



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI (DİSİPLİNLERARASI)
ANA BİLİM DALI**

**YOĞUNLAŞTIRICI GÜNEŞ GÜÇ KULELERİNİN
HELİOSTAT MODELLEMESİ VE TASARIMI İLE FARKLI
ENLEMLER İLE TÜRKİYE İÇİN ÖRNEK HESAPLAMALAR**

Yüksek Lisans Tezi

Sadiye Emel KARAOĞLU

Danışman
Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ

SAMSUN
2021

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI (DİSİPLİNLERARASI)
ANA BİLİM DALI**



**YOĞUNLAŞTIRICI GÜNEŞ GÜÇ KULELERİNİN
HELİOSTAT MODELLEMESİ VE TASARIMI İLE FARKLI
ENLEMLER İLE TÜRKİYE İÇİN ÖRNEK HESAPLAMALAR**

Yüksek Lisans Tezi

Sadiye Emel KARAOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Sadiye Emel KARAOĞLU tarafından, Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ danışmanlığında hazırlanan “Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Kulelerinin Heliostat Modellemesi ve Tasarımı ile Farklı Enlemler ve Türkiye İçin Örnek Hesaplamalar” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 12.11.2020 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

| | Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı | İmza | Sonuç |
|----------------------|--|------|--|
| Başkan (Danışman) | Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı | | <input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret |
| Üye | Doç. Dr. Bahadır ACAR Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistem Mühendisliği Bölümü | | <input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret |
| Üye | Dr. Öğrt. Üyesi Engin ÖZBAŞ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yeşilyurt Demir Çelik MYO Enerji Sistemleri Mühendisliği | | <input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY
... / ... / ...
Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığımı taahhüt ve beyan ederim.

İmza

... / ... / 20...

Sadiye Emel KARAOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Kulelerinin Heliostat Modellemesi ve Tasarımı ile Farklı Enlemler ve Türkiye İçin Örnek Hesaplamalar

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 19.01.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 23

Tek kaynak oranı : % 5 çıkmıştır.

İmza

... / ... / 20...

Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ

ÖZET

YOĞUNLAŞTIRICI GÜNEŞ GÜÇ KULELERİNİN HELİOSTAT MODELLEMESİ VE TASARIMI İLE FARKLI ENLEMLER VE TÜRKİYE İÇİN ÖRNEK HESAPLAMALAR

Sadiye Emel KARAOĞLU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Ve Uygulamaları
Yüksek Lisans, Ocak/2021
Danışman: Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ

Enerji ihtiyacı artan nüfus, gelişme ve endüstriye paralel olarak artmaktadır. Enerji ihtiyacı esas olarak yenilenebilir olmayan kömür ve petrol gibi enerji kaynaklarından karşılanmaktadır ve bu enerji kaynakları hava ve çevre kirliliğine neden olmanın yanında kullandıkça tükenmekte ve yerine konulamamaktadır. Bunun yerine, enerji ihtiyacı sürdürülebilir ve yenilenebilir olan Güneş gücünden karşılanabilir. Güneş enerjisi, birçok nedenden dolayı gelecek için umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Öncelikle temiz enerjidir ve tabiat için kesinlikle zararlı değildir; dolayısıyla fosil yakıtlardan kaynaklanan küresel ısınma sorunu için akılcı bir çözümdür. Bir diğer neden, enerji ihtiyacının büyük kısmını dışarıdan karşılayan Türkiye için umut verici bir çözümdür.

Güneş enerjisini değerlendirmenin birkaç yolu vardır; bunların arasında fotovoltaik Güneş panelleri kısmen ucuzdur, kullanıma hazırdır ve kolay kurulabilir, ne var ki fotovoltaik paneller sadece Güneş varken elektrik üretir. Diğer bir teknik, yoğunlaştırıcı Güneş güç kulesi (CSP) teknolojisidir: Bu sistem gündüz vakti elektrik enerjisi üretir, enerjinin bir kısmını ısı deposu olarak depolar, Güneş battıktan sonra da bir süre elektrik üretmeye devam eder. CSP sistemi bilinen ve ucuz malzemeler kullanılarak bilinen mühendisliklerle yapılabilir. Kesinlikle çevre kirlenmesine neden olmaz.

Türkiyenin güney bölgeleri ile komşu ülkeler CSP sisteminden enerji üretmek üzere yararlanmak için uygundur. Bunun ötesinde, bu tesislerin çoğu bu ülkelerin kendi imkanlarıyla yapılabilecek özelliktedir. Önce yapılması gereken işlem arazi seçimi ve fizibilitesinin yapılması, uygun ve özel bir modelin belirlenmesidir. Başlama noktası toplayıcı aynaların ve kule yüksekliğinin, teknik ismiyle *heliostatın* tasarlanması olacaktır. Bu çalışmada seçilen araziye uygun *heliostat* yerleşimini değişik giriş parametreleriyle bağlı hesaplayan basit ve uygun bir algoritma ve buna dayalı bir yazılım geliştirmeyi amaçladık. Bu algoritma ile Güneş izleyici mekanizma için anlık yönelim verisi de üretmektedir.

Anahtar Sözcükler: Güneş enerjisi, Yenilenebilir enerji, fotovoltaik, Yoğunlaştırıcı Güneş güç kulesi, CSP

ABSTRACT

MODELİNG AND DESIGNING OF CONCENTRATING SOLAR POWER TOWERS HELIOSTAT AND SAMPLE CALCULATIONS FOR DIFFERENT LATITUDES AND TURKEY

Sadiye Emel KARAOĞLU

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Renewable Energy and Applications

Master, Januar 2012

Supervisor: Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ

Need to energy increases with increasing population and advancement in industry and required amount is produced mainly from non-renewable sources like coal and oil which causes air and environmental pollution, moreover they come to an end and cannot be put back. Instead, energy can be supplied from solar power which is sustainable and renewable. Solar energy is one of the favorable promising renewable energy resources because of several reasons. First of all, it is clean and is not absolutely harmful for nature, and one of the reasonable solutions for global warming arising mainly from fossil fuels. The next reason, which is is a promising solution for Turkey importing large amount of energy from other countries.

There are several ways of utilizing solar energy, among them photovoltaic Solar panels are relatively cheap, easily installable and “ready to use”, but they produce electric energy only sunny time. The next alternative is concentrating solar power (CSP) technology with additional advantages: it produces electric energy during daytime, stores some energy as heat and can continue producing electric energy for a certain time after sunset. CSP sistem can be built up using well known and cheap materials and known engineering. It does not never cause environmental pollution.

The southern regions of Turkey and even of the neighboring countries are capable of utilizing CSP as alternative energy supply system. Moreover, most of these facilities can be constructed by the countries themselves using simple and cheap materials. Before starting realization, of course field and feasibility of system on suitable and proper model is necessary. The starting point is the design of collecting mirrors and tower height, or with the well-known term *heliostat*. In this work we developed a simple and versatile algorithm and software to determine optimum *heliostat* placement in a chosen field working with different input parameters. The algorithm ve yazılım also calculates necessary orientation data for instantaneous Solar tracking mechanism.

Keywords: Solar energy, Renewable energy, Photovoltaic, concentrating solar power, CSP.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında “ Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Kulelerinin Heliostat Modellemesi ve Tasarımı ile Farklı Enlemler ve Türkiye İçin Örnek Hesaplamalar” konusu ele alınmaktadır. Bu konunun belirlenmesinde, tez yazım sürecinde, verilerin analizi, yorumlanması, değerlendirilmesinde yol gösterici olan ve çalışmamı tamamlamam konusunda öğreticiliğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Recep Tapramaz hocama çok teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, özellikle annem Hacer Karaoğlu ve kızkardeşim Elif Gizem Karaoğlu'na teşekkür ederim.

Her anımda yanımda olan, eşim İdris Aykut Demirbay'a teşekkürlerimi sunarım.

Sadiye Emel KARAOĞLU

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----------|
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri..... | 3 |
| 1.1.1 Güneş Enerjisi..... | 4 |
| 1.1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi..... | 6 |
| 1.1.3 Güneş Enerji Sistemleri | 8 |
| 1.3.3 Güneş Kulesi Sistemleri Uygulamaları | 19 |
| 2. HELİOSTATIN TARİHİ VE LİTERATÜR TARAMASI | 21 |
| 3. KURAMSAL BİLGİLER | 28 |
| 3.1 Heliostat Tasarımının Temelleri..... | 28 |
| 3.2 Heliostat Tasarımının ve Algoritmasının İlkeleri..... | 30 |
| 3.3 Dünyanın Hareketi ile İlgili Tanım, Değer ve İfadeler | 31 |
| 3.3.1 Yıl Günü (Day of Year - n)..... | 32 |
| olacaktır. | 32 |
| 4.3.2 Saat Açısı (Hour Angle - ω) | 33 |
| 3.3.3 Dünyanın Eğimi (Deklinasyon - δ) | 33 |
| 3.3.4 Güneşin Radyasyon Gücü, Güneş Gücü (Insolasyon – P) | 34 |
| 3.3.5 Hava Kütlesi (Air Mass - AM_n)..... | 35 |
| 3.3.6 Güneş İrtifa Açısı (Solar Altitude Angle - α)..... | 36 |
| 3.3.7 Güneş Ufuk (Azimut) Açısı - ϕ_A | 37 |
| 3.3.8 Güneşin Doğma ve Batma Saatleri..... | 37 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR | 40 |
| 4.1 Toplayıcı Ayna Sisteminin Tasarımı..... | 40 |
| 4.1.1 Aynaların Normal Açılarının Hesaplanması..... | 41 |
| 4.1.2 Aynaların Yerleşimi: Fresnel Ayna Dizilimi..... | 44 |
| 4.1.3 Heliostat Halkasındaki Aynaların Arasındaki Mesafeler | 47 |
| 4.2 Aynaların Topladığı Toplam Güç | 48 |
| 4.3 Heliostat Hesaplama Girdileri | 49 |
| 4.4. <i>Heliostat</i> Hesaplama Örnekleri | 51 |
| 4.5. Örnek Güç Hesaplamalarında Ön Kabuller..... | 54 |
| 4.1.1. Ayna Sayısı Hesaplama Örnekleri..... | 54 |
| 4.2. Hesaplama Örnekleri | 56 |
| 4.2.1. Karapınar için Yapılan Hesaplama Örnekleri..... | 57 |
| 4.2.2. Heliostat Aynalarının Koordinat ve Yönelim Örnek Çıktıları | 60 |
| 5. DEĞERLENDİRME | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 64 |
| 7. EK-A. BU TEZ ÇALIŞMASINDA GELİŞTİRİLEN ALGORİTMANIN AKIŞ DİYAGRAMI | 65 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| V | Gerilim |
| J | Joule |
| θ | Zenit açısı |
| \emptyset | Azimut açısı |
| ω | Saat açısı |
| δ | Dünyanın Eğimi |
| P | Güneşin radyasyon gücü |
| α | Güneş irtifa açısı |
| MÖ | Milattan önce |
| IEA | Uluslararası enerji ajansı |
| GJ | Giga Joule |
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri |
| MTEP | Milyon ton petrol eşdeğeri |
| AM | Hava kütlesi |
| FV | Fotovoltaik Güneş Pilleri |
| RES | Rüzgâr Enerji Santralleri |
| HES | Hidroelektrik Enerji Santralleri |
| JES | Jeotermal Enerji Kaynakları |
| MW | Mega Watt |
| CSP | Yoğunlaştırıcı Güneş güç sistemleri |
| GW | Giga Watt |
| UV | Ültraviyole |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil1. 1 Dünya fosil yakıt üretim tahminleri | 1 |
| Şekil1. 2 Güneşten gelen enerji | 5 |
| Şekil 1. 3 Türkiye güneşlenme haritası | 6 |
| Şekil 1. 4 Güneş pilinin yapısının gösterimi | 9 |
| Şekil 1. 5 Düzlemsel Güneş Kollektörü | 11 |
| Şekil 1. 6 Güneş bacası modeli ve çalışma diyagramı | 12 |
| Şekil 1. 7 Su arıtma sistemi..... | 12 |
| Şekil 1. 8 Güneşte ürün kurutma ve kurutma seraları örnekleri | 13 |
| Şekil 1. 9 Güneş ocağı örneği | 14 |
| Şekil 1. 10 Parabolik oluk sistemlerinin çalışma prensibi | 15 |
| Şekil 1. 11 Parabolik çanak yoğunlaştırıcı..... | 15 |
| Şekil 1. 12 Çizgisel Fresnel ayna sisteminin gösterimi. | 16 |
| Şekil 1. 13 Bir CSP örneği | 17 |
| Şekil 1. 14 Güneş kulesi sistemleri çalışmasını gösterir diyagram..... | 18 |
| Şekil 3. 1 21 haziran ve 21 aralık tarihlerinde Dünyanın güneşe göre eğiminin gösterimi... .. | 28 |
| Şekil 3. 2 Yaz Dönümü..... | 29 |
| Şekil 3. 3 Heliostat yerleşiminin yapıldığı koordinat sistemleri..... | 32 |
| Şekil 3. 4 Dünyanın dönme ekseninin eğimi nedeniyle bir yıl boyunca sapmasının değişimi..... | 34 |
| Şekil 3. 5 Dünyaya gelen ortalama güneş radyasyonunun yıl boyunca değişimi | 35 |
| Şekil3. 6 Güneş irtifa açısı | 36 |
| Şekil 3. 7 Yılın belirli günlerinde güneş azimut açısının bir gün boyunca değişimi . | 38 |
| Şekil 4. 1 Bir toplayıcı Güneş kule sisteminin temel değişkenlerin gösterimi..... | 39 |
| Şekil 4. 2 Güneş radyasyonunun aynaların yönelimlerine bağlı yansıttığı radyasyon miktarı ile aynanın normali ve normal açıların gösterimi..... | 41 |
| Şekil 4. 3 Toplayıcı aynaların normallerinin Güneşin irtifa ve azimut açıları ile yerel koordinatın f açısına bağlı fonksiyonlarını bulmak için kullanılan model..... | 42 |
| Şekil 4. 4 Ayna normalinin yerel azimut açısına göre değişimlerine göre örnekler . | 43 |
| Şekil 4. 5Ayna normalinin bazı irtifa açısına göre değişimlerine örnekler..... | 43 |
| Şekil 4. 6 Bir heliostatta aynaların yerleşimi gösterimi | 44 |

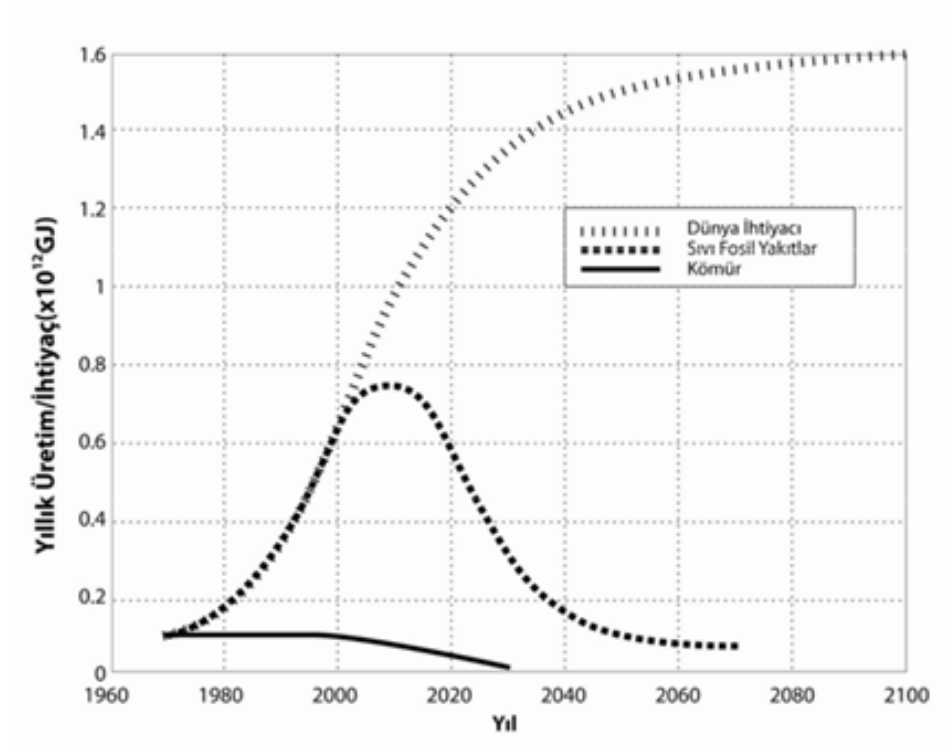
| | |
|--|----|
| Şekil 4.7 Bir heliostat halkasında yanyana dizilen aynaların aralarındaki mesafeninyerleşimini gösterimi | 47 |
| Şekil 4. 8 Örnek heliostat hesaplama programının arayüzü..... | 50 |
| Şekil 4. 9 Örnek heliostathesaplama ve tasarımı. | 50 |
| Şekil 4. 10 Örnek heliostathesaplama ve tasarımı. | 51 |
| Şekil 4. 11 Örnek heliostathesaplama ve tasarımı.. | 51 |
| Şekil 4. 12 Örnek heliostathesaplama ve tasarımı.. | 52 |
| Şekil 4. 13 Karapınar farklı iki kule yüksekliği için yapılan hesaplama. | 54 |
| Şekil 4.14 Güneş kuşağı olan Sahra çölünden(Libya)başlayıp Kuzey Yarımkürede güç ve enerji hesaplaması için örnekler..... | 55 |
| Şekil 4.15 Sahra çölünden kuzey yarımküreye doğru seçilen farklı enlemlerdeki mekezlere yapılan heliostat hesaplama örnekleri..... | 56 |
| Şekil 4. 16 Şekil 4.15'te verilen güç değişimlerini izleyen aylık enerji değişimleri.... | 56 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Tablo 1.1 Gelecekteki yenilebilir enerji tahminleri | 3 |
| Tablo 1.2 Türkiye'nin aylara göre aldığı güneş enerjisi ve güneşlenme günü..... | 7 |
| Tablo 1.3 Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı | 7 |
| Tablo 1.4 Dünya üzerindeki deneysel-ticari amaçlı kullanılan güneş kulesi sistemi..... | 19 |
| Tablo 4.1. Güneş kulesi sisteminin tasarım ve hesaplamasında kullanılan değişkenler..... | 42 |
| Tablo 4.2 Çalışmada oluşturulan yazılımla tasarlanan heliostatın çıktısı olan aynaların koordinatlarına ve ayna yönelimlerine örnek veriler..... | 58 |

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve gelişen ülkelerde hayat standartlarını yükselmesi için artan talep nedeniyle enerji ihtiyacı ve tüketimi de sürekli artmaktadır. Günümüzde dünyanın enerji talebinin %65 oranı, ki oldukça büyüktür, kolay ulaşılabildiği ve kullanıma uygunluk nedeniyle petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Eldeki verilere ve beklentilere göre Dünyanın fosil yakıt üretiminin ve tüketiminin kısa süre içinde maksimum olacağı ve bundan sonra sürekli azalmaya başlayacağına kesin gözüyle bakılmaktadır. Şekil 1.1 yıllara göre Dünyanın fosil yakıtların üretim oranını ve dünya talebinin değerlendirmesini göstermektedir (Veziroğlu ve Şahin, 2008).



Şekil 1.1 Dünya fosil yakıt üretim tahminleri (Veziroğlu ve Şahin, 2009)

2005 yılı sonu verilerine göre tüketilen toplam enerjinin %81 oranı (%25 kömür + %35 petrol + %21 doğalgaz) ve elektriğin %67 oranı, (%40 kömür + %7 petrol + %20 doğalgaz), fosil yakıtlarından üretilmiştir. Geriye kalan enerji üretiminin %6 oranı ve elektrik üretiminin de %15 oranı nükleer enerji kaynaklıdır. Enerjinin geriye kalan %13 kısmı ve elektriğin de %18 oranı çevre dostu, sürdürülebilir ve tüketildiği

halde yerine yenisi gelen başta hidroelektrik (%16) olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Dünya elektrik enerjisi üretimi 1973’de 6,1 trilyon kWh iken 2005’de 18,2 trilyon kWh olmuştur ve bu süre zarfında yıllık CO₂ emisyonu 15,7 milyar tondan 27,1 milyar tona çıkmıştır. Bu da sera etkisi nedeniyle küresel iklim değişikliği, yani küresel ısınma riskini ve dünyanın geleceği ile ilgili kaygıları arttırmaktadır (Çengel, 2009).

