020). Solar flux distribution study in heat pipe cavity receiver integrated with biomass gasifier. *International Journal of Energy Research*, 44(9), 7698-7712. <https://doi.org/10.1002/er.5502>
- Jradi, M., & Riffat, S. (2014). Medium temperature concentrators for solar thermal applications. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 214-224. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts068>

- Kalogirou, S., Lloyd, S., & Ward, J. (1997). Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system. *Solar Energy*, 60(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00131-4)
- Kalogirou, S. (1998). Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination. *Applied Energy*, 60(2), 65-88. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00018-X)
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Cambridge, Academic Press.
- Kalogirou, S. A. (2012). A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*, 48(1), 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.023>
- Kapluhan, E. (2015). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: güneş enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki kullanım durumu. *Coğrafya Dergisi*, 29, 70-98.
- Karimi, R., Gheinani, T. T., & Madadi Avargani, V. (2018). A detailed mathematical model for thermal performance analysis of a cylindrical cavity receiver in a solar parabolic dish collector system. *Renewable Energy*, 125, 768-782. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.015>
- Kasten, F., & Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735-4738. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Katrandzhiev, N. T., & Karnobatev, N. N. (2018). Algorithm for Single Axis Solar Tracker. *2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics-ET*. September 1, Bulgaria, 1-4.
- Kaygusuz, K. (2007). Energy for sustainable development: key issues and challenges. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(1), 73-83. <https://doi.org/10.1080/15567240500402560>
- Khelif, A. K., Al-Maliki, W. A., Abdul Wahhab, H. A., Alobaid, F., Epple, B., & Abtan, A. A. (2023). Parabolic air collectors with an evacuated tube containing copper tube and spiral strip, and a new cavity receiver: experimental performance analysis. *Sustainability*, 15(10), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su15107926>
- Kılıç, F. (2015). Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
- Kotti, M. C., Argiriou, A. A., & Kazantzidis, A. (2014). Estimation of direct normal irradiance from measured global and corrected diffuse horizontal irradiance. *Energy*, 70, 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.012>

- Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., & Zeng, L. (2016). A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>
- Kumaresan, G., Sridhar, R., & Velraj, R. (2012). Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system. *Energy*, 47(1), 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.036>
- Kutner, M. H., Neter, J., Nachtsheim, C. J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models*. New York, McGraw-Hill Irwin.
- Laue, E. G. (1970). The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations. *Solar Energy*, 13(1), 43-57. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(70\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(70)90006-X)
- Liu, Q., Yang, M., Lei, J., Jin, H., Gao, Z., & Wang, Y. (2012). Modeling and optimizing parabolic trough solar collector systems using the least squares support vector machine method. *Solar Energy*, 86(7), 1973-1980. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.026>
- LME (2023). Interface ublox NEO-6M GPS module with arduino. <https://lastminuteengineers.com/neo6m-gps-arduino-tutorial/>. (Son erişim tarihi: 14 Nisan 2023)
- Macedo-Valencia, J., Ramírez-Ávila, J., Acosta, R., Jaramillo, O. A., & Aguilar, J. O. (2014). Design, construction and evaluation of parabolic trough collector as demonstrative prototype. *Energy Procedia*, 57, 989-998. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.082>
- Maia, C. B., Ferreira, A. G., & Hanriot, S. M. (2014). Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 953-962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.052>
- Mastropasqua, L., Pecenati, I., Giostri, A., & Campanari, S. (2020). Solar hydrogen production: techno-economic analysis of a parabolic dish-supported high-temperature electrolysis system. *Applied Energy*, 261, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114392>
- MEGEP (2012). Yenilenebilir enerji kaynakları ve önemi. Milli Eğitim Bakanlığı. https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Yenilenebilir%20Enerji%20Kaynaklar%C4%B1%20Ve%20%C3%96nemi.pdf. (Son erişim tarihi: 04 Eylül 2023)
- Meinel, A. B., & Meinel, M. P. (1976). *Applied Solar Energy. An Introduction*. Michigan, Addison-Wesley Publishing.
- Mohammad Zadeh, P., Sokhansefat, T., Kasaeian, A. B., Kowsary, F., & Akbarzadeh, A. (2015). Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanofluid. *Energy*, 82, 857-864. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.096>