Ülkemiz bir taraftan önemli petrol üreticileri olan Azerbaycan, Türkmenistan ve İran, Irak ülkeleri ile petrole ihtiyacı olan Avrupa ülkeleri arasında doğal bir “enerji aktarım köprüsü” oluşturmaktadır. Ülkemizin güneyinde bulunan Ceyhan Limanı, Irak ve Azeri petrolerini batı piyasalarına ulaştırmak için önemli bir çıkış noktasıdır. Bunun yanında İstanbul ve Çanakkale boğazları da deniz taşımacılığında Akdeniz ve Karadeniz arasında önemli bir yoldur. Türkiye’nin günümüzdeki nüfusu 80 milyondan fazla olup yıllık %1,7 ve üzeri büyüme hızıyla 2022 yılında 84 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Nüfus artışı, hızlı kentleşme ve ekonomik büyüme, daha rahat ve konforlu yaşama isteği ve coğrafik konumundan dolayı ülkemiz son 20 yılda dünyanın en hızlı büyüyen ülkelerinden biri haline gelmiştir. Bu durum Türkiye’nin enerji ihtiyacını günden güne arttırmaktadır (Demirbaş, 2001; Evrendilek ve Ertekin, 2003).

Türkiye yeterli yenilenebilir enerji kaynaklarına rağmen enerji ihtiyacının %70’den fazlasını ithal yoluyla sağlayan ve ne yazık ki enerjide büyük çapta dışa bağımlı olan bir ülkedir. Ekonomisindeki ve sanayisindeki hızlı büyüme ve dolayısıyla enerji kullanımındaki yüksek artış yüzünden bu bağımlılık gittikçe artmaktadır. Türkiye’nin 2007 brüt elektrik üretimi 191 milyar kWh’tır ve bunun %49 oranı doğal gaz, %19 oranı hidroelektrik, %28 oranı kömür ve %4 oranı diğer biyodizel gibi sıvı yakıtlardan sağlanmaktadır. Türkiye son yıllara kadar yeraltı ve yerüstü enerji zenginliklerini neredeyse görmezden gelmiş ve artan enerji ihtiyacını ithal yoluyla karşılama yoluna gitmiştir. Bunun sonucu olarak Türkiye’nin yüksek ithal enerji faturası da ödemeler dengesinde ciddi bir risk oluşturmaktadır. Ayrıca, enerji güvenliği de tehdit altındadır. Bu kaynakların yanında son yıllarda Türkiye’de yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimine ciddi bir yöneliş olmuştur (Çengel, 2009).

Türkiye’de fosil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve kullanımlarının yarattığı çevre kirliliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve teknolojilerinin değerlendirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Hidroelektrik, biyokütle, rüzgâr, güneş

ve jeotermal başlıca Türkiyede değerlendirilebilecek yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bir çok gelişmiş ve sanayileşmiş ülkede fosil kaynakları olmasına rağmen bunun yerine yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı, etkin bir şekilde artmaya başlanmıştır. Temiz, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları sadece Türkiye için değil, tüm dünya için gelecek vaat etmektedir (Demirbaş, 2001; Evrendilek ve Ertekin, 2003).

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri

Yenilenebilir enerji, doğanın kendi döngüsü içinde, kullanılsa veya kullanılmasa bir sonraki evrede aynen mevcut olabilen enerji kaynağı olarak tanımlanabilir. Diğer bir ismiyle bu enerjiye yeşil enerji de denilir. Doğa dostudur. Çevreyi kirleten ve tüketilmesi kaçınılmaz olan birincil kaynak olarak tanımlanan fosil enerji kaynaklarının yerini alabilecek, çevre kirliliği yaratmayan, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş, rüzâar, jeotermal, hidrolik, hidrojen enerjisi, gel-git ve deniz dalgası gibi deniz kökenli enerjiler ve biyokütle enerjisi başlıkları altında incelenebilir (Güneş, 1999; Oktit, 2000).

Yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel enerji kaynakları olan fosil yakıtlarla dört farklı alanda rekabet içindedir: Enerji üretimi, sıcak su sağlama ve ısınma, araç yakıtları ve diğer faaliyetler. Yenilenebilir enerji Dünyadaki enerji üretiminin yaklaşık %5-%6 oranını oluşturmakta ve hidroelektrik enerjisi hariç global elektrik üretiminin yaklaşık %3 oranını karşılamaktadır. Birçok meskenin sıcak su ve mekân ısınması güneş, biyokütle ve jeotermal enerji ile sağlanmaktadır. Dünyada Güneş kolektörlerinin yaklaşık 40 milyon meskende kullanıldığı belirlenmiştir. Biyokütle ve jeotermal enerji sanayii, konutların ısınması ve sıcak su kullanımı ile soğuk havalarda seraların ısıtılması gibi tarım uygulamalarında kullanılmaktadır. Gelişen ülkelerde yaklaşık 16 milyon hanede biyogaz, yemek yapma ve aydınlanma için kerosen ve diğer yakıtların yerini almıştır. İki milyondan fazla ev aydınlatmada ve diğer ihtiyaçları için fotovoltaik güneş panellerini kullanmaktadır. Artan sayıda küçük endüstri kuruluşları, örneğin seramik ve diğer toprak işlemlerinde gerekli enerjiyi küçük ölçekli biyogazdan almaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, günümüzdeki verilere göre dünyanın toplam enerji kaynak kullanımının yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük kısmı elektrik üretmede kullanılmaktadır. Dünyada geleneksel

biyokütlenin ısıtma ve mutfaklarda kullanımı yaklaşık %9 oranında, hidroelektrik enerjisinin kullanımı yaklaşık %6 oranında ve biyoyakıtların kullanımı %2 oranındadır (Bilgen vd., 2008).

Tablo 2.1’de ton eşdeğeri petrol (TEP) olarak verilen birim üzerinden 2040 yılına kadar enerji ihtiyacı tahminini vermektedir. Avrupa Yenilenebilir Enerji Konseyi’nin (EREC), 2006 verilerine göre Dünyanın enerji ihtiyacının yaklaşık yarısı 2040 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanacaktır. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesindeki en önemli gelişmelerin 2001 ve 2040 yılları arasında fotovoltaik güneş panellerinde ve rüzgâr enerjisinde olması beklenmektedir, (Demirbaş, 2009). Fotovoltaik güneş panelleri ya da dizinleri kullanılarak güneşten doğrudan elektrik elde etmede kullanılan aygıtlardır.

Tablo 1.1 2001- 240 yılları arasında yenilebilir enerji kaynaklarından enerji üretim tahminleri, (Demirbaş, 2009). (Birimler ton eşdeğeri petrol, TEP olarak verilmiştir. 1 TEP=10x10⁶ kCal=11600 kWh).

| | 2001 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
|--|--------|--------|--------|-------|-------|
| Toplam tüketim | 10038 | 10549 | 11425 | 12352 | 13310 |
| Biyokütle | 1080 | 1313 | 1791 | 2483 | 3271 |
| Büyük hidroçüç | 22,7 | 266 | 309 | 341 | 358 |
| Jeotermal | 43,2 | 86 | 186 | 333 | 493 |
| Küçük hidroçüç | 9,5 | 19 | 49 | 106 | 189 |
| Rüzgar | 4,7 | 44 | 266 | 542 | 688 |
| Güneş | 4,1 | 15 | 66 | 244 | 480 |
| Fotovoltaik | 0,2 | 2 | 24 | 221 | 784 |
| Güneş termal elektrik | 0,1 | 0,4 | 3 | 16 | 68 |
| Deniz (gel-git, okyanus) | 0,05 | 0,1 | 0,4 | 3 | 20 |
| Toplam yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli | 1365,5 | 1745,5 | 2694,4 | 4289 | 6351 |
| Yenilenebilir enerji | 13,6 | 16,6 | 23,6 | 34,7 | 47,7 |

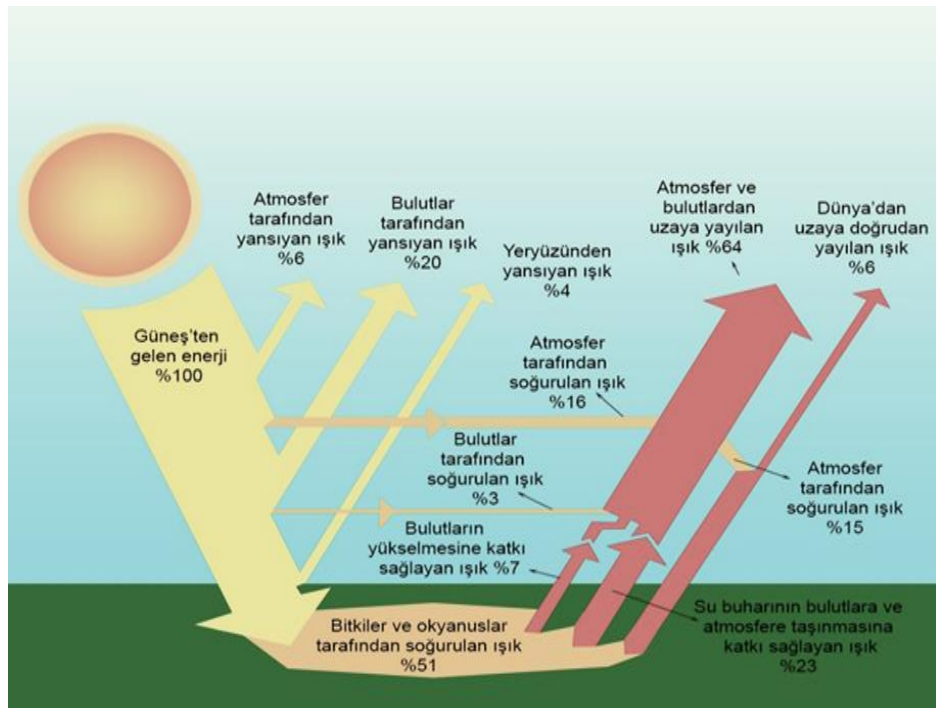
1.1.1 Güneş Enerjisi

Güneş, Dünya’ya yaklaşık 150 milyon km uzaklıkta ortanın altı büyüklülte bir yıldızdır. Çapı Dünya çapının 109 katıdır (1.4 milyon km). Yüzey sıcaklığı faal ve sakin zamanlara bağlı olarak 6000 ile 5500 K, çekirdek sıcaklığı 15x10⁶ K’dir. Yapısında bulunan maddeler, kütesinin %74 ve hacminin %92 oranı Hidrojen,

kütlesinin %24 ve hacminin %7 oranı Helyum, diğer kısmı Fe, Ni , O, Si, S, Mg gibi elementlerdir.

Güneş radyasyonunun tamamı yeryüzüne ulaşmaz, yıllık ortalama %30 kadarı atmosferden uzaya geri yansıtılır, %20 oranı atmosferde soğurulur. Güneş radyasyonunun ortalama %50 oranı atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yeryüzünde hayatı mümkün kılar.

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon reaksiyonu ile (hidrojen gazının zincirleme reaksiyon sonucu helyum ve diğer elementlere dönüşme reaksiyonu) açığa çıkan radyasyon enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, ortalama 1370 W/m^2 değerindedir. Türkiye'nin bulunduğu enlem kuşaklarında bu değer atmosferi aşarak yeryüzüne ulaşan miktarı 0 ile 1100 W/m^2 değerleri arasında değişim gösterir. Bu radyasyonun dünyaya ulaşan küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'li yıllardan sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşmüş, çevre kirlenmesi ve sera gazları üretmeyen temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.



Şekil 1.2 Güneş'ten gelen enerji (Anonim,2019c)

1.1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye, bulunduğu kuşak ve coğrafi konumuna bakıldığında sahip olduğu güneş enerji potansiyeli bakımından birçok ülkeye göre bir hayli iyi durumdadır. 36-42° kuzey enlemleri arasında bulunan Türkiye güneş enerjisi potansiyel kuşağının üst sınırlarına yakın bölgede yer almaktadır. Türkiye'nin Güneşlenme haritası Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Güneşten dünya üzerine yaklaşık ve toplam olarak saniyede 170 TW güç gelmektedir. Türkiye'nin güç üretimi 100 milyon MW civarındadır. Bu değer dünyaya gelen güneş gücü ile kıyaslandığında, Türkiye’nin Güneş enerjisi üretiminin dünyaya gelen enerjinin $1/1.7 \times 10^6$ oranı kadardır. 1966-1982 yılları arasında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE aracılığıyla yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam radyasyon şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olarak rapor edilmiştir. Türkiye, yıllık 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeli ile güneş enerjisi tesislerine uygun bir ülke olup, yılda birim metre karesinden ortalama olarak 1100 kWh’lik güneş enerjisi üretebilecek kapasitededir. Bu verilere göre Türkiye için toplam olarak yıllık alınan enerji miktarı ise yaklaşık 1015 kWh kadardır. Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri aylara göre dağılımı Tablo 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2 Türkiye güneşlenme haritası, (www.mgm.gov.tr)

Tablo 1. 2 Türkiye'nin aylara göre aldığı güneş enerjisi ve güneşlenme günü

| Aylar | Aylık Toplam Güneş Enerjisi | | Güneşlenme Süresi |
|-----------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| | (kcal/cm ² -ay) | (kWh/m ² -ay) | (saat/ay) |
| Ocak | 4,45 | 51,75 | 103,0 |
| Şubat | 5,44 | 63,27 | 115,0 |
| Mart | 8,31 | 96,65 | 165,0 |
| Nisan | 10,51 | 122,23 | 197,0 |
| Mayıs | 13,23 | 153,86 | 273,0 |
| Haziran | 14,51 | 168,75 | 325,0 |
| Temmuz | 15,08 | 175,38 | 365,0 |
| Ağustos | 13,62 | 158,40 | 343,0 |
| Eylül | 10,60 | 123,28 | 280,0 |
| Ekim | 7,73 | 89,90 | 214,0 |
| Kasım | 5,23 | 60,82 | 157,0 |
| Aralık | 4,03 | 46,87 | 103,0 |
| Toplam | 112,74 | 1311,00 | 2640 |
| Ortalama | 308,0 cal/cm²-gün | 3,6 kWh/m²-gün | 7,2 saat/gün |

Güneydoğu Anadolu Bölgesi Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesidir, ikinci sırada Akdeniz Bölgesi gelmektedir. Bu dağılıma göre Türkiye en çok güneş enerjisini Haziranda alırken en az güneş enerjisi aldığı ay da Aralıktır. Tablo 2.3' te Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı verilmiştir. Bölgeler arasında güneş enerjisini almada öncelikli sırayı Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz kıyıları almaktadır. Karadeniz Bölgesi'nde ise güneş enerjisi diğer bölgelere göre azdır, ancak değerlendirilemez değildir.

Tablo 2.3 Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

| Bölge | Toplam ortalama güneş enerjisi | En çok güneş enerjisi (Haziran) (KWh/m ² yıl) | En az güneş enerjisi (Aralık) | Ortalama güneşlenme süresi | En çok güneşlenme süresi (Haziran) (Saat) | En az güneşlenme süresi (Aralık) |
|-------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|----------------------------|---|----------------------------------|
| Güneydoğu Anadolu | 1.460 | 1.980 | 729 | 2.993 | 407 | 126 |
| Akdeniz | 1.390 | 1.869 | 476 | 2.956 | 360 | 101 |
| Doğu Anadolu | 1.365 | 1.863 | 431 | 2.664 | 371 | 96 |
| İç Anadolu | 1.314 | 1.855 | 412 | 2.628 | 381 | 98 |
| Ege | 1.304 | 1.723 | 420 | 2.738 | 373 | 165 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-----|-------|-----|----|
| Marmara | 1.168 | 1.168 | 345 | 2.409 | 351 | 87 |
| Karadeniz | 1.120 | 1.315 | 409 | 1.971 | 273 | 82 |

1.1.3 Güneş Enerji Sistemleri

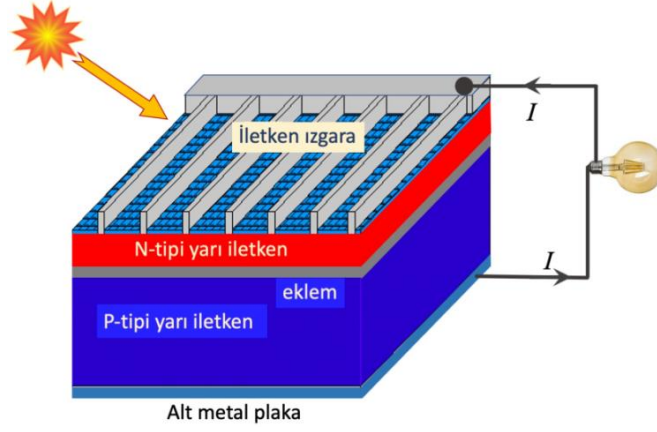
Güneşten gelen enerjiyi kullanmak için birçok sistem geliştirilmiştir. Güneş enerjisi sistemleri, termal (ısı) sistemler ve fotovoltaik sistemler olmak üzere kendi arasında ikiye ayrılır. Bu sistemler aşağıda kısaca verilmiştir.

1.1.3.1 Fotovoltaik Güneş Pilleri

Fotovoltaik Güneş pilleri (kısaca FV piller), yüzeylerine gelen güneş radyasyonunu doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen FV modüller genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,1- 0,4 mm arasındadır. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak üzerlerine ışık düştüğü zaman iki kurbu arasında elektrik gerilimi ve elektrik akımı, dolayısıyla elektrik enerjisi oluşur. Pilin ürettiği elektrik enerjisinin kaynağı yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, FV güneş pilinin yapısına bağlı olarak %5 ile %30 arasında bir verimle elektrik enerjisine dönüştürülür. Güç çıkışını artırmak amacıyla yeni yarıiletken pil geliştirme çalışmaları sürmektedir. Halihazırda çıkış gücünü arttırmak için çok sayıda mevcut güneş hücresi birbirine paralel ve seri bağlanarak bir panel üzerine monte edilir, bu yapıya fotovoltaik Güneş paneli denilmektedir. Güç talebine bağlı olarak paneller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak birkaç W güçten MW mertebelerinde güç çıkışı alınabilmektedir.

Fotovoltaik hücreler pek çok farklı yarıiletkenden üretilmektedirler. Günümüzde en çok kullanılan yarıiletkenlerden başlıcaları aşağıda verilmiştir:

a. Kristal Silisyum (c-Si): Önce büyütülüp daha sonra 150-200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen tek kristal silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen çok kristal silisyum güneş pilleri daha ucuza üretilmektedir, ancak verimleri diğerleriyle karşılaştırıldığında bir hayli düşüktür. Verim, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.



Şekil 1.3 Güneş pilinin yapısının gösterimi

b. Amorf Silisyum (a-Si):Kristal yapı özelliği göstermeyen bu Si pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan a-Si piller direkt güneş ışınımı az olan bölgelerde enerji üretiminde kullanılmaktadır. a-Si pilin bir başka önemli uygulama sahası ise yeşil bina olarak isimlendirilen binalarda entegre yarısaydam cam yüzeylerde hem bina dış koruyucusu ve hem de enerji üretme uygulamalarıdır.

c. GaAs: Bu yarıiletken pillerle laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır. Bu pilin belki de tek dezavantajı üretim maliyetlerinin pahalı olması, dolayısıyla ticari olmaya uygun olmamalarıdır.

d. CdTe: Çok kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş hücre maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir. CdTe pillerin üretimleri kolay ve ucuzdur, esnek panellerde kullanılabilirler, ancak Cd zehirli olduğundan yerleşim yerlerinden çok uzaklarda çöl veya çölleşme olan bölgelerde kullanılabilirler.

e. CuInSe₂: Bu çok-kristal yarıiletken fotovoltaik hücre laboratuvar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10,2 verim elde edilebilmektedir. Bu pil de esnek yapıda yapılabilir.

f. CIGS (CuInGeSe₂): Bir alaşım olan bu yarıiletken en çok uygulanan fotovoltaiik pil teknoloji malzemelerinden birisidir. Laboratuvar şartlarında verimleri %20 civarındadır. Buna karşın oldukça iyi soğurma özelliğine sahip olması, esnek panel yapımı için çok ince yapılabilmesi, diğer yarıiletkenlere göre imalatının daha kolay ve üretiminin ucuzluğu CIGS fotovoltaiiklere olan ilgiyi son yıllarda arttırmıştır.