- Moloodpoor, M., Mortazavi, A., & Ozbalta, N. (2019). Thermal analysis of parabolic trough collectors via a swarm intelligence optimizer. *Solar Energy*, 181, 264-275. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.008>
- Montes, I. E. P., Benitez, A. M., Chavez, O. M., & Herrera, A. E. L. (2014). Design and construction of a parabolic trough solar collector for process heat production. *Energy Procedia*, 57, 2149-2158. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.181>
- Montes, M. J., Rovira, A., Muñoz, M., & Martínez-Val, J. M. (2011). Performance analysis of an integrated solar combined cycle using direct steam generation in parabolic trough collectors. *Applied Energy*, 88(9), 3228-3238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.038>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. (2013). Introduction to linear regression analysis, fifth edition by Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. *International Statistical Review*, 81(2), 318-319. https://doi.org/10.1111/insr.12020_10
- Mwesigye, A., Huan, Z., & Meyer, J. P. (2015). Thermodynamic optimisation of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil–Al₂O₃ nanofluid. *Applied Energy*, 156, 398-412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.035>
- Nattappan, A., Ganesan, S., Thiagarajan, V., & Krishnamoorthy, R. (2021). Design of automation control thermal system integrated with parabolic trough collector based solar plant. *Thermal Science*, 26(2), 947-954. <https://doi.org/10.2298/TSCI201113218N>
- Odeh, S. D., Morrison, G. L., & Behnia, M. (1998). Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors. *Solar Energy*, 62(6), 395-406. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00031-0)
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- ParabolaCalc (2023). Parabola calculator. <https://mscir.tripod.com/parabola/>. (Son erişim tarihi: 23 Mayıs 2023)
- Pavlovic, S., Daabo, A. M., Bellos, E., Stefanovic, V., Mahmoud, S., & Al-Dadah, R. K. (2017). Experimental and numerical investigation on the optical and thermal performance of solar parabolic dish and corrugated spiral cavity receiver. *Journal of Cleaner Production*, 150, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.201>
- Pavlović, S. R., Bellos, E. A., Stefanović, V. P., Tzivanidis, C., & Stamenković, Z. M. (2016). Design, simulation and optimization of a solar dish collector with spiral-coil thermal absorber. *Thermal science*, 20(4), 1387-1397. <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI160213104P>

- PVE (2022a). Azimuth angle. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle>. (Son erişim tarihi: 10 Kasım 2022)
- PVE (2022b). Elevation angle. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/elevation-angle>. (Son erişim tarihi: 14 Mart 2022)
- PVE (2022c). Solar time. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-time>. (Son erişim tarihi: 11 Ekim 2022)
- PVE (2023a). Air mass. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>. (Son erişim tarihi: 23 Eylül 2023)
- PVE (2023b). Declination angle. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle>. (Son erişim tarihi: 23 Mart 2023)
- Rabl, A., Bendt, P., & Gaul, H. W. (1982). Optimization of parabolic trough solar collectors. *Solar Energy*, 29(5), 407-417. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90077-9)
- Ratzel, A. C., Hickox, C. E., & Gartling, D. K. (1979). Techniques for reducing thermal conduction and natural convection heat losses in annular receiver geometries. *Journal of Heat Transfer*, 101(1), 108-113. <https://doi.org/10.1115/1.3450899>
- Ravi Kumar, K., & Reddy, K. S. (2009). Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver. *Applied Energy*, 86(9), 1804-1812. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.007>
- Reddy, K. S., Ravi Kumar, K., & Ajay, C. S. (2015). Experimental investigation of porous disc enhanced receiver for solar parabolic trough collector. *Renewable Energy*, 77, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.016>
- Reddy, V. S., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic trough concentrating solar thermal power plant (PTCSTPP). *Energy*, 39(1), 258-273. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.023>
- Saldivar-Aguilera, T. Q., Díaz-Ponce, A., Valentín-Coronado, L. M., Peña-Cruz, M. I., & Acevedo-R, G. A. (2021). Dual Feedback Closed-Loop Control For One-Axis Solar Trackers Of Parabolic Trough Collector Systems. *Conference: 2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. November 10-12, Mexico, 1-6.
- Savangvong, P., Silpsakoolsook, B., & Kwankoameng, S. (2021). Design and fabrication of a solar-dish concentrator with 2-axis solar tracking system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1137(1), 1-11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1137/1/012008>

- SchneiderElectronic (2021). ATV12 değişken frekanslı sürücü. <https://www.se.com/tr/tr/product/ATV12H075M2/h%C4%B1z-kontrol-cihaz%C4%B1-atv12-075kw-1hp-200-240v-1fz-so%C4%9Futma-bloklu/>. (Son erişim tarihi: 11 Kasım 2021)
- Sefa, İ., Demirtas, M., & Çolak, İ. (2009). Application of one-axis sun tracking system. *Energy Conversion and Management*, 50(11), 2709-2718. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.018>
- Shang, H., & Shen, W. (2023). Design and implementation of a dual-axis solar tracking system. *Energies*, 16(17), 1-13. <http://dx.doi.org/10.3390/en16176330>
- Silva, R., Pérez, M., & Fernández-Garcia, A. (2013). Modeling and co-simulation of a parabolic trough solar plant for industrial process heat. *Applied Energy*, 106, 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.069>
- Singh, R. K., & Chandra, P. (2023). Geometrical and optical analysis of small-sized parabolic trough collector using ray tracing tool SolTrace. *Archives of Thermodynamics*, 44(3), 35-61. <http://dx.doi.org/10.24425/ather.2023.147536>
- SolarMillennium (2008). The parabolic trough power plants Andasol 1-3. The largest solar power plant in the world-technology premiere in Europe. <http://large.stanford.edu/publications/power/references/docs/Andasol1-3engl.pdf>. (Son erişim tarihi: 21 Kasım 2023)
- Soltani, S., Bonyadi, M., & Madadi Avargani, V. (2019). A novel optical-thermal modeling of a parabolic dish collector with a helically baffled cylindrical cavity receiver. *Energy*, 168, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.097>
- SolTrace (2021). NREL-concentrating solar power. <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>. (Son erişim tarihi: 21 Ekim 2022)
- Stern, D. I., & Kander, A. (2012). The role of energy in the industrial revolution and modern economic growth. *The Energy Journal*, 33(3), 125-152. <https://doi.org/10.5547/01956574.33.3.5>
- SunEarthTools (2024). Güneş yükseklik ve azimut açısı değişimi. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en. (Son erişim tarihi: 07 Mayıs 2024)
- Temir, A. (2019). *GPS Tabanlı 2-Eksen Güneş Takip Sisteminin Geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Toghyani, S., Baniasadi, E., & Afshari, E. (2016). Thermodynamic analysis and optimization of an integrated rankine power cycle and nano-fluid based parabolic trough solar collector. *Energy Conversion and Management*, 121, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.029>

- Truscello, V. C. (1979). The Parabolic Concentrating Collector: A Tutorial. Rapor No: 5102-107, 40s.
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K. A., & Mitsopoulos, G. (2015). Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.10.005>
- Tzuc, O. M., Bassam, A., Soberanis, M. A. E., & Caamal, M. V. (2016). Optimization Operation Of A Parabolic Trough Collector Using Artificial Neural Network. *2016 XVI International Congress of the Mexican Hydrogen Society (CSMH)*. September 26-30, Mexico, 1-6.
- Ulutekin, S. İ., Şahin, B., Kolcubaşı, G., Alıç, O., & Zirek, A. (2023). Performance Comparison of Fixed and Dual Axis Solar Tracking Systems. *2023 12th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE)*. September 22-24, Eskişehir, 51-54.
- Vidanapathirana, K., Kumrapeli, K., Marasinghe, M., Amarasinghe, D., & Lucas, J. (2021). Performance Evaluation of a Hybrid Dual-Axis Solar Tracking System. *2021 3rd International Conference on Electrical Engineering (EECon)*. September 24, Sri Lanka, 50-55.
- Wang, W., Li, M., Hassanien, R. H. E., Ji, M. e., & Feng, Z. (2017). Optimization of thermal performance of the parabolic trough solar collector systems based on GA-BP neural network model. *International Journal of Green Energy*, 14(10), 819-830. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1333433>
- Wu, Y. T., Liu, S. W., Xiong, Y. X., Ma, C. F., & Ding, Y. L. (2015). Experimental study on the heat transfer characteristics of a low melting point salt in a parabolic trough solar collector system. *Applied Thermal Engineering*, 89, 748-754. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.054>
- Xiong, Y., Ma, C., Wu, Y., & He, H. (2013). Thermal Performance Study of A Parabolic Trough Collectoer Based on Heat Transfer Oil. *ICMREE 2013 - Proceedings: 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*. August 19-21, Chengdu, 70-73.
- Yao, Y., Hu, Y., Gao, S., Yang, G., & Du, J. (2014). A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. *Renewable Energy*, 72, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.002>
- Yılmaz, İ. H., & Mwesigye, A. (2018). Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: a comprehensive review. *Applied Energy*, 225, 135-174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.014>
- Zayed, M., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Elaziz, M. A., & Li, W. (2021b). A hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system integrated with equilibrium optimizer algorithm for predicting the energetic performance of solar dish collector. *Energy*, 235, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121289>

- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Zhong, S., & Kabeel, A. E. (2021a). Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/stirling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.007>
- Zhou, Z., Chen, J., Hu, Z., Nie, D., & Wen, C. (2021). Design of Solar Dish/Stirling Rotation Control System with Dual Axis Solar Tracker. *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*. July 26-28, Shanghai, 5794-5799.



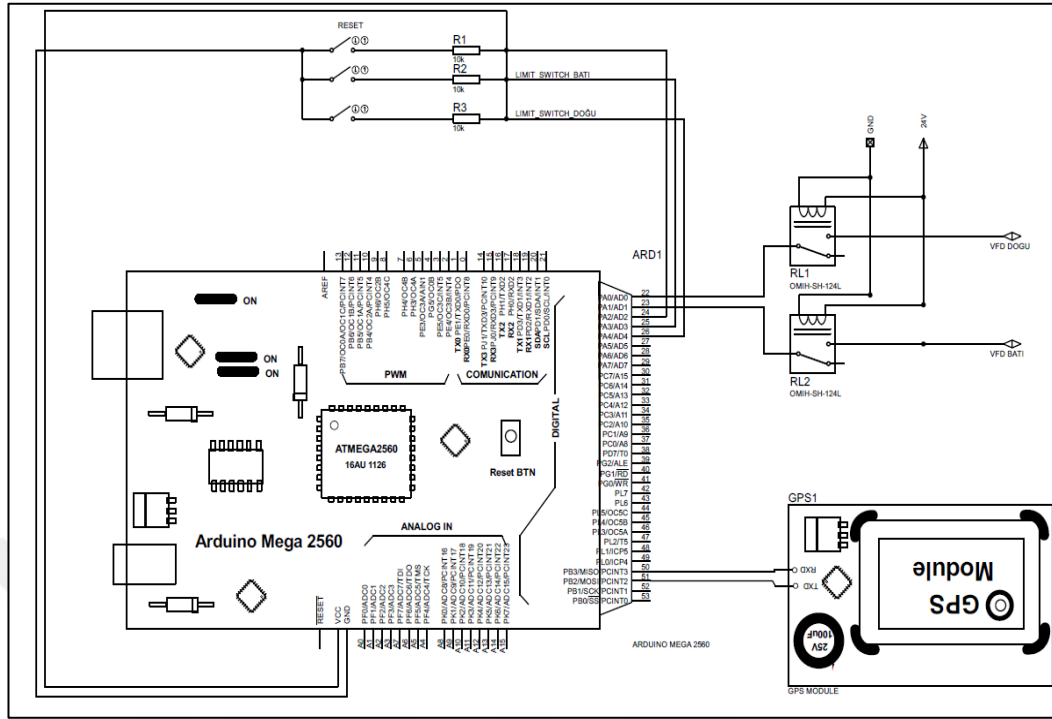
EKLER

EK A. Elektronik Kontrol Devre Şemaları

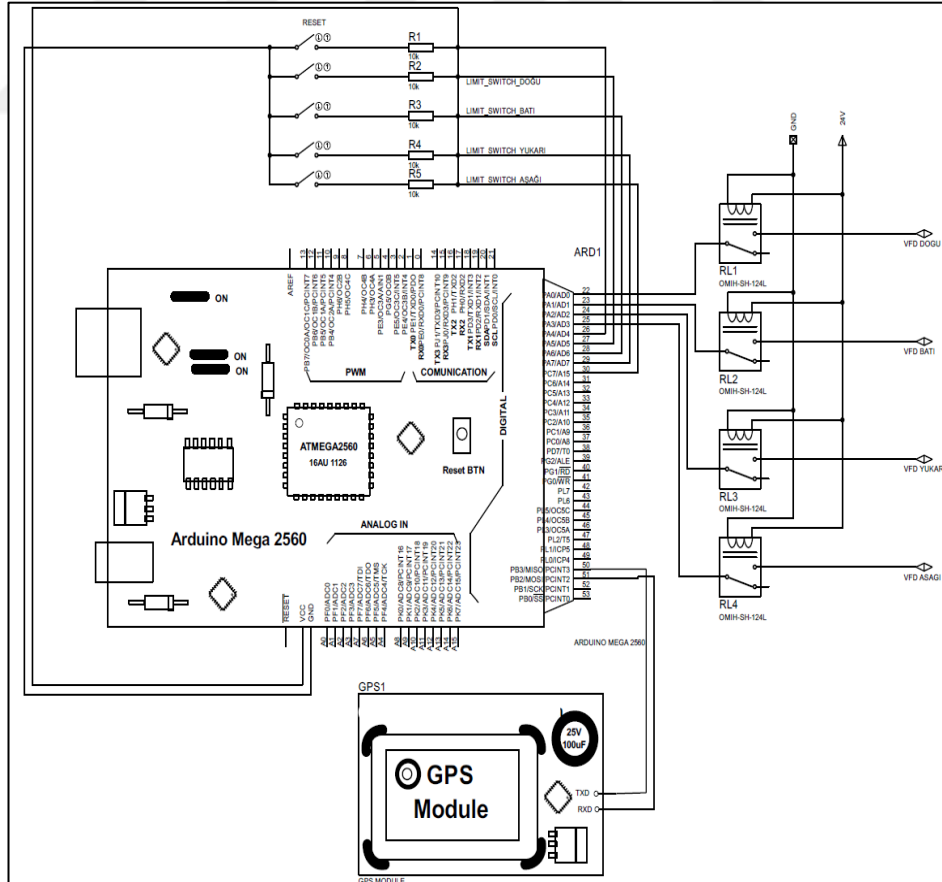
EK B. Algoritmalar