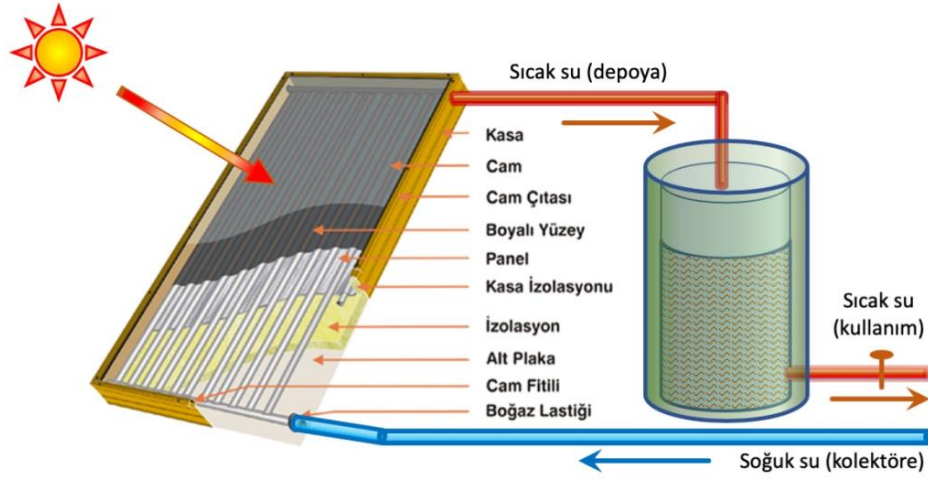
g. Optik Yoğunlaştırıcılı Hücreler: Gelen ışığı 10-500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcılı araçlarla modül verimi %20'nin, hücre verimi ise %30'un üzerine çıkılabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar basit ve ucuz saydam plastik malzemeden veya camdan yapılmaktadır. Yoğunlaştırıcıların belki de tek dezavantajı, fotovoltaiik pili aşırı ısıtmasıdır. Bu nedenle ısınmaya dayanıklı yarıiletken fotovoltaiik pillerde kullanılabilirler.

1.1.3.2 Termal Güneş Enerji Sistemleri

A. Düşük Sıcaklık Sistemleri

a. Düzlemsel Güneş Kolektörleri

Güneş enerjisini toplayan ve bir ısı değiştirici akışkana aktaran çeşitli tür ve biçimlerdeki enerji üreten teknolojilerine dayalı aygıtlardır. Bu kolektörlerin en bilinenleri evlerde sıcak su temin amacıyla kullanılan türleridir. Suyu yaklaşık 70 °C sıcaklığa ısıtmaktadırlar. Düzlemsel güneş kolektörlerinin yapısı, üstten alta doğru üst koruyucu cam kaplama, cam ile siyah cisim olarak davranan absorban plaka arasında yalıtım ve sera etkisi oluştıran boşluk, çoğunlukla siyaha boyanmış metal veya az da olsa plastik absorban plaka, arka ve yan yalıtım ve bu bölümleri içine alan bir kasadan oluşmuştur. Absorban katmanın yüzeyi genellikle koyu renkte olup bazen seçiciliği artıran bir madde ile kaplanır. Kolektörler yörenin enlemine bağlı olarak güneşi maksimum düzeyde alacak şekilde sabit bir açıyla yerleştirilirler. Güneş kolektörlerindeki su hareketi tabii dolaşımlı ve pompalı olmak üzere ik farklı teknikte sağlanabilir. Bu sistemler evlerin yanında, yüzme havuzları ve sanayi tesisleri için de sıcak su üretiminde kullanılır. Bu kolektörlerin bir yanda Ar-Ge çalışmaları sürmekle birlikte, tamamen ticari ürün olarak üretilmektedir ve temin edilebilmektedirler. Dünya üzerinde kurulu güneş kolektörünün toplam alanı 30 milyon m²'nin üzerindedir. En fazla güneş kolektörü bulunan ülkeler Çin, ABD, Japonya, Avustralya, Türkiye, İsrail ve Yunanistan'dır. Ayrıca Türkiye 18 milyon m² kurulu kolektör alanı ile dünyanın önde gelen ülkelerinden biri konumundadır.



Şekil 1.4 Düzlemsel Güneş Kollektörü

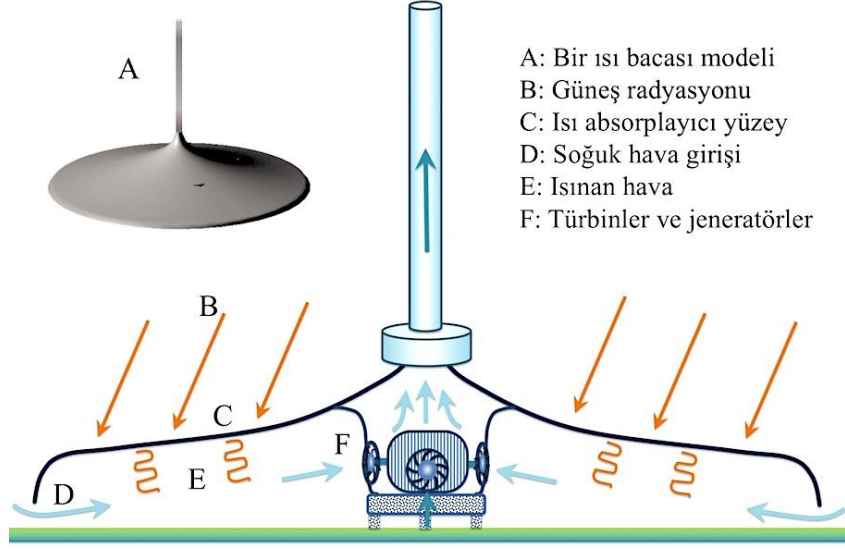
b. Güneş Havuzları

Güneş havuzları yaklaşık 5 veya 6 metre derinlikteki suyla dolu havuzun tabanı ve duvarları siyah olan, güneş ışınımını yakalayıp sıcak su elde edilmesini sağlar. Havuzdaki ısının dağılımını suya eklenen tuz konsantrasyonunun gradienti ile düzenlenir, açık ifade ile tuz konsantrasyonu en üstten alta doğru artar. Böylece en üstte soğuk su yüzeyi bulursa bile havuzun alt kısmında doymuş tuz konsantrasyonu bulunan bölgede sıcaklık yüksek olur. Bu sıcak su bir sıcak su deposuna pompalanarak sıcak su olarak yararlanılabileceği gibi Rankin çevrimi ile elektrik üretiminde de kullanılabilir. Güneş havuzları konusunda en fazla İsrail'de çalışma ve uygulama yapılmıştır. Bu ülkede 150 kW gücünde 5 MW gücünde iki sistemin yanında Avustralya'da 15 kW ve ABD'de 400 kW gücünde güneş havuzları bulunmaktadır.

c. Güneş Bacaları

Bu yöntemde Güneş radyasyonu sonucu oluşan hava hareketinden yararlanılarak elektrik üretilir. Güneşe maruz bırakılan şeffaf malzemeyle kaplı bir yapının içindeki hava çevre sıcaklığından daha fazla ısınacaktır, yani sera etkisi oluşacaktır. Isınan hava yükseleceği için, çatı bacaya doğru eğimli yapılar, hava akışı bu çok yüksek bir bacaya yönlendirilirse baca içinde hızlı bir hava akışı oluşacaktır. Baca girişine yerleştirilecek uygun rüzgâr türbin-jeneratör çifti bu hava akışını elektriğe çevirecektir. Bir tesisin gücünün, güç toplama yüzeyinin büyüklüğüne ve baca yüksekliğine bağlı olarak 30-100 MW arasında olabilir. Deneysel birkaç sistem dışında henüz ticari uygulaması yoksa da gelişmeye açıktır. Yüksek teknoloji gerektirmemesi ve bilinen tekniklerle

yapılabilmesi gelecekte Güneş bacalarını temiz enerji üretimi için güçlü bir aday yapmaktadır.



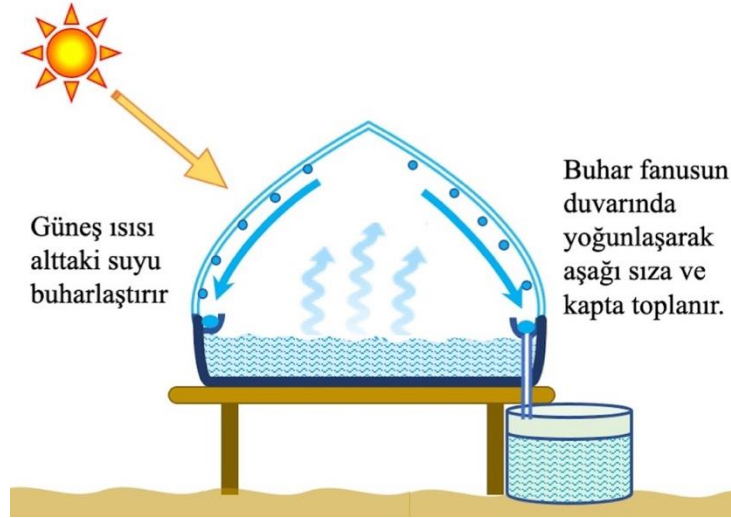
Şekil 1.5 Güneş bacası modeli ve çalışma diyagramı

d. Su Arıtma Sistemleri:

Su arıtma ya da Güneş radyasyonu ile damıtma sistemleri esas olarak sığ bir havuzdan ve üzerine kaplanan saydam fanustan ibarettir. Havuzun üzeri eğimli saydam fanus ile kapatılır. fanus içinde sera etkisi ile yükselen sıcaklık nedeniyle havuzda buharlaşan su bu fanusun iç çeperinde yoğunlaşır ve iç yüzeyde aşağı doğru kayarak drenaj oluğunda toplanırlar. Bu tür sistemler, temiz su kaynağının bulunmadığı bazı yerleşim yerlerinde uzun yıllardan bu yana farklı şekillerde kullanılmaktadır. Su arıtma havuzları üzerinde sürekli yapılan Ar-Ge çalışmaları ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına ve verimin artırılmasına yöneliktir.

e. Güneş Mimarisi

Bina yapı ve tasarımında yapılan değişikliklerle ısıtma, aydınlatma ve soğutma gerçekleştirilir. Pasif olarak doğal ısı transfer mekanizmasıyla güneş enerjisi toplanır, depolanır ve dağıtılır. Ayrıca güneş kolektörleri, fotovoltaik modüller vb. aktif ekipmanlar da yararlanılabilir.



Şekil 1.6 Güneş enerjisi ile su arıtma sistemi

f. Güneşte Ürün Kurutma ve Kurutma Seraları

Bazı tarım ürünlerinin Güneşte kurutulması oldukça eski bir uygulamadır ve doğal bir yöntemdir. Tek sakıncası çevredeki toz, yağmur, nem gibi doğal etkilere ya da hayvanların çeşitli biçimdeki temaslarına ve kirletmelerine açık olmasıdır. Açıkta kurutmanın olumsuzluklarına karşı kullanılan tekniklerden birisi de doğal kurutma seralarıdır. Bu tür sistemler basit ve pasif yapıda olabileceği gibi, hava hareketini sağlayan aktif bileşenler de içerebilir. Açıkta kurutma ya da seralarda kurutma dünyada kırsal yörelerde halen yaygın olarak kullanılmakta ve tüketiciler tarafında bu yolla kurutulan gıdalar tercih edilmektedir.



Şekil 1.7 Güneşte ürün kurutma ve kurutma seraları örnekleri

g. Güneş Ocakları

Parabolid ya da küre biçimli, iç tarafı ışık yansıtıcı özellikli olan güneş ocaklarında Güneş radyasyonu paraboloidin ya da kürenin odağında toplanarak yemek

pişirmede, su ısıtma ya da kaynatmada kullanılır. Bu yöntem, Hindistan, Çin gibi birkaç ülkede ve özellikle kırsal bölgelerde kullanılmaktadır.

B. Yoğunlaştırıcı Güneş Güç Sistemleri

Güneş enerjisi uygulamalarında yüksek sıcaklıklara ulaşmak için yoğunlaştırıcı Güneş güç sistemleri, (Concentrating Solar Power, CSP) kullanılmaktadır. Bu tür toplayıcı sistemlerde güneş enerjisi, yansıtıcı yüzeyler yardımı ile çizgisel ya da noktasal olarak yoğunlaştırılarak sıcak su, ısınma ya da yüksek sıcaklık üreterek elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır.

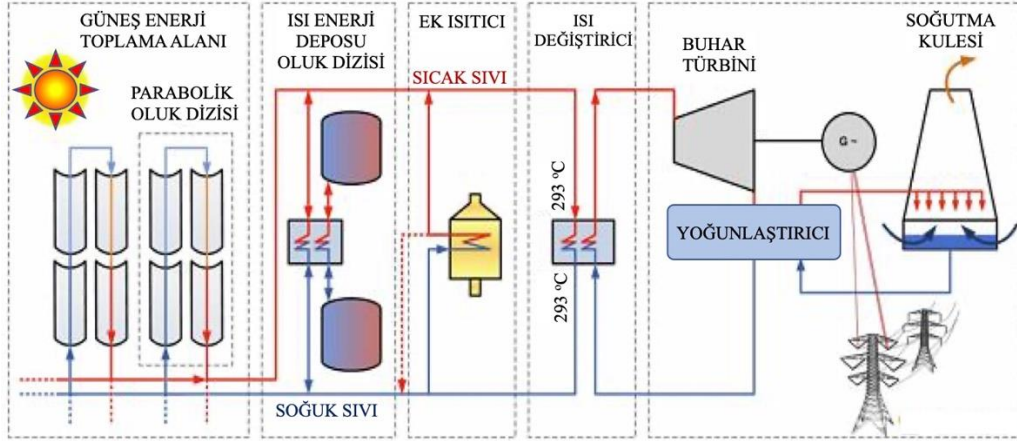


Şekil 1.8 Güneş ocağı örneği

a. Parabolik Oluk Sistemler

Parabolik oluk güneş kolektörleri diğer termoelektrik teknolojilerine kıyasla en eski ve en yaygın kullanılan Güneş güç yoğunlaştırıcı teknolojileridir. Kolektörler, parabolik kesitli olan yansıtıcı-yoğunlaştırıcı oluk dizilerden oluşur. Kolektörün iç kısmındaki yansıtıcı yüzeyler, güneş enerjisini kolektörün odağında yer alan ve boydan boya uzanan siyah bir absorban boruya odaklarlar. Kolektörler verimli olmaları için güneşin doğudan batıya hareketini izleyen tek eksenli bir Güneş izleme mekanizması ile sürekli Güneşi izlerler. Enerjiyi toplamak için siyah renkli absorban boruda ısı transfer akışkanı olarak ısı transfer yağı olarak bilinen sıvı kullanılmakla birlikte, çevreye zarar vermeyen ve daha ucuz olan suyun kullanılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Zira sıcaklık yüksek olacağından su buharlaşır, eğer buhar istenmiyorsa su yerşne başka sıvı kullanılmalıdır. Bu yolla elde edilen ısı konutlara, iş yerlerine, seralara sıcak su temini ya da ısıtma, veya elektrik üretimi için

enerji santraline gönderilir. Bu sistemlerde yüksek yoğunlaştırma kapasitesi sayesinde yüksek sıcaklıklara (350 ile 400 °C) ulaşılmaktadır. Doğrusal yoğunlaştırıcı termal sistemler ticari olarak üretilmekte ve kullanılmaktadırlar.



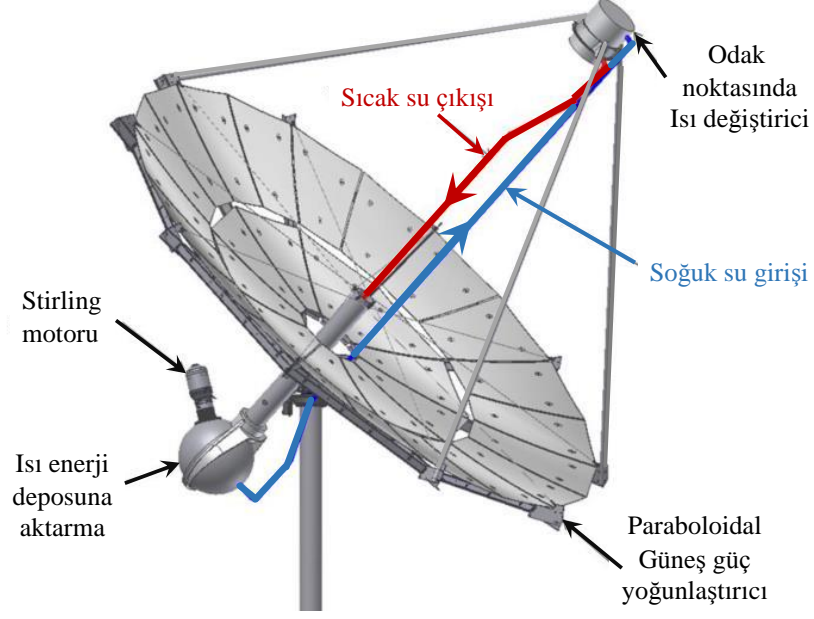
Şekil 1.9 Parabolik oluk sistemlerinin çalışma prensibi

b. Paraboloidal Çanak Yoğunlaştırıcı

Paraboloidal çanak yoğunlaştırıcı iki eksenli güneşi takipçisi ile sürekli olarak güneş radyasyonunu odak noktasına yoğunlaştırır. Isı enerjisi odaklama bölgesinde bulunan uygun bir çalışma sıvısı ile alınarak termodinamik bir dolaşıma gönderilir ya da odak bölgesine monte edilen bir Stirling makine yardımı ile doğrudan elektrik enerjisine çevrilir. Çanak-Stirling bileşimiyle güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kabul edilebilir verim %30 civarındadır.

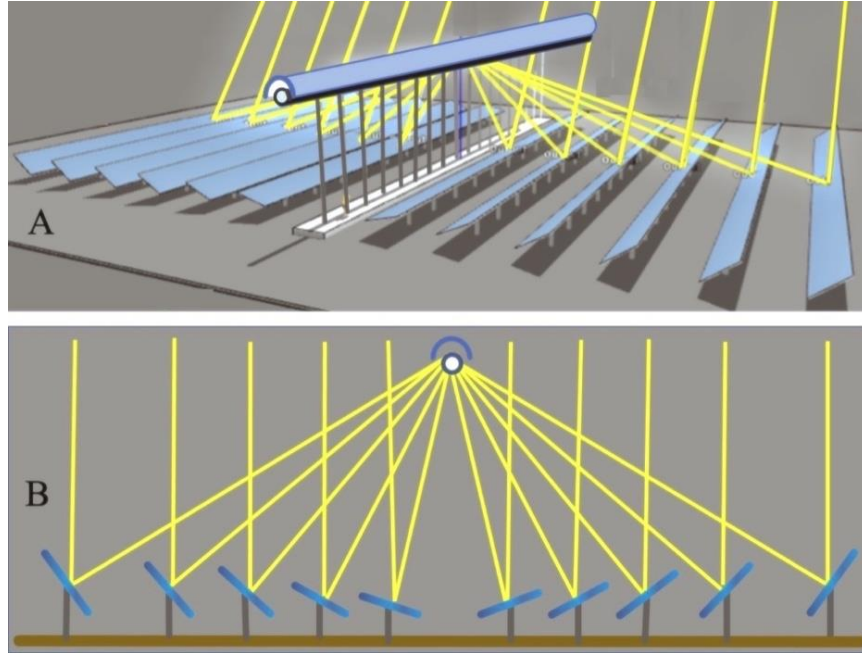
c. Çizgisel Fresnel Ayna Sistemleri

Parabolik yoğunlaştırıcıların hacim sorununu azaltmak üzere bir alternatif olarak doğrusal Fresnel aynalar kullanılabilir. Gerçekte bu aynalar parabolic oluşun Fresnel yöntemi ile düzleme taşınmış biçimidir. Güneşi takip sistemi ile Güneş radyasyonunu sürekli Fresnel aynanın odak çizgisinde toplar. Sistemde bulunan alıcı (receiver) aynanın üzerinde ve odak çizgisi boyunca yerleştirilmiştir. Parabolik oluklara kıyasla verimleri az da olsa düşüktür. Bunun nedeni, radyasyonun ayna yapısı nedeniyle odak dışına da saçılmasıdır.



Şekil 1.11 Parabolik çanak yoğunlaştırıcı

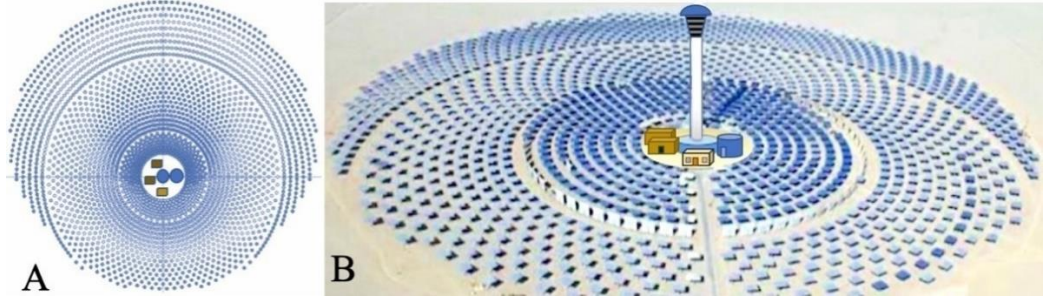
Fresnel çizgisel aynalar bu çalışmanın konusu olan CSP sistemlerinin en önemli elemanı olan heliostatın çizgi biçimli olanıdır. Heliostat burada kısaca açıklanan çizgisel Fresnel ayna sisteminin Güneş radyasyonunu bir noktada odaklayan biçimidir. Heliostat için yapılan hesaplama küçük birkaç değişiklikle çizgisel ayna sistemine de uyarlanabilir.