EK A. Elektronik Kontrol Devre Şemaları

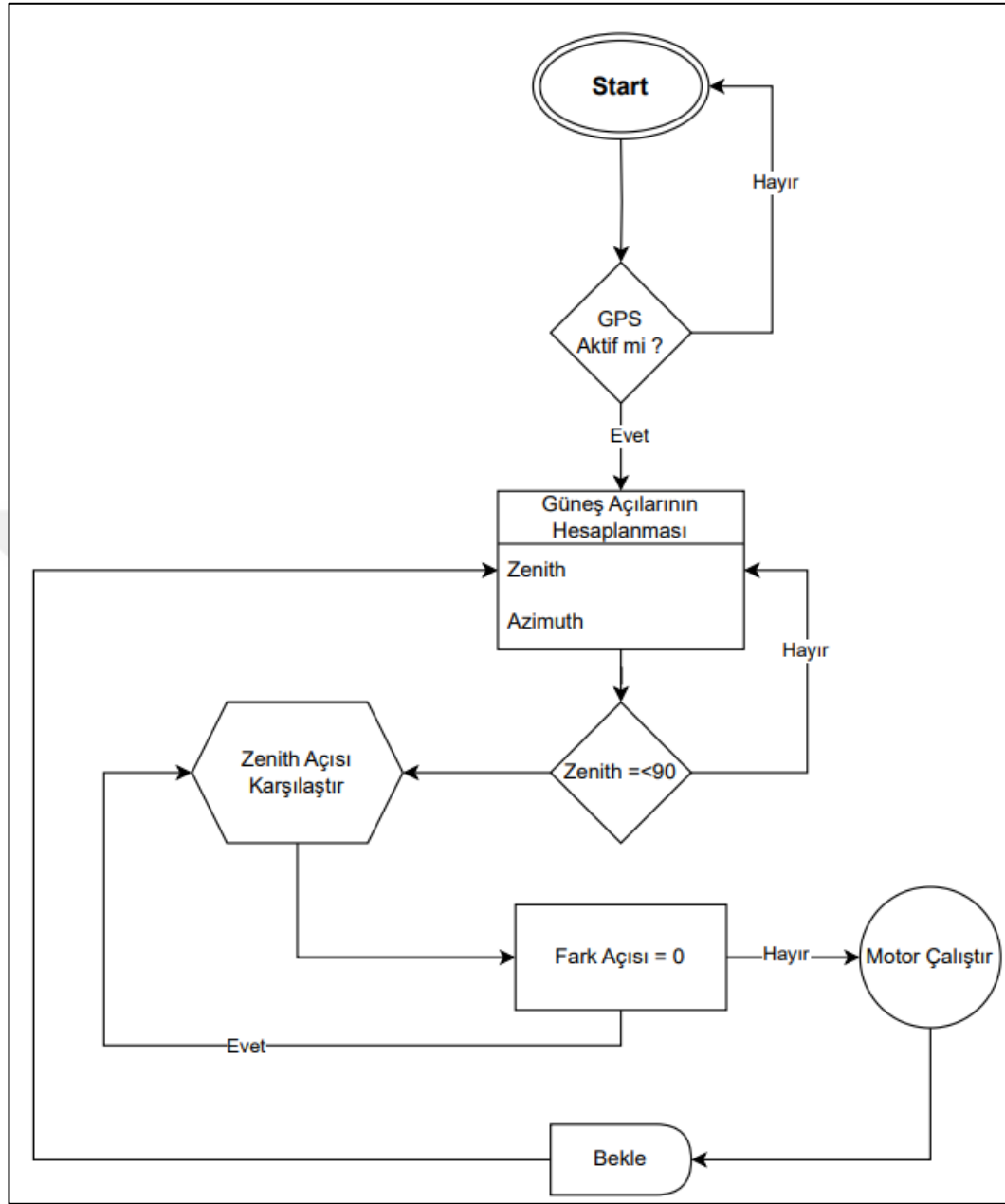


Şekil A.1. Parabolik oluk kolektör elektronik kontrol devre şeması



Şekil A.2. Parabolik çanak kolektör elektronik kontrol devre şeması

EK B. Algoritmalar



Şekil B.1. Parabolik oluk kolektör güneş takip algoritması

```

// Kütüphane Tanımlamaları
#include <SoftwareSerial.h> // SERİ HABERLEŞME KÜTÜPHANESİ
#include <TinyGPS++.h> // GPS KÜTÜPHANESİ
#include <math.h> // MATEMATİK FORMÜL KÜTÜPHANESİ

//Motor PIN İsim Tanımlamaları
#define elevation_asagi 46 // 1. VFD LOJİK_1 +24 VOLT PIN ATAMASI
#define elevation_yukari 47 // 1. VFD LOJİK_2 +24 VOLT PIN ATAMASI

//Limit_Switch Sensor Tanımlamaları
int limit_1 ;
int limit_2;

// GPS PIN ve Connection Tanımlamaları
static const int RXPin = 51, TXPin = 50 ; // GPS CONNECTION PIN TANIMLAMALARI
static const uint32_t GPSBaud = 9600; // GPS CONNECTION BAUD RATE
TinyGPSPlus gps; // GPS DEĞİŞKEN ATAMASI
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin); // SERİAL PORT CONNECTION TANIMLAMASI

// SOLAR FORMÜL HESAPLAMA DEĞİŞKENLERİNİN TANIMLANMASI
float azimuth, elevation, dec, n, sa, azi, zenith ;

// AZIMUTH LOOP DÖNGÜSÜ DEĞİŞKEN TANIMLAMALARI
float azimuth_fark, azimuth_referans, azimuth_time,

```

Şekil B.2. Parabolik oluk kolektör güneş takip yazılımı başlangıç tanımları

```

void solar_formul(){
ss.begin(GPSBaud);
smartDelay(1000);

sa = 15 x (((gps.time.hour() + 3) %24)+ (gps.time.minute()/ 60.0 )) - 12 ;

dec = 23.45 x sin(radians((0.986301) x (n - 81)));

elevation = (asin( ( sin(radians(dec)) x sin(radians(gps.location.lat())) ) + ( cos(radians(dec)) x cos(radians(gps.location.lat())) x cos(radians(sa)) ) ) ) x 57.2957795 ;

azi = asin((cos(radians(dec)) x sin(radians(sa))) / cos(radians(elevation))) x 57.2957795 ;

zenith = 90 – elevation;

}

```

Şekil B.3. Parabolik oluk kolektör güneş açısı fonksiyonu

```

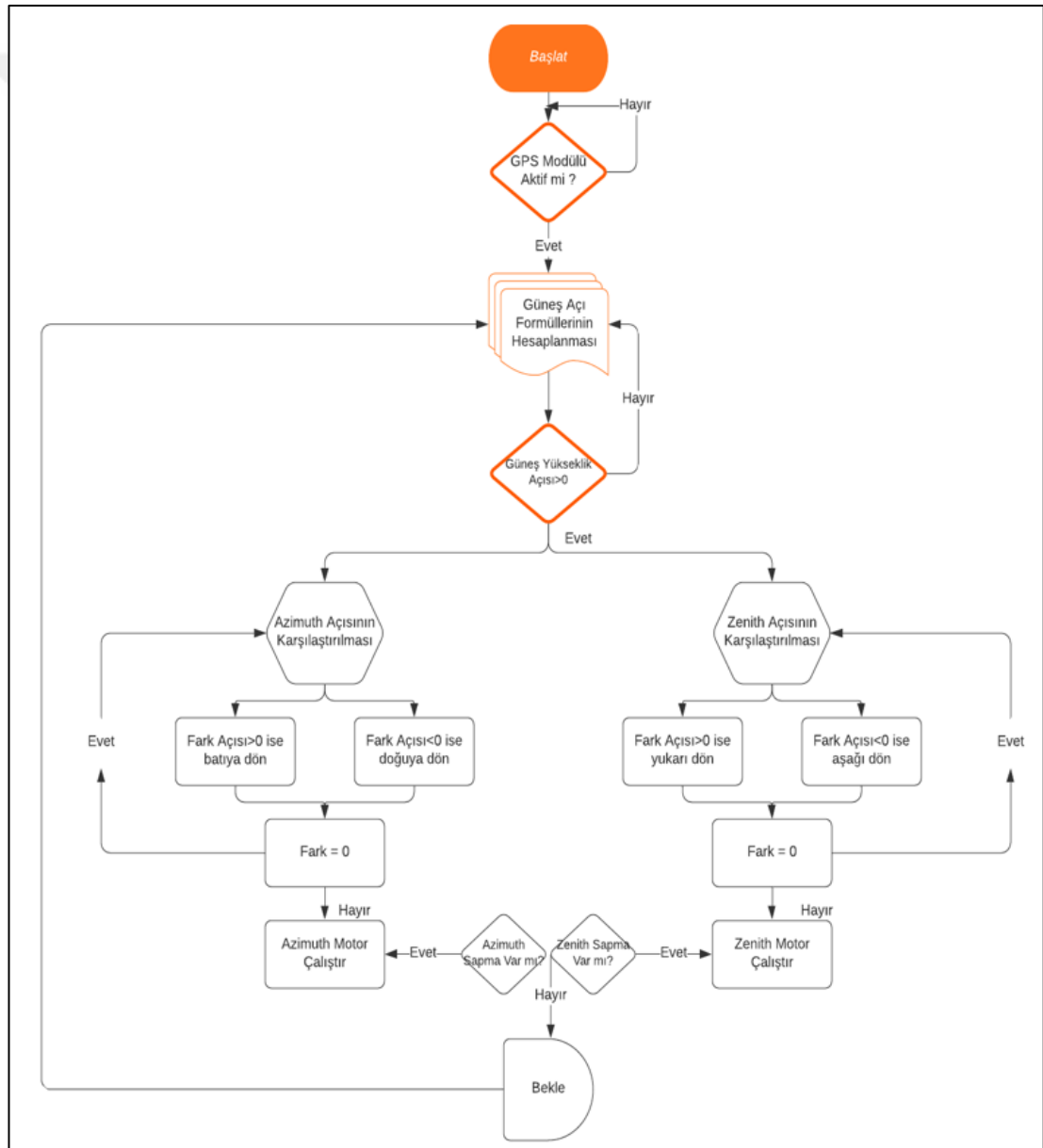
void loop()
{
  limit() ;
  solar_formul() ;
  if(azimuth == 300){
    referans();
  }

  if(elevation >= 0){

    elevation_fark = elevation - elevation_referans ;
    elevation_referans = elevation_referans + elevation_fark ;
    elevation_time = abs(emrs x elevation_fark) ;
  }
}