Şekil1. 12 Çizgisel Fresnel ayna sisteminin gösterimi.

d. Güneş Güç Kulesi Sistemleri, (CSP)

Günümüzde Güneşten faydalanarak enerji üretimi sağlamak için son yıllarda farklı ve yeni yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden biri de yoğunlaştırıcı Güneş güç (concentrated solar power, CSP) sistemleridir. CSP sistemleri, tepe noktasına monte edilmiş olan bir alıcının-ısı değiştiricinin bulunduğu bir kule ve kulede bulunan ısı değiştirici üzerine güneş ışınlarını toplayan ve kule etrafına konumlandırılmış olan çok sayıda aynadan oluşmaktadır; bu ayna sistemine *heliostat* denilmektedir. *Heliostat*, büyük boyutlu bir paraboloidal çukur aynanın Fresnel metodu ile düzleme taşınmasıyla oluşan ayna sistemidir. Alıcının içinde bulunan ısı taşıma sıvısından alınan ısı çalışma akışkanına aktarılarak buhar üretimi sağlanır. Sistemde üretilen buhar Rankine güç çevriminde kullanılarak elektrik üretilir. Şekil 1.13'te çalışan bir güneş kulesi sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.13 Bir CSP örneği: (A) *Heliostatın* kuş bakışı görüntüsü ve (B) *Heliostatın* elemanları

Bu tez çalışması CSP sisteminin belirli büyüklükte bir arazide en fazla Güneş gücü toplaması ve verimli olması için gerekli olan *heliostat* üzerine yapılan çalışma ele alınmıştır. Tezin Bulgular bölümünde bu konu ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Şekil 1.13'te bir CSP sisteminin elemanlarını göstermektedir. CSP sisteminin kulesinin tepesinde alıcı ve ısı değiştirici vardır. Etraftaki aynalar Güneş radyasyonunu bu alıcıya odaklayacak biçimde yönelmişlerdir. Kulenin etrafında sıcak ve soğuk ısı transfer sıvı depoları, idare binası ve türbin-jeneratör çifti bulunmaktadır.

1980'lerde ilk kez J. Schlaich ve ekibi tarafından dizayn edilen güneş kulesi sistemleri, yatırım maliyeti açısından diğer enerji sistemleriyle henüz rekabet edecek düzeye gelememesine rağmen Rusya, İtalya, İspanya, Japonya, Fransa ve ABD'de kullanılmakta ve yenileri de tasarlanarak yapılmaktadır. *Heliostat* Güneş radyasyonunu alıcıya odaklayarak ısı transfer sıvısının sıcaklığını arttırmaktadır. CSP sistemlerinde ısı taşıma sıvısı olarak tuzlu eriyik, karışımlar, düşük sıcaklıkta eriyen

metaller ve gazlar kullanılmaktadır. Isı transfer sıvısı olarak genellikle ısı enerjisini uzun süre muhafaza ettiği ve ucuz olduğu için tuzlu eriyik tercih edilmektedir.

CSP sisteminde iki tane ısı yalıtımlı erimiş madde deposu bulunmaktadır. Tuz eriyiği kullanan CSP sisteminde bu depolardan birisi 565 °C sıcaklıkta diğeri de 290 °C sıcaklıkta madde depolamak içindir. Bu depoların kapasiteleri CSP sisteminin Güneş battıktan sonra da elektrik üretme süresini belirler.

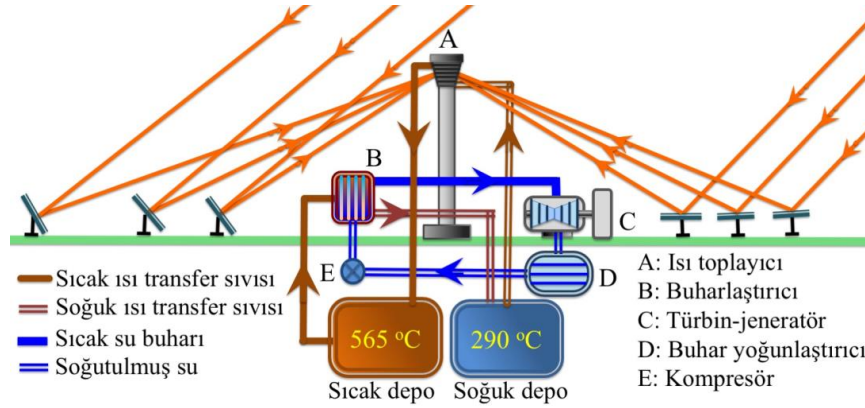
Şekil 1.14’de tuz eriyiği ile çalışan güneş kulesi sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. Kulenin tepesinde *heliostatın* odağında bulunan alıcı ve ısı değiştirici ısı transfer maddesinin sıcaklığını 565 °C sıcaklığa çıkararak sıcak madde deposuna gönderir. Bu depodaki sıcak madde diğeri bir ısı değiştiriciye belirli hızda gönderilerek burada suyu buharlaştırır ve ısı enerjisi yaklaşık 290 °C sıcaklığa düşer ve diğeri soğuk ısı madde deposuna gönderilir ve hala eriyiktir. Bu depoda biriken madde kule tepesindeki ısı değiştiriciye pompalanarak sıcaklığı tekrar yükseltilir ve döngü bu şekilde devam eder.

Diğeri döngü, su döngüsüdür. İkinci ısı değiştiricide su buhar haline getirilerek türbine gönderilir ve türbin-jeneratör çiftinde elektrik ürettikten sonra soğutma kulelerinde sıvılaştırılarak tekrar ısı değiştiriciye gönderilir.

Güneş kulesi sistemlerinin avantajlarını şu şekilde sıralamak mümkündür.

- Güneş kulesi sistemleri güvenlidir. Sistemin arıza yapma olasılığı çok azdır ve düşük maliyetle çalıştırılmaktadır.
- Düzenli bakımı yapıldığı takdirde ömrü bir hayli uzundur.
- Güneş kulesi sistemleri Güneş varken ısı enerjisini depolar ve Güneş yokken de burada depoladığı enerjiyle elektrik üretimine devam eder. Bu üretimin süresi ve miktarı (gücü) depolanan maddeye bağlıdır
- Güneş kulesi sistemlerinin inşa edilebilmesi için gerekli olan malzemeler basit ve kolay bulunabilir şekildedir.
- Yüksek teknoloji gerektirmeyen bir sistem olduğu için Güneş alan her bölgede kolaylıkla uygulanabilir.
- Kesinlikle çevreyi kirletmez, sera gazı oluşturmaz ve atık bırakmaz. Temiz enerji kaynağıdır.

CSP sisteminin diğer bileşenleri olan Alıcı ve ısı değiştirici, depolar, buhar türbini-jeneratör çifti termodinamiği, elektriği, makineyi ve inşaat başta olmak üzere başka çalışmaların konusu olduğundan bu çalışmada sadece *heliostat* konu edilmiştir.



Şekil 1.14 Güneş kulesi sistemleri çalışmasını gösterir diyagram

1.3.3 Güneş Kulesi Sistemleri Uygulamaları

Dünya üzerinde tesis edilmiş ve yapım aşamasında olan deneysel amaçlı ve ticari olarak kullanılan birçok CSP sistemi bulunmaktadır. Tablo 1.4'te deneysel ve ticari amaçlı kurulan güneş kulesi sistemleri gösterilmektedir. Tabloda görüleceği üzere ilk uygulanmaya başlandığı 1980'li yıllardan sonra gelişen teknolojiyle birlikte kapasiteleri de artmıştır.

Ülkemiz CSP sisteminin yapılmasına oldukça uygun coğrafi bölgelere ve tamamen yerli imkanlarla yapılabilecek teknolojiye sahiptir. Diğer yenilenebilir enerji tesisleri yanında alternatif bir sistemdir.

Tablo 1.4 Dünya üzerindeki deneysel-ticari amaçla kullanılan güneş kulesi sistemi

| Proje | Güç (MW) | Isı taşıma akışkanı | Tarih | Kullanım Amacı |
|------------|----------|---------------------|-------|----------------|
| SSPS | 0,5 | Sıvı | 1981 | Deneysel |
| İspanya | | Sodyum | | |
| EURELIOS | 1,0 | Buhar | 1981 | Deneysel |
| İtalya | | | | |
| SUNSHINE | 1,0 | Buhar | 1981 | Deneysel |
| Japonya | | | | |
| CESA-1 | 1,0 | Buhar | 1982 | Deneysel |
| İspanya | | | | |
| Solar One | 10,0 | Buhar | 1982 | Deneysel |
| ABD | | | | |
| MSEE/Cat B | 1,0 | Tuz eriyiği | 1984 | Deneysel |
| ABD | | | | |
| TBEMIS | 2,5 | Isı transfer Tuzu | 1984 | Deneysel |
| Fransa | | | | |

| | | | | |
|---|-------|----------------|------------------|----------|
| SPP-5 Rusya | 5,0 | Buhar | 1986 | Deneysel |
| TSA İspanya | 1,0 | Hava | 1993 | Deneysel |
| Solar Two ABD | 10,0 | Nitrat eriyiği | 1996 | Deneysel |
| Solar Spire İsrail | 0,25 | Hava | 2000 | Deneysel |
| ConSolar İsrail | 0,5 | Hava | 2001 | |
| SOLGATE İspanya | 0,3 | Hava | 2002 | |
| Planta Solar 10 İspanya | 11,0 | Su | 2007 | Ticari |
| Jülich Solar Tower Almanya | 1,5 | Hava | 2008 | Ticari |
| Planta Solar 20 İspanya | 20,0 | Su | 2009 | Ticari |
| Sierra Sun Tower ABD | 5,0 | Su | 2009 | Ticari |
| CME Solar Tower Hindistan | 2,5 | Su/Buhar | 2011 | Ticari |
| GemasolarThermosolar Plant İspanya | 19,9 | Tuz eriyiği | 2011 | Ticari |
| Lake Cargelligo Avusturalya | 3,0 | Su/Buhar | 2011 | Ticari |
| Dahan Power Plant Çin | 1,0 | Su/Buhar | 2012 | Ticari |
| Ashalim 1 İsrail | 121,0 | - | Yapım aşamasında | Ticari |
| CrescentDunes ABD | 110,0 | Tuz eriyiği | Yapım aşamasında | Ticari |
| Ivanpah Solar ElectricGenerat. System ABD | 377,0 | Su | Yapım aşamasında | Ticari |
| Khi Solar One Güney Afrika | 50,0 | Su/Buhar | Yapım aşamasında | Ticari |
| Palen SolarElectricGenerating System ABD | 500,0 | - | Yapım aşamasında | Ticari |
| Rice Solar Energy Project ABD | 150,0 | Tuz eriyiği | Yapım aşamasında | Ticari |
| Supcon Solar Project Çin | 50,0 | Tuz eriyiği | Yapım aşamasında | Ticari |

2. HELİOSTATIN TARİHİ VE LİTERATÜR TARAMASI

Kısa adıyla CSP olarak bilinen yoğunlaştırıcı Güneş kulesi sisteminin *heliostatı* gerçekte bir içbükey aynanın geniş bir araziye Fresnel metodu ile yansıtıcı olarak yayılması ve Dünyaya gelen Güneş radyasyonunun bir merkezde odaklanarak yüksek sıcaklık oluşturarak elektrik enerjisi üretme sistemidir. İlk defa böyle bir ayna sisteminin M.Ö 200 yıllarında Antik Yunanistan'da Archimedes tarafından bronzdan yapılan çok sayıda ayna ile Güneş ışığını işgalci Roma gemileri üzerine odaklayarak yüksek sıcaklık oluşturup ahşap gemileri yakması olarak tarihi kayıtlara geçmiştir. Bu mitolojik efsanenin doğruluğu hala tartışılmasına rağmen aslında bilimsel bir olaya atıf yapması bakımından önemlidir. Olay 1973 yılında tekrarlanmış ve 60 kişinin tuttuğu aynaların bir ahşap gemiye odaklanmasıyla gemi alev almıştır. (Butti ve Perlin, 1980).

Bilinen ilk CSP *heliostat* tasarımı 1746 yılında Comte de Buffon tarafından yapılmıştır ve 1878 yılında Augustine Mouchot tarafından Paris'te bir bilimsel sergide ilk defa heliostat tarafından çalıştırılan bir buhar makinesinin prototipi sergilenmiştir.

CSP'nin endüstriyel kullanımının bilinen ilk örneği 1980 yılında California'da başarı ile uygulanmıştır. Bunu Amerikan hükümetinin desteklediği toplam 354 MW güç sağlayan oluk tipi Güneş kolektörü izlemiştir. Bunun peşinden büyük ölçekte CSP Amerika'da bol Güneş alan bölgelerde, Avrupa'da özellikle bol Güneş alan İspanya'da, Kuzey Afrika ülkeleri olan Fas, Tunus ve Cezayir'de, Ortadoğu'da, Hindistan ve Çin'de büyük ölçekte yapılmıştır.

Türkiye, her ne kadar yeterli Güneş alan bölgelere ve uygun araziye sahip olsa da bu konuda bir hayli geç kalmıştır. Tek ve küçük bir CSP, 5 MW gücünde Mersin'de faaliyettedir.

CSP *Heliostatının* tasarımı üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenerek verilmiştir.

Selbaş vd. (2003) tarafından yayınlanan bir makalede elektrik enerjisine olan ihtiyacın artan nüfusla ve kalkınma için gittikçe arttığı, enerji ihtiyacının genellikle fosil kökenli yakıtların kullanılmasıyla karşılandığı belirtilmiş ve günümüzde mevcut fosil yakıt rezervlerindeki azalma yanında ve bu yakıtların oluşturduğu çevre kirliliği gibi problemlerin, enerji ihtiyacının karşılanması için alternatif kaynakların

kullanılmasını zorunlu hale getirdiği belirtilmiştir. Bir hayli yüksek potansiyele sahip olan güneş enerjisi, elektrik enerjisinin üretiminde çevre kirliliği oluşturmayan en bol ve en umut verici enerji tesisi olduğu ve bu çalışmada güneş enerjisinden elektrik elde etme yöntemleri incelenmiş ve Güneş enerjisinden yararlanmak için en uygun metodun seçilmeye çalışılmıştır. Sonuçta CSP olarak bilinen bir elektrik üretim metodunun bu konuda uygun teknoloji olduğu belirtilmiş, bu teknolojinin teknik ve maliyet analizleri yapılmıştır.

Romero-Alvarez ve Zarza (2007) tarafından hazırlanan bir derlemede CSP'nin bileşenleri incelenmiş, maliyet konusu ve uzun yıllar için ihtiyacı en uygun biçimde karşılayacak enerji üretim sisteminin belirlenmesine çalışılmıştır. Çeşitli boyutlarda yapılabilen CSP'nin iyi bir çözüm olduğu belirtilmiştir.

Alaphilippe vd. (2007) tarafından yayınlanan bir çalışmada Güneşin ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürmesinde 50 MW güçte bir parabolik oluk toplayıcı ve Ericsson motoru üzerinden olası sistemlerin çok kısa bir incelemesini sunmaktadır. Yüksek sıcaklıkta Stirling motorlarına dayanan ve yüksek verimli Çanak/Stirling teknolojisi, herhangi bir yoğunlaştırma olmadan birim hacim veya sistemin birim kütlesi başına çok düşük güçle doğrudan güneş enerjisi kullanan düşük sıcaklık diferansiyel termal motor ile iki aşamalı parabolik oluklu bir yoğunlaştırıcının, ileri geri hareketli Joule döngüsünün çevrimde bir Ericsson sıcak hava motoru ile birleştirilmesi üzerine teorik bir araştırma sunulmaktadır. Termal motor tarafından üretilen mekanik gücü en üst düzeye çıkaran en uygun çalışma noktasının bulunabileceği gösterilmiştir. Basit, düşük maliyetli bir parabolik oluk ve basit, düşük teknoloji orta-orta Ericsson motorun birleştirilmesinin iyi sonuç vereceği belirtilmektedir.

Bir CSP'nin optimizasyon işlemleri için 1 MW gibi küçük ölçekte bir *heliostatın* matematik modeli oluşturularak Güneş radyasyonunun optik veriminin optimizasyonu üzerine bir çalışma Wei vd. (2008) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma ile yıllık güneşlenmeden maksimum yararlanabilmek için aynaların konumları ve yönlendirilmeleri tanımlanmıştır. Sırasıyla Kuzey-Güney boyutu, Kuzey-Güney kademeli, Radyal boyutu ve Radyal kademeli olmak üzere dört düzenleme denenmiş ve optimize edilmiştir. Optimize edilmiş dört sonuç için alan verimliliğinin karşılaştırılması yapılmıştır. Kuzey-Güney yönünde yerleşiminin 1MW Güneş kulesi enerji santrali için en uygun karar olduğu sonucuna varılmıştır.

Güneş radyasyonu ve enerjinin temel fiziksel prensiplerine, bunların güneş enerjisi projeleri ve tasarımında nasıl modellenebileceği ve uygulanabileceğine ilişkin ilkeleri açıklayan bir kaynak olan ve Şen (2008) tarafından yazılan kitap bu konuda oldukça iyi bir kaynaktır. Başka bir yerde bulunmayan bilgileri tek bir kaynaktan bir araya getiren kitap, güneş ışınımı ve enerji alanında kullanılan uzman sistem metodolojilerinin yenilikçi bir sunumunu içermektedir. İstatistikler ve coğrafi istatistikler (bölgesel değişkenler) gibi metodolojilere ek olarak, bulanık mantık çıkarımı, yapay sinir ağı ve genetik algoritma teknikleri gibi yeni modelleme yaklaşımlarının yanı sıra hem klasik hem de yenilikçi teknikler tanıtılmaktadır.

Editörlüğü Sobonnadiere (2009) tarafından yapılan bir derleme kitabı yenilenebilir enerji teknolojilerini ayrı bölümler halinde ele almaktadır. Tez konusu ile ilgili CSP sistemi kitabın dördüncü bölümünde incelenmiştir. Bölümde bir CSP'nin *heliostat* sisteminin ayrıntıları ele alınmıştır.

CSP sistemi için *heliostat* yerleşim tasarımı için geliştirilen bir yöntem Wei vd. (2010) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde *heliostat* sınırı, yansıtıcı aynanın geometrik açıklığı ve yıllık kosinüs veriminin ve *heliostatın* yıllık verimlilik faktörü ile belirlenmiştir. Bu yöntemle *heliostatlar* yerleştirildiğinde yıllık verimliliğin hesaplanması gerekmemektedir, bu nedenle toplam tasarım ve optimizasyon süresi önemli ölçüde kısalmaktadır. Mevcut PS10 tasarım algoritması ile karşılaştırıldığında tasarlanan *heliostat* aynı optik verime ancak daha hızlı tepki hızına sahiptir.

Barlev vd. (2011) yayınladıkları makalede son on yılda CSP teknolojilerindeki yeniliklere dikkat çekerek bu sistemin dittikçe daha yaygın hale geldiğinden, bu dönemde çok sayıda gelişme sağlandığından söz edilmektedir. Reflektör ve kolektör (*heliostat*) tasarımı ve malzemeleri, ısı emilimi ve taşınması, enerji üretimi ve termal depolama alanlarında yapılan iyileştirmeler üzerinde durulmuştur. Bu teknolojinin kullanımı ile sınırlı fosil yakıt kullanımının sağladığı çevresel faydalar göz önünde bulundurularak çevreyi koruyarak elektrik üretmek için CSP ile entegre edilebilen birçok uygulama önerilmiştir.

Güneş enerjisi santralleri için hedefe yönelik *heliostat* aynalarının Güneş izleme denklemlerinin türetildiği bir çalışma yine Wei vd. (2011) tarafından önerilmiştir. Elde edilen denklemlere dayanarak, asimetrik bir yüzeye sahip *heliostatın* analizi için yeni bir model geliştirilmiştir. Yapılan hesaplamaların sonuçları ticari yazılım olan Zemax tarafından yapılan hesaplamayla karşılaştırılmıştır. Hesaplanan sonuçların birbiriyle

çok iyi örtüştüğü gösterilmiştir. Bu nedenle, *heliostat* için izleme ve ışın izleme denklemlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır.

CSP'nin tasarımı konusunda yayınlanan bir tarama makalesinde, (Zang vd. 2013), çeşitli heliostat tasarımları gözden geçirilmiş tasarım bilgileri verilmiştir. Bu makale bu konuda yapılacak çalışmalar için bir başlangıç kaynağı olma niteliğindedir.

Zhu (2013) tarafından yayınlanan bir çalışmada çizgisel Fresnel toplayıcı aynaların, parabolik olukların yanı sıra odaklama özellikleri nedeniyle CSP teknolojisinin önemli elemanı olduğu iddia edilmiştir. Çizgisel Fresnel teknolojisini kullanan güneş enerjisi santralleri, dünya genelinde faydalı bir ölçekte test edilmekte ve kullanılmakta olduğu gerçeği üzerine çizgisel bir Fresnel toplayıcının önemli bir yönü optik performansı olduğu belirtilmiştir. Optik performans değerlendirmesi genellikle aynanın odaklamasının ve kolektörün geometrik hassasiyetinin karakterizasyonu dahil olmak üzere çizgisel Fresnel toplayıcı kolektörünün optik ve mekanik özelliklerini içermektedir. Güneş radyasyonunun gelme açısının da yoğunlaştırıcıların optik performansı üzerinde etkisi vardır. Bu etki zamana ve yere göre değişiklik gösterir. Bütün bunlar için optik performans değerlendirmesinde en yaygın yaklaşım Güneş izleyici sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

CSP sisteminin kurulacağı araziye en iyi şekilde değerlendirmek için, yıllık optik verimliliğin ve zemin değerlendirmenin en üst düzeye çıkarılması, bitişik *heliostat* aynalarının aralarındaki ilişki optimizasyon hedefi olarak belirli arazi alanı ve ayna boyutu için kabul edilmiştir. Monte Carlo simülasyon yöntemi ile Güneş izleme yöntemi, kısa hesaplama zamanında yüksek doğrulukta bir CSP santralinin yıllık optik verimliliğini hesaplamak için kullanılmıştır, (Zhou ve Zhou, 2014).

Benammar vd. (2014) tarafından yayınlanan bir çalışmada enerji depolaması yapılmayan güneş enerjisi santralleri (solar tower power plant, STPP, ya da CSP) performanslarının modellenmesi ve simülasyonu için enerji analizine dayalı bir matematiksel model geliştirilmiştir. STPP sistemi dört ana alt sisteme ayrılmıştır: heliostat alan alt sistemi, kavite alt sistemi (kule), buhar üretim alt sistemi ve güç çevrimi alt sistemi (Rankine çevrimi). Ana alt sistemler için termal ve termodinamik modelleri geliştirilmiştir. İncelenen sistemin genel bir doğrusal olmayan matematiksel modeli sayısal optimizasyon yöntemleri kullanılarak ele alınmış ve çözülmüştür. Alıcı yüzey sıcaklığının ve alıcı yüzey alanının verimi ve buhar kütle akışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Diğer parametrelerin etkileri, gelen ısı akısı, emilen enerji ve

alıcıdan kaynaklanan ısı kayıpları da incelenmiştir. Bu sonuçların analizi, her bir buhar kütle akışı, alıcı yüzey sıcaklığı ve alıcı yüzey alanı için optimal bir alıcı verimlilik değerinin varlığını göstermiştir.

Boudaoud vd. (2015) tarafından yayınlanan bir makalede Cezayir’de kurulu olan erimiş tuz kullanan CSP’nin termal performansının tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmada toplayıcı ayna (Fresnel ayna) tasarımından termal dönüştürücü sisteme kadar sistemin elemanları ele alınarak en iyi performansın elde edilebilmesi için öneriler sunulmuştur. Sonuçta iyi tasarlanmış bir *heliostatın* Cezayir için en iyi tercih olduğu belirtilmiştir.

Hindistan’ın Bilim, Teknoloji ve Politikaları Çalışma Merkezi, (CSTEP), tarafından yayınlanan bir raporda bir yoğunlaştırıcı Güneş kule sisteminin (heliostat) çok sayıda ayna ve gün boyunca güneş ışınlarını izlemek için çift eksenli bir Güneş izleyici kontrol sistemi ile kuledeki ısı transfer birimine (alıcıya) düşen yoğun güneş enerjisi, alıcıdan geçen bir ısı transfer sıvısına ve bu ısı enerjisinin elektrik üretmede kullanımına kadar sistemin tamamı açıklanmıştır, (Srilakshimi vd. 2016). Bu rapora gündüz vakti toplanan güneş enerjisinin bir kısmının Güneş battıktan ya da bulutlandıktan sonra kullanılmak üzere (gece/yoğun talep dönemlerinde) depolanmasını sağlayan bir depolama bileşeninin yapısı da anlatılmaktadır.

Heller (2017) tarafından editörlüğü yapılan bir kitap yoğunlaştırıcı CSP ve teknolojiler hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir. Farklı araştırmacılar tarafından yazılan bölümlerin her birisi CSP’nin farklı yönlerini ele almaktadır. Giriş bölümünden sonra sistemin performansının belirlenme ilkeleri, bileşenlerin performansı, yani ısı değiştirici-alıcı ile toplayıcı aynaların performansa etkisi, sistemin performansı, performans kaybı ve sürdürülebilirliği ve gelişmekte olan yöntemler ve aygıtlar ayrıntılı incelenmiştir.

Chen vd. (2018) yayınladıkları bir çalışmada Termal enerji depolayan CSP’nin optimum boyutlandırılmasının, sistem güvenilirliğini artırmanın ve yatırım maliyetini azaltmanın önemli olduğu tezini ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte, doğrudan normal ışınım, doğrudan üretim ve termal depolama saatleri dahil olmak üzere güneş kulesi enerji santrallerinin boyutlandırılması için anahtar tasarım parametrelerinin farklı güneş kaynakları altındaki termo-ekonomik sistem performansı üzerindeki kombine etkilerinin belirsizliği konusunu ele almışlardır. Bu sorunları incelemek üzere Çin’de bulunan dört tesiste bu parametrelerin optimal kombinasyonlarını araştırmak için

erimiş tuz depolamalı buhar Rankine döngüsüne dayanan 50 MW'lık bir CSP için termo-ekonomik bir model geliştirilmiştir. Bu parametreler ile bunların yıllık elektrik üretimi, elektrik verimliliği ve artan enerji maliyeti üzerindeki etkileri arasındaki ilişkiyi raporlamışlardır. Sonuçlar, minimal düzeyde enerji maliyeti için optimum tasarım doğrudan normal radyasyonun hem yıllık ışınlama seviyesine hem de geleneksel yöntemlerden elde edilen değerlerden farklı olan güneş ışınımının dağılımına bağlı olduğunu göstermektedir. *Heliostatlar* tarafından optimum tasarım koşulları altında Güneş'in yıllık ışınımının belirli bir yüzdesini (yani, %72-75) oluşturduğu bulunmuştur. Ana finansal parametreleri değiştirerek yapılan hassas analiz, optimal tasarımın doğrudan normal ışınımın ve ilgili yüzdelerin *heliostat* maliyetine göre biraz değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar, farklı güneş kaynakları altında güneş kulesi güç sistemleri için *heliostat* alanının ve termal enerji depolamasının optimum büyüklüğünü belirlemek için bir referans oluşturacağını belirtmişlerdir.

Editörlüğü Chandra ve Dixit (2018) tarafından yapılan bir konferans bildiri derleme kitabı CSP sistemlerini ayrıntılı ele almaktadır. Kitap bildirileri konularına göre kısımlara ayırmıştır. Birinci kısımda Güneş enerjisinin inovatif kullanımı üzerine davetli konuşmacıların bildirileri toplanmıştır. İkinci ve üçüncü kısımlarda Güneş enerji sisteminin elemanları, Güneş izleme sistemleri, küçük ölçekli sistemler, ısı değiştiriciler toplayıcılar gibi konular verilmiştir. Dördüncü kısım Güneş enerji dönüştürücü ile kaplama teknolojileri, beşinci kısımda termal enerji depolama teknolojileri, altıncı kısımda soğutma işlemleri, yedinci kısımda ısıl işlemler ve sekizinci kısımda enterkonnekte sisteme bağlanma ve bu konudaki politikalar ele alınmıştır.

Collado ve Guallar (2019) bir *heliostatta* kule yüksekliği *veheliostatın* ve aynaların boyutları ve aynaların yerleşimi için tasarım işlemleri ve algoritması geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile hızlı şekilde ticari *heliostatın* tasarımının hızlı ve pratik yolla yapılması sağlanmıştır. Bu algoritma ile yaklaşık 150 MW güçte *heliostat* tasarımının yapılabildiği iddia edilmektedir.

Giostrì vd. (2020) tarafından yayınlanan bir makalede bir CSP ve bir geri kazanım mikro gaz türbininden oluşan küçük ölçekli bir CSP sistemini incelenmiştir. İkinci bir yoğunlaştırıcı ile birleştirilmiş *heliostatın* optik performansını belirlemek için bir algoritma ve kodlama geliştirilirken, başka bir algoritma ile de termal motor

performansı hesaplanmıştır. 832 m² *heliostat* alan yerleşimindeki gerçek bir tesiste bilgiler alınırken, optik-termal verimliliği en üst düzeye çıkarmak için ikinci sistemin parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Suudi Arabistan'ı Al-Khobar kendinde kurulacak olan CSP sisteminin tasarımı için geçmiş tecrübeler yanında Arabistana özel şartlar olan Güneş, toz ve kum, nem, sıcaklık ve denizle bağlantısı dikkate alınmış ve buna göre bir tasarım önerilmiştir, (Al-Kouz, vd. 2020).

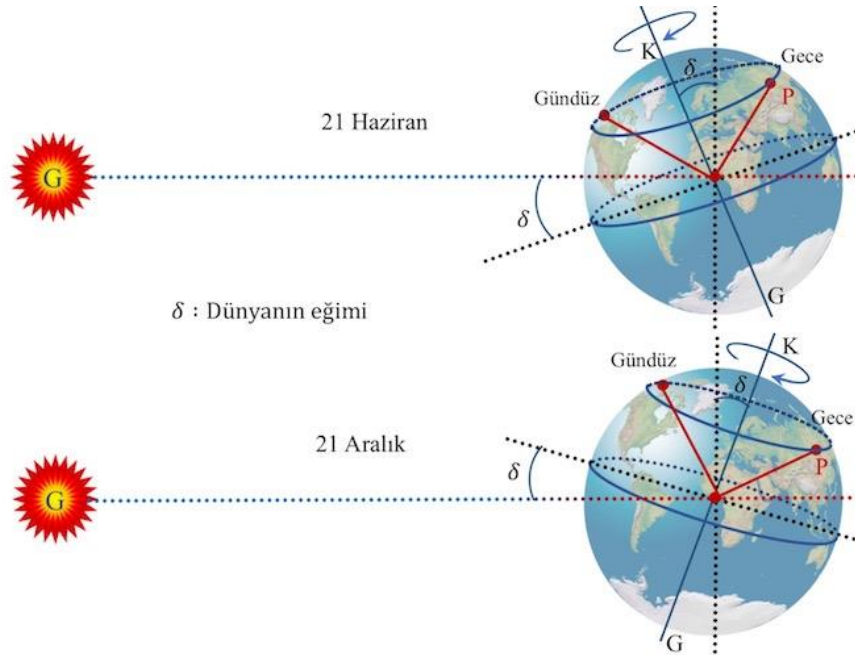
Carballo vd. (2020) bir maket üzerinde heliostatın kontrolün yapılmasını bir maket üzerinde modellemişler ve bu model maket heliostat yansıtıcı aynaların Güneş izleme işlemlerini merkezden yönetmeyi örneklemişlerdir.

3. KURAMSAL BİLGİLER

3.1 Heliostat Tasarımının Temelleri

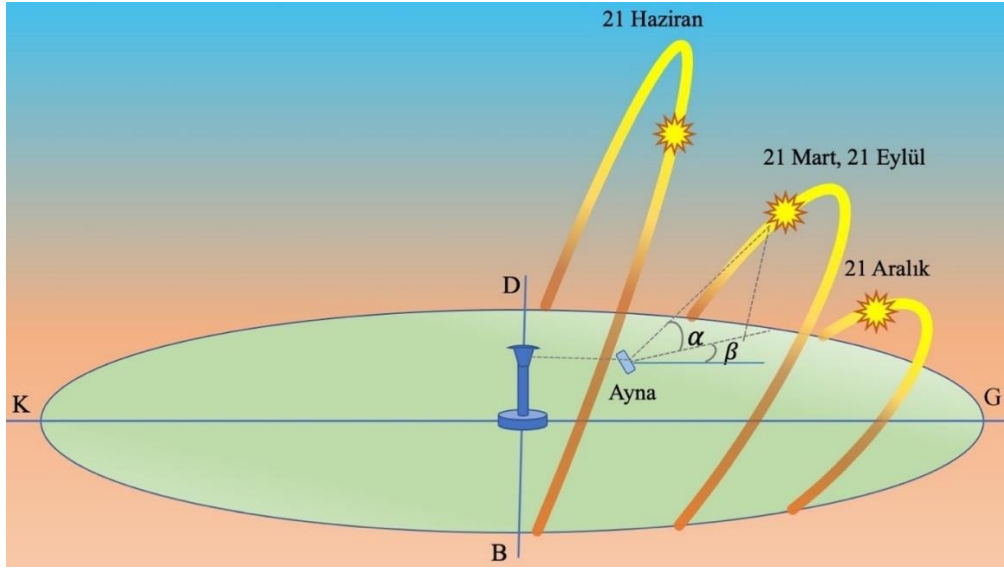
Bu tez çalışmasının konusu olan CSP sisteminin yoğunlaştırıcı ayna sistemine teknik dilde *heliostat* denilmektedir. Yunanca Güneş anlamına gelen *helios* ile statik kelimelerinin birleşimiyle oluşmuştur. *Heliostat* yukarıda belirtildiği gibi çok sayıda sabit aynalarla Güneş radyasyonunun bir kuleye odaklanarak toplandığı sistemin yaygın tanımı olarak kullanılır.

Güneş ışığını *heliostatın* temel unsurlarından başta geleni geniş bir arazi üzerine belirli bir düzenle yerleştirilen yansıtıcı aynalar gerçekte teorisi Fresnel mercek yapısına dayanan yansıtıcı aynaların büyütülmüş biçimidir, (Lutz, Suzuki, 2001; Sabonnadière, 2007; Romero-Alvarez ve Zarza, 2007; Şen, 2008; Zhu, 2013). Fresnel mercek teorisine dayalı yansıtıcı ayna sisteminde mükemmel odaklama için ışığın sürekli olarak ayna düzlemine dik gelmesi gerekir. Gelen ışığın az da olsa sapması odaklamanın bozulmasına yol açar. Bu nedenle *Heliostat* aynalarının Güneş radyasyonunun kule tepesinde odaklayacak biçimde hareketli olması, yani Güneş izleyici (solar tracking) sisteme sahip olması gerekir. Çünkü Güneş radyasyonu mevsimlere, günlere ve günün saatlerine bağlı sürekli değişmektedir ve değişim değerleri sistemin bulunduğu coğrafi ve yerel konuma bağlıdır.



Şekil 3.1. 21 Haziran ve 21 Aralık tarihlerinde Dünyanın Güneşe göre eğiminin gösterimi ve Kuzey Yarımkürede bulunan bir konumun aldığı Güneş radyasyonunun gösterimi.

Şekil 3.1, Türkiye komşu ülkelerin bulunduğu Kuzey Yarımküredeki bir konumun, yaklaşık 40° kuzey enleminde, yaz gün dönümü olan 21 Haziran ve kış gün dönümünün olan 21 Aralık'ta Güneşe göre durumunu göstermektedir. Dünyanın dönme eksenini, yani Dünyanın eğimi, (deklınasyon), yaz gündönümü olan 21 Haziran'da Güneşe doğru maksimum değer olan 23.45° civarında olduğundan gündüz vakitleri Güneş ışığının gelme açısı bir hayli dik olacaktır; bu açı Güneşin irtifa açısıdır ve α sembolü ile belirtilecektir. Dolayısıyla bu bölgeler yaz aylarında yeterince bol Güneş alır. Kış gündönümü olan 21 Aralık'ta ise Dünyanın eğimi -23.45° civarında olduğundan bu günlerde gündüz vakitleri α açısı minimum değerlerde olacaktır ve sonuçta bu bölgeler büyük oranda yetersiz Güneş alacaktır. Şekil 3.2 deklınasyondan kaynaklanan ve Dünya üzerinde bir noktadaki bir gözlemciye ve konu ile ilgili olduğu bağlamda *heliostata* göre Kuzey Yarımkürede Güneşin, gündüz vaktinin en uzun olduğu 21 Haziran, gece ve gündüzün eşit olduğu bahar ve güz gün dönümleri (ekinoksları) olan 21 Mart ve 21 Eylül ile gündüz vaktinin en kısa olduğu 21 Aralık kış gündönümü tarihlerindeki izlediği yörüngeleri vermektedir. İlkbahar ve sonbahar gündönümleri olan 21 Mart ve 21 Eylül günlerinde Dünya'nın eğimi Güneşe doğru 0° olur ve bu günlerde gece ve gündüz eşittir, yani her ikisi de 12 saattir.



Şekil 3.2. Yazın en uzun gün olan 21 Haziran, bahar ve güz gün dönümleri (ekinokslar) olan 21 Mart ile 21 Eylül ile kışın en kısa gün olan 21 Aralık tarihlerinde Güneşin Kuzey Yarımkürede Dünya üzerindeki *heliostat* aynasına göre bir günde izlediği yörüngelerin gösterimleri.

Bir *heliostatta* yansıtıcı aynaların yerlerini değiştirmek teknik olarak uygulanamaz, bu nedenle aynaların bütün yıl boyunca Güneş ışığını azami derecede kulede toplanarak heliostattan ve dolayısıyla sistemin tamamından en yüksek verimi alabilmek için *heliostatın* kurulacağı arazi üzerinde konumlandırılacak çok sayıdaki aynanın maksimum Güneş radyasyonu toplamasını sağlamak amacıyla mevcut şartlar içinde en uygun yerleşimlerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için Dünyanın hareketlerini dikkate alarak bir algoritma geliştirmek ve bütün yıl ya da yılın yeterli güneşlenme günlerini de dikkate alarak yapılan heliostat yerleşim hesaplaması ve tasarımı yapmak teknik olarak mümkündür ve uygundur.

3.2 Heliostat Tasarımının ve Algoritmasının İlkeleri

Bir *heliostatın* tasarlanmasında ve algoritma oluşturulmasında temel ilkelerin dikkate alınması ve bunlara uygun hesaplama yapılması gereklidir. Aşağıda bu ilkelerden öncelikli ve önemli görünenler maddeler halinde verilmiştir. Tasarım bu ilkeleri dikkate alarak yapılmıştır.

1. Bir *heliostat* tasarlamada öncelikli dikkate alınması gereken parametre, heliostatın ve dolayısıyla CSP'nin bütününün yapılacağı arazinin coğrafi konumu, yani enlem ve boylam koordinatları, rakımı, arazinin büyüklüğü, eğimi ve tabii ki yıllık Güneşlenme süresi olmalıdır.
2. Heliostat Güneş radyasyonunu toplayıcı kulenin üst kısmına odaklayacaktır. Ancak kule yüksekliği büyük oranda tercihe bağlı olacaktır, ancak mevcut tekniğin elverdiği ölçüde olabildiğince yüksek olması tercih edilmelidir. Böylece seçilen arazide maksimum sayıda aynanın yerleştirilmesi mümkün olacaktır. Bu hususta göz önünde bulundurulması gereken kısıt ısı transfer maddesinin alacağı yol uzunluğu olacaktır, fakat iyi yalıtımlı ısı transfer sıvı borusu bu sorunu çözecektir. Termodinamik kanunları burada dikkate alınmalıdır.
3. Aynaların yerleri sabit olacaktır, bu nedenle *heliostat* ayna konumları hesaplanırken zorunlu olarak yılın en uygun günü belirlenmelidir. Bu çalışmada en uzun gün olan 21 Haziran günü öğle vakti alınmıştır. Bütün seçimlerde günün belirli saatlerinde aynalar birbirlerini gölgeleyecektir; eğer aynaların yerleşimleri doğru belirlenmezse bazı aynalar birbirlerini gölgeleyeceğinden yeterli verim alınamayabilir. Diğer özel günler, örneğin 21 Mart veya 21 Eylül için tasarım yapılırsa bu durumda arazide değerlendirilemeyen alanlar ve dolayısı ile Güneş radyasyonundan yeteri kadar yararlanılamama durumu ortaya çıkabilir. Algoritma

oluşturulmasında esnek olması ve farklı günlerde hesaplama yapmaya uygun olması tercih edilmelidir. Yani algoritma ve buna bağlı yazılacak olan program yılın farklı günleri için hesaplama yapmaya uygun olmalıdır. Böylece, önceden heliostat için en uygun gün ve saat belirlenebilir. Örneğin hesaplama kuşluk ya da ikinci vakti için yapılırsa optimum bir tasarım yapılmayacağı açıktır. Bu durumda sadece tasarımın yapıldığı saatlerde maksimum verim alınırken diğer saatlerde gölgelenme nedeniyle kayıplar olacaktır.