```

Şekil B.4. Parabolik oluk kolektör ana (loop) fonksiyon



Şekil B.5. Parabolik çanak kolektör yazılım algoritması

```

// Kütüphane Tanımlamaları
#include <SoftwareSerial.h> // CONNECTION KÜTÜPHANESİ
#include <TinyGPS++.h> // GPS KÜTÜPHANESİ
#include <math.h> // MATEMATİK FORMÜL KÜTÜPHANESİ

//Motor PIN Tanımlamaları
#define azimuth_dogu 46 // 1. VFD LOJİK_1 +24 VOLT PIN ATAMASI
#define azimuth_bati 47 // 1. VFD LOJİK_2 +24 VOLT PIN ATAMASI
#define elevation_yukari 49 // 2. VFD LOJİK_1 +24 VOLT PIN ATAMASI
#define elevation_asagi 48 // 2. VFD LOJİK_2 +24 VOLT PIN ATAMASI
//#define INTERRUPT_reset 1 // 3. PIN RESET ATAMASI

//Limit_Switch Sensor Tanımlamaları
int limit_dogu ;
int limit_bati ;
int limit_yukari ;
int limit_asagi ;

// GPS PIN ve Connection Tanımlamaları
static const int RXPin = 3, TXPin = 4 ; // GPS CONNECTION PIN TANIMLAMALARI
static const uint32_t GPSBaud = 9600; // GPS CONNECTION BAUD RATE
TinyGPSPlus gps; // GPS DEĞİŞKEN ATAMASI
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin); // SERIAL PORT CONNECTION TANIMLAMASI
// SOLAR FORMÜL HESAPLAMA DEĞİŞKENLERİNİN TANIMLANMASI
float azimuth, elevation, dec, n, sa, gda, azi, AM, ID, IG, IH, zenith, x ;
// AZIMUTH & ELEVATION LOOP DÖNGÜSÜ DEĞİŞKEN TANIMLAMALARI
float azimuth_fark, elevation_fark, azimuth_referans, elevation_referans, azimuth_time, elevation_time, sa_son ;

```

Şekil B.6. Parabolik çanak kolektör güneş takip yazılımı başlangıç tanımları

```

if(azimuth >= 60 && elevation >= 0 ){

azimuth_fark = azimuth - azimuth_referans ;
azimuth_referans = azimuth_referans + azimuth_fark ;
azimuth_time = abs(amrs x azimuth_fark) ;

elevation_fark = elevation - elevation_referans ;
elevation_referans = elevation_referans + elevation_fark ;
elevation_time = abs(emrs x elevation_fark) ;

if(azimuth_fark > 0){
motor_azimuth_bati_on() ;
delay(azimuth_time);
motor_azimuth_bati_off();
}

if(azimuth_fark < 0){
motor_azimuth_dogu_on() ;
delay(azimuth_time);
motor_azimuth_dogu_off();
}

motor_elevation_yukari_on();
delay(elevation_time);
motor_elevation_yukari_off();

}

delay(240000);

}

```

Şekil B.7. Parabolik çanak kolektör ana (loop) fonksiyon

ÖZGEÇMİŞ