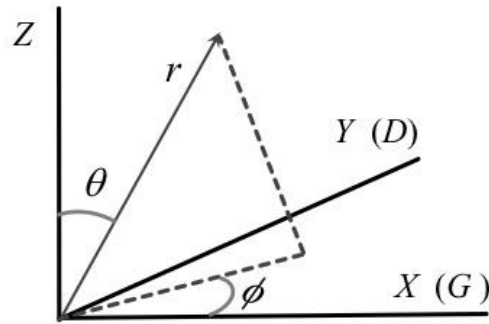
4. Arazinin eğimsiz ya da eğimli olması diğer etkenlerden birisidir. Eğer arazinin eğimi güneye doğru ise bu sisteme artı bir avantaj olarak yansıyacaktır. Çünkü heliostat halkaları büyük oranda eşmerkezli ve simetrik olacaktır, böylece arazide aynı fazla ayna yerleştirmek ve fazla güç toplamak mümkün olacaktır. Öte yandan arazinin kuzye bakacak biçimde eğimli olması tercih edilmemesi gereken bir husustur, çünkü hem Güneş radyasyonunun gelme açısı, yani zenit açısı büyük olacak ve hem de sınırları belirli araziye daha az sayıda ayna yerleştirilebilecektir.
5. Bunlara ek olarak algoritma ve buna dayalı yazılım, kullanıcının hesaplama yapılırken bazı müdahalelerine izin verebilmelidir. Örneğin hesaplamada optimize edilen ayna konumlarının ve *heliostat* halkalarının aralıklarının ve bir halkadaki yanyana olan aynaların arasındaki aralıklarının değiştirilmesine izin vermelidir.
6. Tercihli olarak aynı hesaplamada karşılaştırma amacıyla sabit yönelimli olup yüzey alanı heliostat aynalarının alanı ile aynı olan fotovoltaik panelin Güneştea aldığı güç ve enerji de hesaplanabilir.

Heliostatın ve CSP'nin yapılacağı arazinin konumu belirlendikten sonra günün farklı zamanlarında Güneşin gelme açısı, her bir günün Güneşlenme saati gibi temel verilerin belirleneceği astronomi bilgilerine ihtiyaç vardır. Dünyanın hareketi ile ilgili astronomik denklemler iyi bilinen ve astronomi kaynaklarında bulunabilecek olan, Dünyanın hareketi ve diğer ilgili tanımlar, değerler ve denklemlerdir. Bu tanımlar ve denklemler aşağıda verilmiştir.

3.3 Dünyanın Hareketi ile İlgili Tanım, Değer ve İfadeler

Bir *heliostat* tasarlamak için bir yıl boyunca Dünyanın hareketlerinin matematik ifadelerinden, bazı astronomik değerlerden ve tanımlardan heliostat tasarımı için gerekli olanlar astronomi kaynaklarından alınarak aşağıda verilmiştir.

Öncelikle koordinat sistemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Kullanılabilecek uygun koordinat sistemleri Kartezyen sistemle küresel koordinat sistemleridir. Şekil 3.3 bu iki koordinat sistemlerini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi Kartezyen koordinat sistemi kabul edildiği biçimde Dünyanın Kuzey-Güney yönü yani Enlem çizgisine paralel olan doğrultu X eksenini olarak alınmıştır, Güney yönü pozitif X eksenidir, Doğu-Batı yönü, ki boylama paralel doğrultudur, Doğu yönü pozitif olacak biçimde Y eksenini olarak alınmıştır. Z eksenini zenit doğrultusudur. Küresel koordinat sistemi değişkenleri r , θ ve ϕ klasik küresel koordinat tanımlamasında olduğu gibidir.



$$x = r \sin \theta \cos \phi$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi$$

$$z = r \cos \theta$$

ϕ : Azimut (ufuk) açısı

θ : Zenit açısı

Şekil 3.3. *Heliostat* yerleşiminin yapıldığı koordinat sistemleri: Kartezyen ve küresel sistemler.

3.3.1 Yıl Günü (Day of Year - n)

Günlük hayatta gg:aa:yyyy olarak belirtilen yıllık tarih Dünyanın hareketleri ilgili hesaplamalarda yıl günü olarak 1 Ocak ile 31 Aralık arası 365 gün sıralı olarak tanımlanır. Dünyanın Güneş etrafındaki bir tur ayması, yani bir yıl 365.25 olduğundan hesaplamalarda **yıl günü** (n), N_A ve g sırayla günlük tarihlendirmede kullanılan ay ne gün sayısı A_k ve g olmak üzere yıl günü

$$n = \left(\sum_{k=1}^{N_A-1} A_k \right) + g, \quad \begin{cases} A_k = 1, 3, 5, 7, 8, 10, 12 & \text{için} & 31 \text{ gün} \\ A_k = 4, 6, 9, 11 & \text{için} & 30 \text{ gün} \\ A_k = 2 & \text{için} & 29 \text{ gün} \\ g = 1 \dots 28, 29, 30 & \text{veya} & 31 \text{ gün} \end{cases} \quad (3.1)$$

ifadesiyle verilir. Örneğin, yıl olmaksızın gg/aa olarak verilen 07:13 tarih için yıl günü

$$n = (31 + 29 + 31 + 30 + 31 + 30) + 13 = 195$$

olacaktır.

4.3.2 Saat Açısı (Hour Angle - ω)

Saat açısı Dünyanın eksenini etrafında dönme periyodunun zaman yerine derece olarak tanımlanmasıdır, yani günlük saatin açı karşılığıdır. Bu tanımlamanın gerekçesi Dünyanın hareketiyle ilgili astronomi hesaplamalarında açının kullanılmasıdır. Saat açısı Dünyanın eksenini etrafında bir saatlik dönmesinin $360^\circ/24=15^\circ$ açığa karşılık gelmesine dayanır ve kabul edilen tanım olarak

$$\omega = 15 (t - T_0)(\text{derece}) \quad (3.2)$$

ifadesiyle verilir. İfadede t , 24 saat esasına dayalı yerel saattir ve T_0 yerel saatte tam öğle vaktidir, yani Güneşin ilgili coğrafi konumda en yüksek irtifada olduğu saattir. Bu kabule göre saat açısı öğleden önce negatif, öğleden sonra pozitif olacaktır. Örneğin kuşluk vakti, saat 09.26 için saat açısı $\omega = -38.50^\circ$, öğleden sonra saat 15.49 iken saat açısı $\omega = +57.25^\circ$ olacaktır.

Not:Saat üzerine işlem yaparken dikkat edilecek husus, dakikanın 60 üzerinden belirtilmesi nedeniyle aritmetik işlemlerde bunu 100 ölçeğine dönüştürmek gereklidir. Örneğin 09.26 olarak 60 dakika esasına göre verilen zamanın dakikasının 100 üzerinden değeri $26 \times 100 / 60 = 43.33$ olacaktır. Buna göre zaman $t = 9.4333$ olacaktır, (Karttunen vd., 2017)

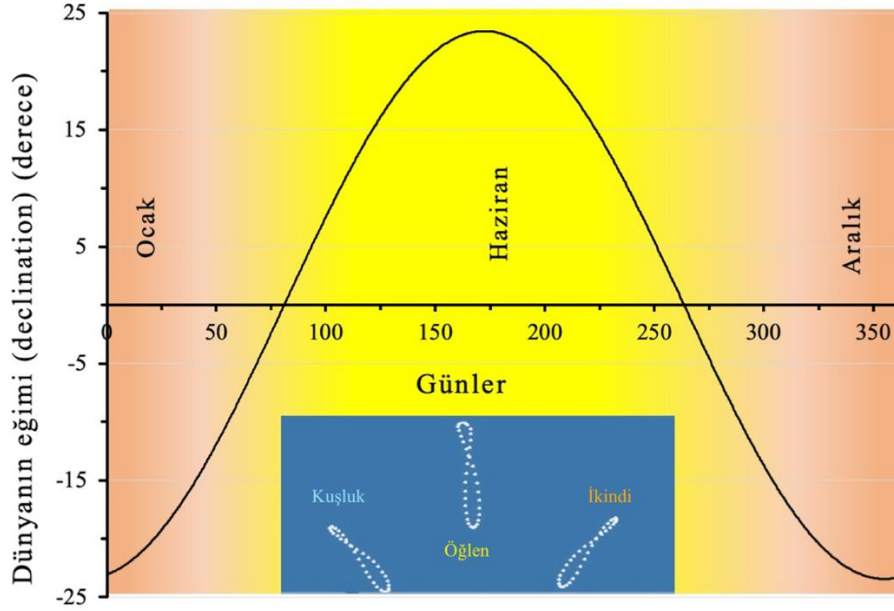
3.3.3 Dünyanın Eğimi (Deklinasyon - δ)

Dünyanın Ekvator düzlemin ve eşdeğer biçimde dönme ekseninin Güneş sistemine göre eğimi ya da sapması olarak tanımlanan eğim, (deklinasyon), değeri dünyanın Güneş etrafındaki yörüngede bulunduğu durumuna göre -23.45° ile $+23.45^\circ$ arasında değişir. Yarı ampirik biçimde belirlenen deklinasyon ifadesi Denklem 3.3'te yıl gününe bağlı olarak,

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360 (n - 81)}{365.25} \right] \quad (3.3)$$

denklemlerle verilir. İfadede 23.45° maksimum eğimi, 360 sabiti bir turluk açıyı, 81 sabiti bahar ekinoksu olan 21 Mart'ın yıl günü karşılığını ve 365.25 bir yıllık gün karşılığıdır. Deklinasyon değeri bahar ve güz gündönümü, (ekinoks), tarihleri olan 21 Mart ve 21 Eylül'de sıfır, en uzun gün olan 21 Haziran'da $+23.45^\circ$ ve en kısa gün olan 21 Aralık'ta -23.45° olur, (Lutz ve Suzuki, 2001; Karttunen vd. 2017). Şekil 3.4

deklınasyonun yıl boyunca değişimini göstermektedir. Bu değişim bir histeri eğrisi de oluşturur, yani Güneşin bir yıl boyunca Dünyaya göre her gün aynı saatlerde kaydedilen görüntüleri 8 çizmektedir. Bu şekle günsekizi (analemma) denilmektedir.



Şekil 3.4. Bir yıl boyunca her gün aynı saatlerde sabit kamera ile Güneşin konumu kaydedildiği zaman ortaya ilginç günsekizi çıkmaktadır. Şekilde günün kuşluk, öğlen ve ikindi vakitlerinde sabit kamera ile alınan görüntüler temsili olarak verilmiştir.

3.3.4 Güneşin Radyasyon Gücü, Güneş Gücü (Insolasyon – P)

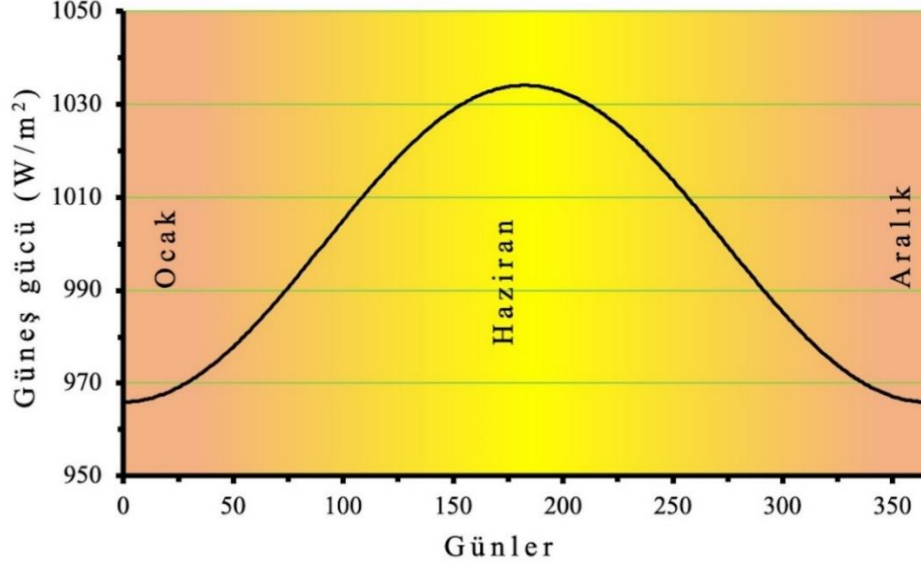
Dünya yüzeyinde Güneş radyasyonunun birim alana düşen gücü Güneşin faal ve sakin olduğu zamanlara göre olarak değişim gösterir. Dünya yüzeyine ulaşan Güneş gücü uzun yıllar aktif ve sakin faaliyetlerin ortalaması olarak $P_0=1367 \text{ W/m}^2$ kabul edilmektedir. Bu değer yıl gününe bağlıdır ve değişiklik göstermektedir. Önerilen birkaç insolasyon ifadeleri içinden en fazla kullanılan ve uygun olan denklem

$$P = P_0 \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360 n}{365.25} \right) \right] \quad (3.4)$$

ampirik ifadeyle verilir (Lutz ve Suzuki 2001; Karttunen vd. 2017; Şen, 2008). Şekil 3.5 Güneş radyasyonunun yıl boyunca günlere göre değişimini vermektedir. Ancak Güneş radyasyonu atmosferden geçerken sozulma nedeniyle zayıflatılarak yeryüzüne ulaşır. Bu etkilerin en önemli olanı *hava kütlesi* olarak tanımlanmaktadır. Hava kütlesi tanımı aşağıda verilmiştir.

3.3.5 Hava Kütlesi (Air Mass - AM_n)

Hava kütlesi Güneş ışığının atmosfere giriş açısına, dolayısıyla atmosferde aldığı yola dayalı olarak şiddet kaybını temsil eden bir parametredir. Hava kütlesinin en fazla kullanılan ifadesi, θ_z güneş radyasyonunun zenite göre açısı olmak üzere



Şekil 3.5. Dünyaya gelen ortalama güneş gücünün yıl boyunca değişimi

$$AM_i = \frac{1}{\cos \theta_z} (5 < \theta_z < 85) \quad (3.5)$$

ifadesiyle verilir (Lutz ve Suzuki, 2001; Şen, 2008). Farklı kaynaklar bu ifadeye küçük düzeltmeler de eklemişlerdir. Eklenen düzeltme ifadeleri ya da terimleri ihmal edilebilir ölçüde oldukça küçüktür ve çoğunlukla θ_z açısının büyümesi, yani Güneş radyasyonunun sabah ve akşam saatlerinde yatık gelmesi durumunda hava kütlesinin aşırı büyümesini önlemeye yöneliktir. Düzeltme terimleri birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermektedirle. Bu ifadelerden ampirik yolla belirlenen bir ifade

$$AM_n = \frac{1}{\cos \theta_z + 0.15 (93.885 - \theta_z)^{-1.253}}, \quad (3.6)$$

$$(\theta_z = 90 - \alpha, \quad 5 < \theta_z < 85)$$

olarak verilmektedir, (Şen, 2008). hava kütlesinin sembolik degerlerinden AM1.0 radyasyonun atmosfere girmeden önceki değeri, yani atmosfer dışı değerdir, bu haliyle radyasyonda bir değişiklik yok demektir. Açık havada ve Güneşin en üst noktada olduğu günlerde hava kütlesi çoğunlukla AM1.5, hafif sisli, buharlaşmanın yoğun

olduğu yerlerde AM2.0 gibi değerlerle yaklaşık olarak tanımlanır. Bunların dışında AM2.5 ve üstü bulutlu havadaki hava kütlesi değeridir.

3.3.6 Güneş İrtifa Açısı (Solar Altitude Angle - α)

Güneş irtifa açısı, Güneş radyasyonunun ufuk düzlemine göre geliş açısıdır, Şekil 3.6 yılın farklı günlerinde Güneşin bir gün boyunca irtifa açısını örnek olarak göstermektedir. İrtifa açısının değeri yıl günü ile aynı zamanda günün saatlerine bağlıdır. Gerçekte irtifa açısı ifadesi dünyanın eğim (deklınasyon) açısına, ilgili konumun enlem koordinatına, (derece ve dakika olarak), ve saat açısına bağlı olarak

$$\xi = \sin \delta \sin \psi_e + \cos \delta \cos \omega \cos \psi_e$$

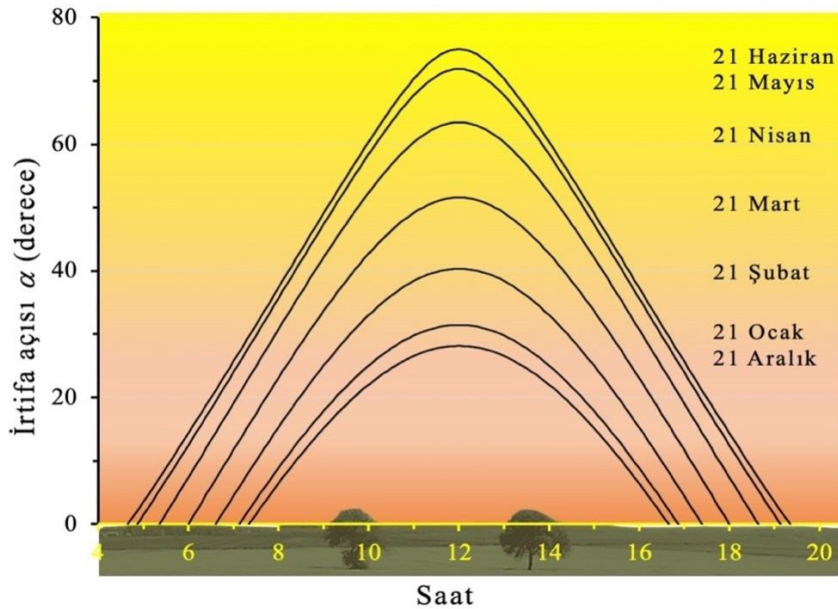
$$\text{olmak üzere eğer } |\xi| \leq 1 \text{ ise } \alpha = \sin^{-1} \xi \text{ olacaktır} \quad (3.7)$$

(δ : deklınasyon, ψ_e : enlem, ω : saat açısı)

ifadesiyle verilir (Şen, 2008). *Heliostatın* kurulduğu arazinin Kuzey-Güney doğrultusunda ξ_{KG} açısı ile eğimli ise hesaplamalarda bu eğimin etkisi

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \psi_e + \cos \delta \cos \omega \cos \psi_e) + \xi_{KG} \quad (3.8)$$

olarak yansıtılabilir (bu çalışma).



Şekil 3.6 Güneş irtifa açısının bir gün boyunca zamana bağlı değişimi. Diğer aylar olan Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim ve Kasım aylarındaki değişimler karşılık gelen sırayla Mayıs, Nisan, Mart, Şubat ve Ocak aylarıyla aynıdır.

Güneş irtifası bulunduğu enlem daireleri kuşağında kış ve yaz gündönümünde yaklaşık olarak 24° ile 74° arasında değişir. Şekil 3.6 Kuzey Yarım kürede, temsil olarak Türkiyede bir bölgede farklı tarihlerde günlük Güneş irtifa açısının kış ve yaz gündönümlerinin arasındaki aylar için değişimleri göstermektedir. Şekilde verilmeyen diğer aylardaki değişimler dekarşılık gelen aylarla aynıdır.

3.3.7 Güneş Ufuk (Azimut) Açısı - ϕ_A

Güneş radyasyonunun sabahtan akşama kadar taradığı ufuk (azimut) açısının yıl gününe ve günün saatine göre değiştiği günlük gözlemlere dayanarak bilinmektedir. Ufuk açısı ifadesi astronomiden ödünç alınarak aşağıda verilmiştir;

$$\xi = \frac{\sin \delta \cos \psi_e - \cos \delta \cos \omega \sin \psi_e}{\cos \alpha} \text{ olmak üzere}$$

Eğer $|\xi| \geq 1$ ise $\xi \rightarrow$ Tamsayı(ξ) al

(Yuvarlama nedeniyle $|\xi| \geq 1$ olması durumunda ± 1 yap) (3.9)

Eğer $\sin \omega > 0$ ise $\phi_A = \cos^{-1} \xi - 180$

aksi halde $\phi_A = 180 - \cos^{-1} \xi$ al.

(δ : deklinasyon, ψ_e : enlem, ω : saat açısı)

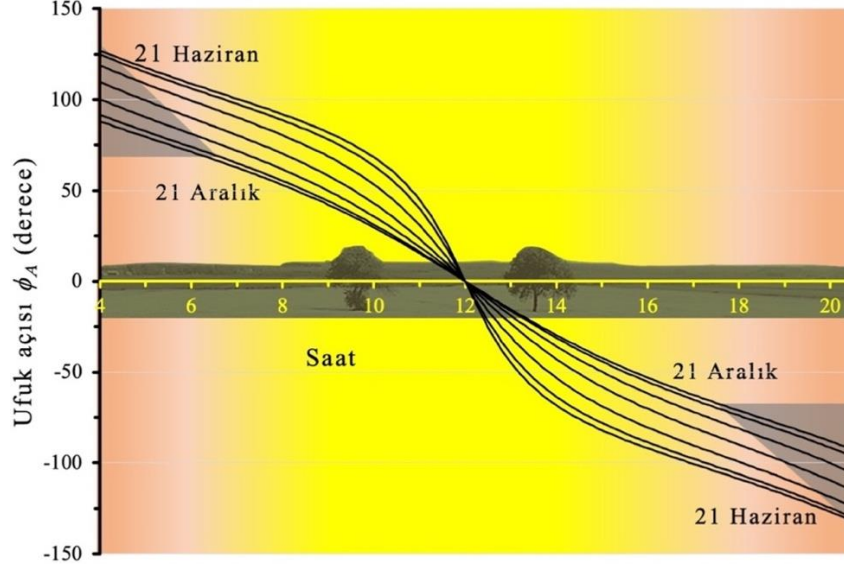
Ufuk açısı, Güneşin irtifa açısı ile birlikte değişir. Açı, saat açısının sıfır olduğu öğleden önce, Güney doğu tarafında pozitif, öğleden sonra Batı tarafında negatiftir. Şekil 3.7 ufuk açısının bir gün boyunca değişimini kış gündönümü ile yaz gündönümü arasındaki ayların 21'inci günleri için verilmiştir. Aynı değişimler karşılık gelen diğer altı ay için de aynıdır, (Şen, 2008).

3.3.8 Güneşin Doğma ve Batma Saatleri

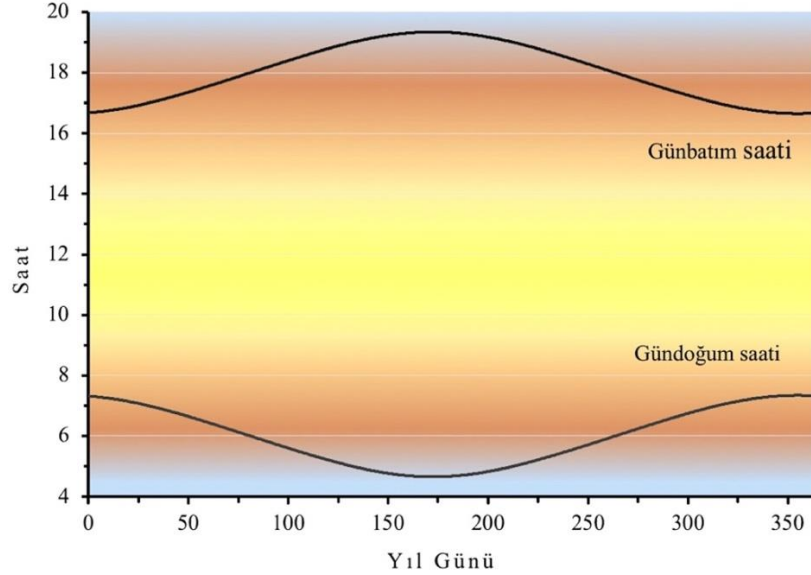
Heliostatın çalışması Güneşin doğmasından kısa bir süre sonra başlar ve batmadan kısa bir süre sona erer. Güneş battıktan sonra üretimin devam etmesi gündüz vakti üretim yanında sıcak madde depolarında ısı enerjisi olarak depolanan madde miktarına ve tüketim oranına bağlıdır. Güneşin doğma ve batma zamanı Dünyanın hareketlerine bağlı olarak türetilen ifadelerle verilmektedir. Güneşin doğma ve batma saatleri enlem dairesine ve deklinasyona, dolayısıyla yıl gününe bağlı aşağıda verilmiştir,

$$T_{GD} = T_0 - \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \psi_e \sin \delta}{\cos \psi_e \cos \delta} \right) \quad (\text{Gün doğumu})$$

$$T_{GD} = T_0 + \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \psi_e \sin \delta}{\cos \psi_e \cos \delta} \right) \quad (\text{Gün batımı})$$
(3.10)



Şekil 3.7. Haziran ve Aralık ayları ve arasındaki aylarda Güneş azimut açısının bir gün boyunca değişimi. Kış gündönümü ile yaz gündönümü arasındaki aylar Ocak, Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs'tır. Diğer aylar olan Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim ve Kasım aylarında değişim karşılıklı aylarla aynıdır.



Şekil 3.8. Kuzey Yarımkürede Türkiye'de Gündoğum ve Günbatım saatlerinin bir yıl boyunca (günlere bağlı) değişimi.

İfadelerde T_0 yerel öğlen saatidir ve çoğu yerde $T_0=12.00$ olarak alınır. Paydadaki 15° saat açısıdır ve 360° açının 24 saate bölümüdür. ψ_e ve δ yukarıda da tanımlandığı gibi sırayla sistemin bulunduğu enlem dairesi ile Dünyanın sapma açısı ya da deklinasyondur, (Şen, 2008). Şekil 3.8’de gündeğum ve günbatım saatlerinin bir yıl boyunca değışimi verilmiştir. Güneş enerjisini toplamaya başlama ve bitirme zamanları bu denklemlerle belirlenebileceğı gibi Güneşin doğduktan sonra ve batmadan önceki limit açıları ile belirlenebilir. Örneğın irtifa açısı Güneşin doğumundan sonra 10° yükselince başlayabilir ve batmadan önce aynı açıda üretim durdurulabilir. Güneş battıktan sonra, ya da kapalı havalarda üretim ısı depolarındaki sıcak ısı depolama maddesini kullanarak devam ettirilir. Depodan üretim süresi depolanan sıcak depo maddesine ve tüketilen güç miktarına bağılı olacaktır.

Tablo 4.1. Güneş kulesi sisteminin tasarım ve hesaplamasında kullanılan değişkenler.

| | |
|---|--|
| Φ : Alanın azimut açısı | χ : Heliostat halkanın kule açısı |
| Φ_N : Ayna normalinin azimut açısı | θ_N : Ayna normalinin zenit açısı |
| β : Güneşin arazi düzlemindeki izdüşüm azimut açısı | α : Güneş radyasyonunun irtifa açısı |
| h_T : Kule yüksekliği | r_i : i 'nci heliostat halkasının yarıçapı |
| h_m : Ayna yüksekliği | h_w : Ayna genişliği |

4.1.1 Aynaların Normal Açılarının Hesaplanması

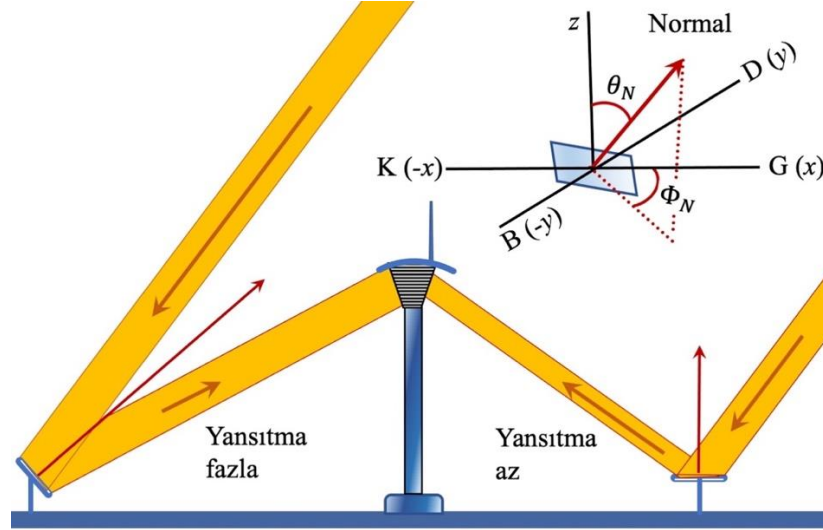
Bir *heliostatta* toplayıcı aynaların yönelimleri Güneş radyasyonunu sürekli kuledeki ısı değiştiriciye odaklayacak biçimde olmalıdır ve bu odaklama yıl boyunca Güneşin bütün irtifa ve azimut açıları için yapılmalıdır. Daha önce de açıklandığı üzere odaklama işlemi aynaların her birisinin Güneş izleme mekanizmasına bağlı olmalarını gerektirir.

Güneş izleyici sistem (solar tracking) iki farklı yoldan yapılabilir:

1. Her aynada bulunan bir elektronik yön sensör devresi ve sürücü motor ve dişli veya şanzuman sisteminden oluşabilir ve bağımsız Güneş izleyici Güneş radyasyonunun geliş yönünü sürekli algılayarak aynayı bir motor ve dişli sistemiyle ona göre yönlendirir.
2. Merkezi bir bilgisayarda bu çalışmada yapılan yazılımla hesaplanan her bir aynanın yönelim açı değerleri aynalardaki motor ve dişli sistemine aktararak Güneş radyasyonunun bir yıl boyunca her gün ve her dakika aynaları yönlendirebilir.

Bu çalışmada heliostat tasarımı yanında aynaların yönelimlerinin bütün yıl boyunca ve günün her anı için hesaplamasının yapıldığı bir yöntem geliştirilmiştir.

Şekil 4.2 bir *heliostatın* farklı konumlardaki iki aynasının Güneş radyasyonunu kuleye yansıtma temsili olarak gösterilmiştir. Ayna normalinin zenit açısı küçük olan ayna daha az miktarda yansıtma yaparken normalin zenit açısı büyük olan ayna daha fazla miktarda radyasyon yansıtacaktır. Şekilde bir aynanın normali ve yerel koordinat sistemine bağlı olan normalinin açıları Φ_N ve θ_N gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Güneş radyasyonunun aynaların yönelimlerine bağlı yansıtıldığı radyasyon miktarı ile aynanın normali ve normal açılarının gösterimi

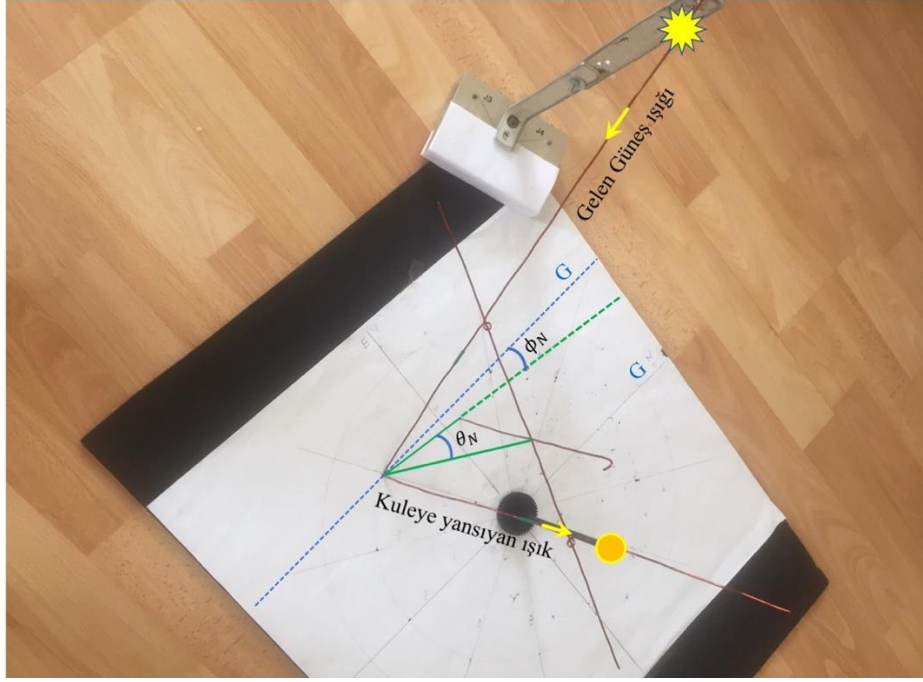
Bu tez çalışmasında heliostat aynalarının yerel koordinat sistemine ve kuleye göre olan konumlarına bağlı normalinin açıları, bir model üzerinde alınan ölçümlerle ampirik yolla belirlenmiştir. Modelde Güneş radyasyonunun ve aynadan yansıyan radyasyonun temsil edildiği doğru çubuklar (veya laser demeti) kule etrafında farklı halkaların yarıçapları için yönlendirilerek arazi düzlemindeki izdüşümlerinin Güney, (X-ekseni), yönüne göre ölçülen ayna normalinin azimut açıları ile zenit açıları ölçülerek listelenmiştir. Bu modelin bir konumu Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Listelenen ölçümlerden normalin azimut ve zenit açılarının yerel koordinatın azimut açısı ϕ ile Güneşin irtifa (α) ve azimut (β) açılarına bağlı fonksiyonlar en küçük kareler yöntemi ile bulunmuştur. Bu model üzerinden ölçülen ayna normali açılarının değişimini aynanın yerel azimut açısına, ϕ , ve Güneş radyasyonunun azimu açısına, β , bağlı temsil eden fonksiyonlar aşağıda verilmiştir:

$$\Phi_N = 270 + \frac{\phi + \beta}{2} \text{ olmak üzere}$$

$$\phi = \begin{cases} < \beta & \text{ise } \Phi_N = 180^\circ + \Phi_N \\ = \beta & \text{ise } \Phi_N = 180^\circ + \beta \\ \geq 360^\circ + & \text{ise } \Phi_N = 180^\circ + \Phi_N \\ = 360^\circ \text{ ve } \beta = 0 & \text{ise } \Phi_N = 180^\circ \end{cases} \quad (4.1)$$

ve eğer $\Phi_N \geq 360^\circ$ ise $\Phi_N \rightarrow \Phi_N - 360$ al.

Aynı yöntemle ayna normalinin zenit açısını veren ifade de bulunarak Denklem 4.2’de verilmiştir:



Şekil 4.3. Toplayıcı ayna normalinin Güneşin irtifa ve azimut açıları ile yerel koordinat açılarına bağlı fonksiyonlarını bulmada yararlanılan model.

$$\Omega_0 = \alpha + \frac{180^\circ - \alpha - \gamma}{2} \quad \text{ve} \quad \Omega_1 = \alpha + \frac{90^\circ - \alpha - \gamma}{2}$$

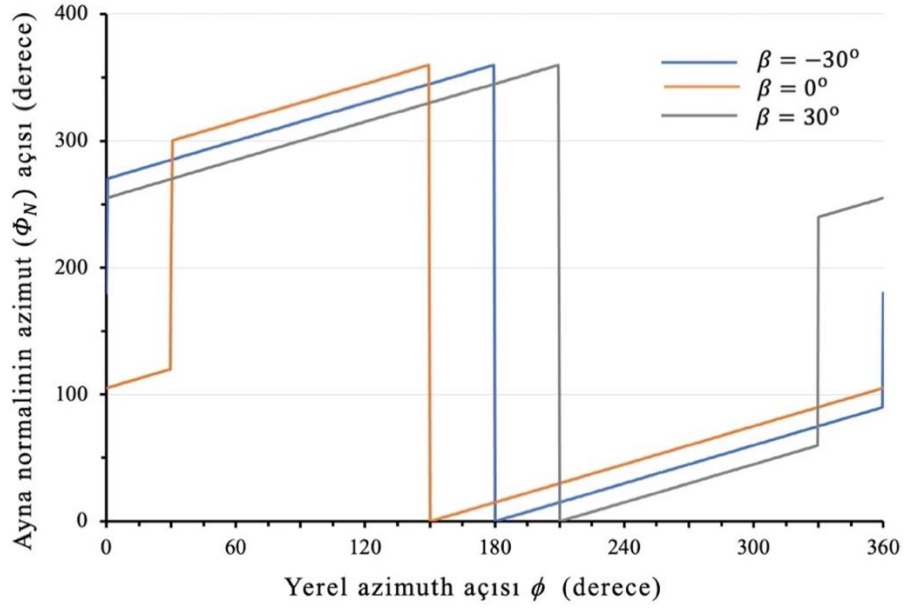
olmak üzere

$$\Delta = \left| \Omega_0 - \Omega_1 \sin \left(\frac{\phi - \beta}{2} \right) \right| \quad \text{tanımını yap,} \quad (4.2)$$

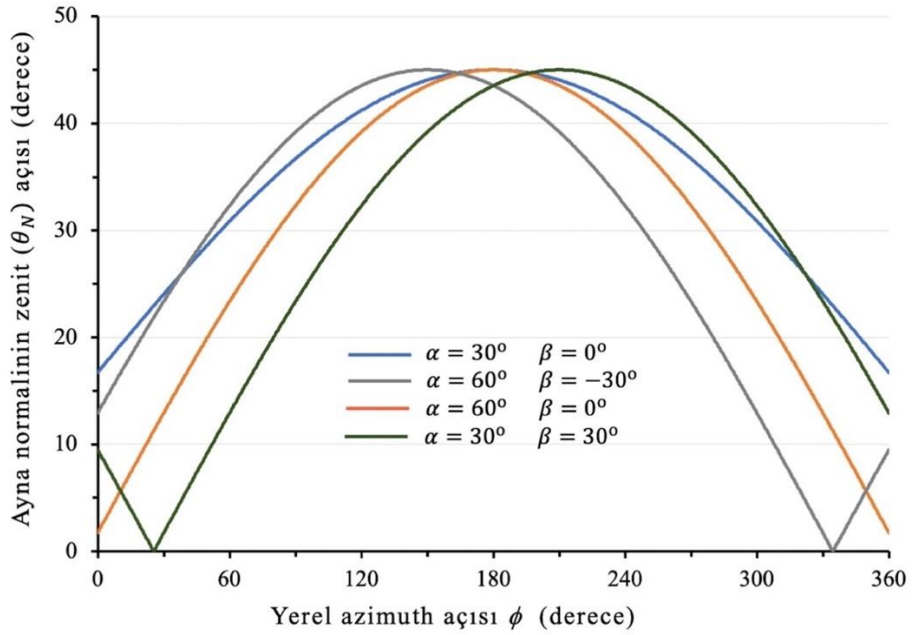
eğer $\Delta > 90^\circ$ ise $\Delta \rightarrow 180^\circ - \Delta$ al ve ,

sonuçta $\theta_N = 90 - \Delta$ olarak tanımla.

Şekil 4.4 ve 4.5 sırasıyla heliostat ayna normalinin seçilen bazı Güneş irtifa ve azimut açıları için yerel azimut açısına göre değişimlerini örnek olarak vermektedir. Şekil 4.4’te görülen ani kırılma değerleri, yerel azimut açısının ayna azimut açısına eşit olduğu durumdaki aynanın açısının 360° aşından 0° açığa değişmesini temsil etmektedir; gerçekte bu değişim olmamaktadır. Benzer durum zenit açısının değişiminde de görülmektedir.



Şekil 4.4. Ayna normalinin Φ_N açıları açılarının yerel azimut açısına göre değişimlerine örnekler.



Şekil 4.5. Ayna normalinin zenit açıları, θ_N , bazı irtifa (α) ve azimut (β) açıları için yerel azimut açısına göre değişimlerine örnekler

4.1.2 Aynaların Yerleşimi: Fresnel Ayna Dizilimi

Bir heliostatta aynaların dizilimi başta gözlem ve tecrübelerle dayanarak manuel olarak yapılabilir, fakat bu uygulama yerleşim alanının verimli kullanılmamasına ve aynaların verim kaybına yol açacaktır. Aynaların yerleşimi bir bakıma tesadüfi olacaktır. Bunun yerine aynaların optimize edilmiş biçimde bir algoritmaya uygun

Bir öndeki aynanın arkasındaki aynadan kuleye giden radyasyonu gölgelememesi için komşu iki halkadaki ard arda iki ayna arası mesafe şekilde görüldüğü gibi $d_i + \delta_i + \delta_{i+1}$ olacaktır. Bu mesafenin belirlenmesi heliostat tasarımındaki problemlerden birisidir. Aynı durum Güneşten aynaya gelen radyasyon için de geçerlidir (buradaki δ_i ile Dünyanın *deklinesyonu* karıştırılmamalıdır, burada mesafe farkını temsil etmektedir). Kule tepesindeki ısı toplayıcı-alıcının radyasyonu olabildiğince fazla alması için alt sınırından aynalara çizilen çizgi ile d_i mesafesi arasındaki dik üçgen yardımıyla aynalar arası minimum uzaklık belirlenebilir. Oluşan dik üçgenin şekilde gösterilen χ açısı ile kule yüksekliğinden dolayı oluşan γ açısı birbirine birhayli yakın olduğundan iyi bir yaklaşıklık olarak $\chi \approx \gamma$ alınabilir. Bu yaklaşımla her bir *heliostat* halkasının yarıçapı,

$$\tan \chi_i \approx \tan \gamma_i \approx \frac{h_T}{r_i} \approx \frac{h_i}{d_i} \text{ ve } h_i = h_M \sin \theta_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4.3)$$

olduğundan

$$d_i \approx \frac{h_i}{\tan \gamma_i} \approx \frac{h_M \sin \theta_i}{\tan \gamma_i} \text{ veya } d_i = \frac{h_m r_i \sin \theta_i}{h_T}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4.4)$$

benzer yolla yine geometriden

$$\delta_i \approx \frac{h_M}{2} \cos \theta_i \approx \delta_{i+1}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (4.5)$$

olarak bulunacağından her bir heliostat halkasının yarıçapı

$$r_{i+1} = r_i + \frac{h_M \sin \theta_i}{\tan \gamma_i} + h_M \cos \theta_i \quad (4.6)$$

olarak bulunur. En iç halka keyfi ya da bazı kriterlerle belirlendikten sonra diğer halkaların yarıçapları yukarıdaki tekrarlılama bağıntısı ile bulunabilir. İfadelerde N *heliostatın* halka sayısı ve θ_i her bir aynanın normalinin zenit açısıdır.

Heliostat halkalarındaki her bir aynanın yönelimi ya da başka ifade ile aynaların normal açıları, Güneş radyasyonunun gelme açısına ve aynaların kuleye göre konumlarına bağlı olarak halkaların merkezlerinin kaymasına neden olacaktır, yani halkalar eş merkezli olmayacaklardır. Şekil 4.6'da gösterildiği üzere kulenin Güney tarafında olan aynaların normalleri zenite daha yakın, yani ayna düzlemi zemine yaklaşık paralel, kulenin arka tarafında olan aynaların normalleri zenite göre daha fazla, başka ifade ile normal açıları daha büyük olacaktır. Bunun sonucunda kulenin

Güneyindeki aynalar birbirlerini en az gölgeleyecektir ve aynalar birbirlerine daha yakın olurken kulenin Kuzey tarafındaki aynalar dik durduklarından birbirlerini daha fazla gölgeleyecek ve aralarındaki mesafeler daha büyük olmak zorundadır. Sonuçta, *heliostat* halkalarının merkezleri Kuzeye doğru kayacaktır.

Benzer kayma Doğu-Batı yönünde de olabilirse de Güneş ışığından maksimum yararlanmak için bu kaymaya gerek olmadığı kabul edilecektir, çünkü öğleden önce ve öğleden sonra Güneş radyasyonunun gelme açısı antisimetrik olacaktır; bu kabulde çalışmada kayma sadece Güney-Kuzey yönünde yapılmıştır. Gerekli görülürse bu eksen üzerinde kayma keyfi olarak manuel yapılabilir. Her bir *heliostat* halkasının dairesel olduğu kabul edilerek denklemi,

$$(x_i - a_i)^2 + (y_i - b_i)^2 = r_i^2 \quad (b_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots N;) \quad (4.7)$$

olacak ve kutupsal koordinatlarda

$$x_i = a_i + r_i \cos \theta_i, \quad y_i = b_i + r_i \sin \theta_i, \quad b_i = 0, \quad i = 1, 2, 3 \dots N \quad (4.8)$$

olacaktır. Şekil 4.6 ve Denklem 4.6'dan ve analitik geometriden x -ekseni yönündeki kayma miktarı

$$a_{i+1} = r_{i+1} - \left(\frac{r_i}{h_T} + \cos \theta_i \right) h_M, \quad (i = 1, 2, 3, \dots N) \quad (4.9)$$

olarak tekrarlama bağıntısından bulunur. Birinci halka $a_1=0$ alınmalıdır. Bu ifade her bir *heliostat* halkasının merkez dışılığı, ya da kayması halkaların eksantrikliği olarak tanımlanır.

4.1.3 Heliostat Halkasındaki Aynaların Arasındaki Mesafeler

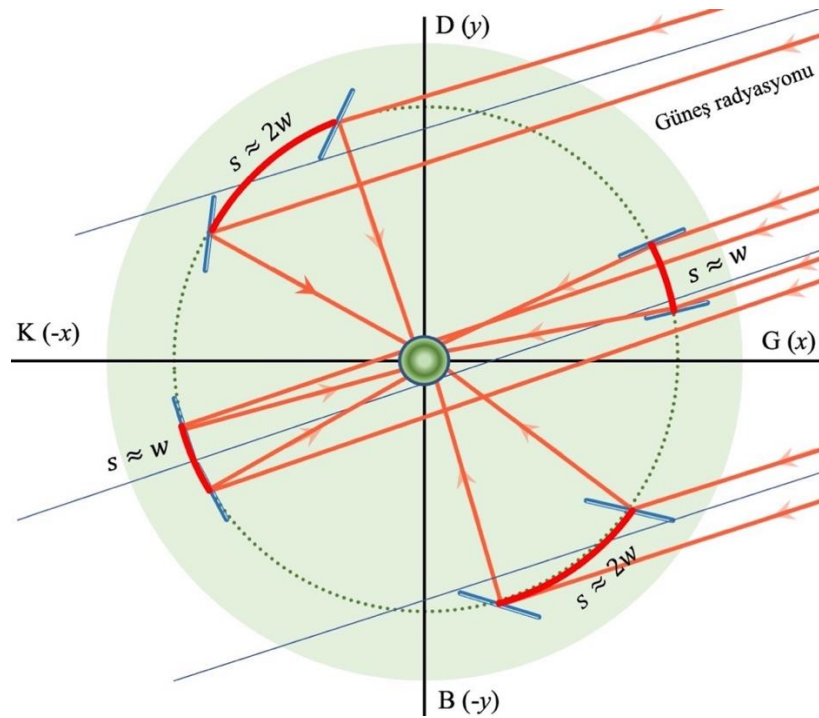
Heliostatta halkalar arasındaki mesafeler yanında bir *heliostat* halkasındaki yan yana bulunan aynaların aralıkları da önemlidir. Farklı açılarda gelen Güneş radyasyonunu yan yana duran aynalar tarafından da gölgelenmemeli, ya da minimum düzeyde gölgelemelidir. Güneş radyasyonunun yıl günlerine bağlı değişimleri göz önünde bulundurularak gölgelemeyi sıfır yapmak için aynalar arası mesafelerin de yeteri kadar olması gerekir. Ayrıca Güneş radyasyonunun zayıf olduğu kış günleri için aynalar arası mesafeleri gereğinden fazla yapmak, yaz günlerinde radyasyonun dik geldiği dönemlerde yeteri kadar yararlanılmamasına yol açacaktır. Bu husus bir tercih konusudur. Makul ve uygun olan çözüm radyasyonun yoğun olduğu dönemleri dikkate almak olmalıdır. Çoğu uygulamalarda yılın farklı günlerindeki kayıpları telafi etmek

için aynaların halkada eşit aralıklı dağıtılmasının uygun olduğu kabul edilmiştir ve bu çalışmada da bir halkadaki aynalar eşit aralıklı dağıtılmıştır. Bunun yanında isteğe bağlı olarak bir halkadaki aynaların aralıkları keyfi olarak da belirlenebilir, ancak bu optimum verim için uygun olmayabilir.

Bir *heliostat* halkasında Güneş radyasyonunun gelme açısına bağlı olarak aynalar arası mesafenin eşit olmayıp açığa bağlı değişimi için geometrik yaklaşım Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu geometriden hareketle yan yana duran aynalar arası mesafe yerel azimut ve Güneş radyasyonunun azimut açısına bağlı olarak yaklaşık bir ifade ile

$$s \approx w_M [1 + |\sin(\phi - \beta)|] \quad (4.7)$$

olarak verilir. İfadede w_M her bir aynanın genişliği, ϕ yerel azimut açısı ve β Güneşin azimut açısıdır.



Şekil 4.7. Bir heliostat halkasında yanyana dizilen aynaların aralarındaki mesafenin yerleşimini gösterimi

4.2 Aynaların Topladığı Toplam Güç

Heliostatın toplayıcı aynalarının yönelimleri nedeniyle yılın günlerinde ve günün her anında farklı açılardan gelen Güneş radyasyonunu kulenin ısı değiştiricisinde alıcısında toplayacaktır. Aynaların kule tepesine yansıttığı güç, Güneş normali ile

Güneş radyasyonunun doğrultusunun, yani aynaların normalleri ile Güneş radyasyon vektörlerinin skalar çarpımları ile bulunacaktır. Aynaların normallerinin vektörleri her bir ayna için,

$$\mathbf{A}_{ij} = A_0 [\sin(\theta_N)_{ij} \cos(\Phi_N)_{ij} \hat{i} + \sin(\theta_N)_{ij} \sin(\Phi_N)_{ij} \hat{j} + \cos(\theta_N)_{ij} \hat{k}] \quad (4.8)$$

($i = 1, 2, 3 \dots M$ ve $j = 1, 2, 3 \dots N_i$)

olarak yazılır. A_0 her bir aynanın yüzey alanıdır. Birim alana gelen Güneş radyasyonunun güç akışının vektörü de

$$\mathbf{I} = \frac{I_0}{AM_n} [\sin \theta_Z \cos \beta \hat{i} + \sin \theta_Z \sin \beta \hat{j} + \cos \theta_Z \hat{k}] \quad (4.9)$$

olacaktır. İfadede I_0 insolasyon, AM_n hava kütlesi ve $\theta_Z = 90 - \alpha$ radyasyonun zenit açısıdır. Sonuçta her bir aynanın kuleye yansıttığı radyasyon gücü

$$P_{ij} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{A}_{ij} = \frac{A_0 I_0}{AM_n} [\sin(\theta_N)_{ij} \cos(\Phi_N)_{ij} \sin \theta_Z \cos \beta + \sin(\theta_N)_{ij} \cos(\Phi_N)_{ij} \sin \theta_Z \sin \Phi_N + \cos(\theta_N)_{ij} \cos \theta_Z] \quad (4.10)$$

ifadesi olarak ifade edilecektir. *Heliostatın* ısı değiştiriciye yansıttığı toplam güç de her bir aynanın yansıttığı güçlerinin toplamı olacaktır. Böylece her bir anda kuleye yansıtılan toplam güç

$$P_T = \frac{A_0 I_0}{AM_n} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots M \text{ ve } j = 1, 2, 3 \dots N_i) \quad (4.11)$$

olarak toplam ifadesiyle verilir.

4.3 Heliostat Hesaplama Girdileri

Bu çalışmada tasarlanan *heliostatın* ve yapılan yazılımın hesaplamaları için gerekli girdiler aşağıda verilmiştir:

- i. *Heliostatın* enlem ve boylam olarak coğrafi konumu: Enlem ve boylam derece ve dakika olarak girilmelidir. Örneğin Türkiye’de bir konum için 38° ve 42” enlem, 35° ve 24” boylam gibi.
- ii. *Heliostatın* kurulacağı arazinin alanı için arazinin en ve boy bilgileri verilmelidir.

- iii. Kulenin arazideki konumu girilmelidir. Kule arazinin ortasına ya da bir kenarına olabilir. Tercih edilen konumu arazinin tamamının kullanılabilceği yer olması tercih edilmelidir.
- iv. Kule yüksekliği mevcut teknolojinin izin verdiği ölçüde olacaktır. Aşırı yüksek olması erimiş ısı aktarım ve depolama maddesinin aktarılmasında çıkabilecek yalıtım veya pompalama gibi olumsuzluklar nedeniyle tercih edilmezken, kulenin kısa olması da aynaların sayısının az olmasına ve dolayısıyla toplanan gücün az olmasına yol açacaktır. Uygun kule yüksekliği termodinamiğin dikkate alındığı hesaplamalarla belirlenmelidir.
- v. *Heliostatın* birinci halkasının yarıçapı tercihe dayalı belirlenecektir. Diğer halkaların yarıçapları Denklem 4.6 ve 4.9'da verilen tekraralama bağıntılarından bulunacaktır.
- vi. Her bir aynanın eni ve boyu tanımlanmalıdır.
- vii. Bulunulan coğrafi bölgenin öğlen saati, yani Güneşin tam tepede olduğu saat verilmelidir. Bu saat çoğunlukla 12.00 olarak verilse de yaz saati uygulaması olan ve saat diliminden uzak olan konumlarda biraz farklı olabilir.
- viii. *Heliostatın* yeterli Güneş radyasyonu alarak üretime başlama zamanı, her ne kadar gündoğum ve günbatım zamanlarına bağlı belirlenebilir ve bu zamanlar yilgünlerine bağlı değiştirdinden bunun yerine tercihan Güneşin doğumdan sonra ve batmadan önceki irtifa açısı önceden belirlenebilir.
- ix. Aynı arazide aynalarla aynı yüzey alanına sahip olan fotovoltaik panelin maruz kaldığı Güneş radyasyonunun gücü de karşılaştırma için hesaplanabilmelidir.
- x. Gerek CSP sistemini ve gerekse verimleri bu çalışmanın dışındadır. Sadece toplanan Güneş gücü dikkate alınmıştır.

Bu verilere ek olarak *heliostatın* yılın hangi günü ve günün hangi saatinde kurulacağına da önceden belirlenmesi gerekmektedir. Metin içinde belirlendiği üzere aynaların konumları sabit olacağından maksimum gücün alınacağı zaman için tasarım yapılmalıdır.

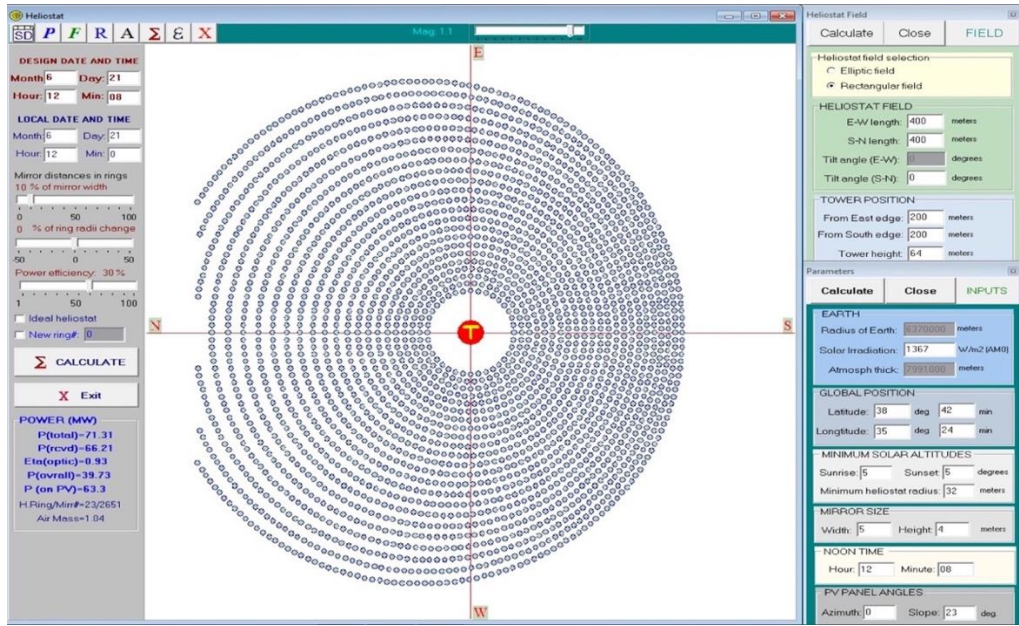
Ayrıca, alınan gücün hesaplanacağı gün ve saat ayrıca verilmelidir.

Bunlara ek olarak bazı müdahaleler yapabilmek için istenirse hesaplamalarda halkalar arası mesafeler ve her bir halkadaki aynalar arası mesafelere de belirli ölçülerde müdahale edilebilmelidir.

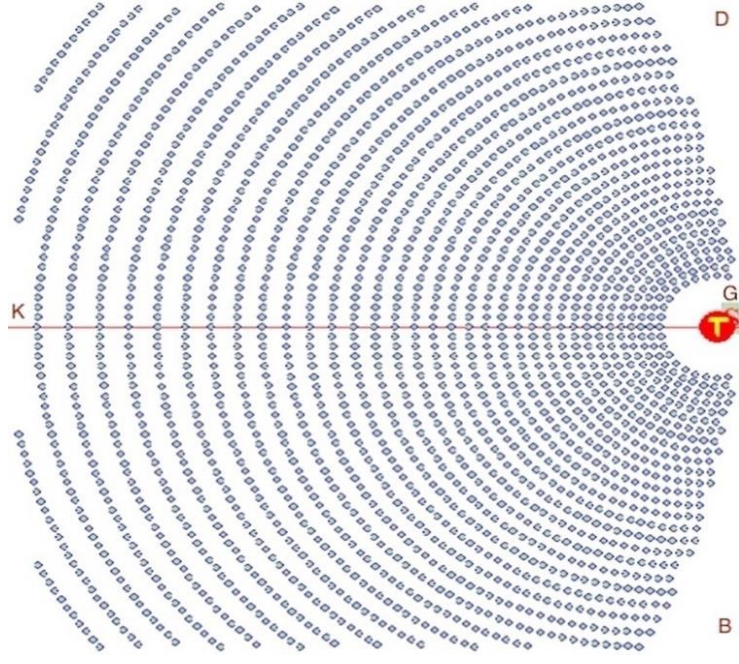
Temel olarak girilmesi gereken bu verilerle bir *heliostatın* tasarımını ve topladığı gücün hesaplamasını yapan akış diyagramı EK-A'da, hesaplama yapılan yazılımın arayüzünün görüntüsü de Şekil 4.8'de verilmiştir.

4.4. Heliostat Hesaplama Örnekleri

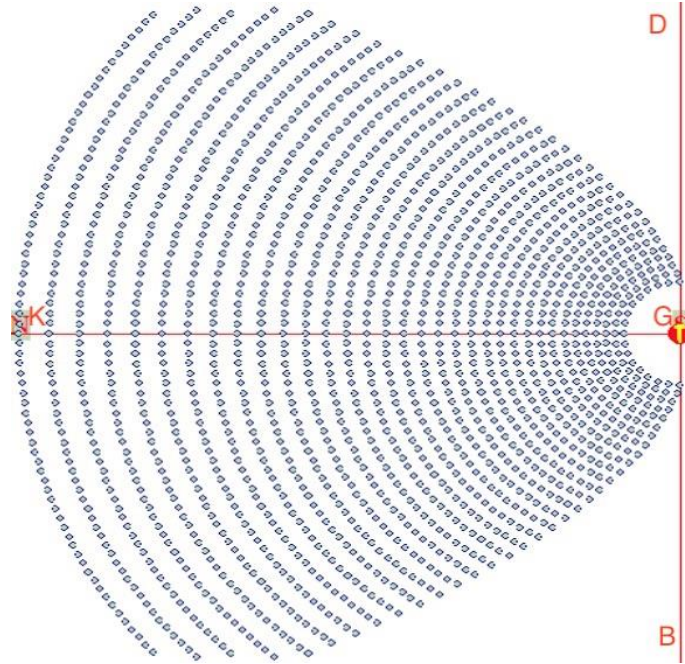
Bu çalışmada geliştirilen algoritma ve yazılımı ile yapılan hesaplamalarla oluşturulan bazı örnekler Şekil 4.9 - 4.12'de verilmiştir. Bu örneklerin dışında istenirse başka coğrafyalarda değişik gün ve saat için de hesaplama yapılabilir. Bütün hesaplamalar 38° ve $42''$ enlem, 35° ve $24''$ boylam konumu ve eni 400 m, boyu 400 m, olan arazi için yapılmıştır. *Heliostatın* güç verimi henüz bilinmediğinden sadece toplam güç verilmiştir. Kule yüksekliği 64 m alınmıştır. Kulenin konumu arazide farklı yerlerde seçilmiştir. İlgili bilgiler şekil alt yazılarında verilmiştir.



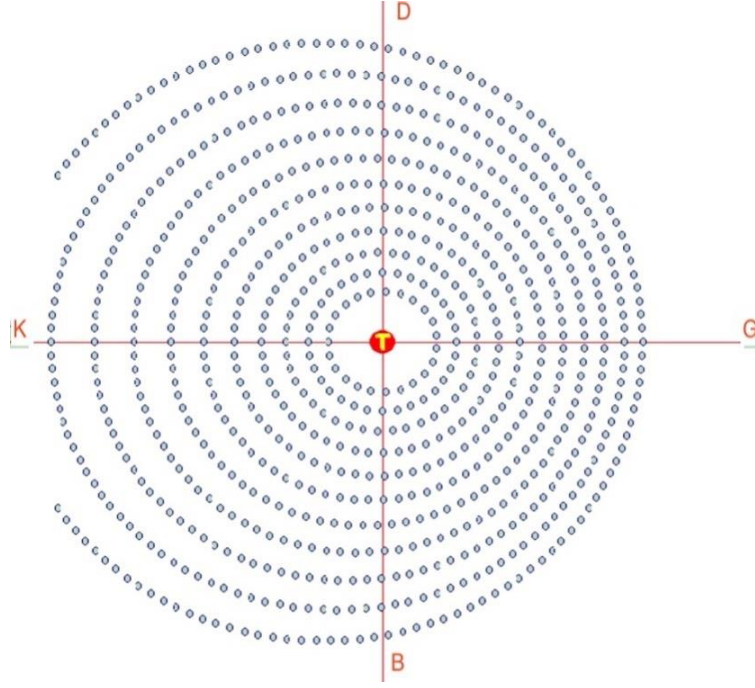
Şekil 4.8. Örnek heliostathesaplama programının arayüzü. Hesaplama 21 Haziran saat 12 için yapılmıştır. Kule arazinin merkezindedir.



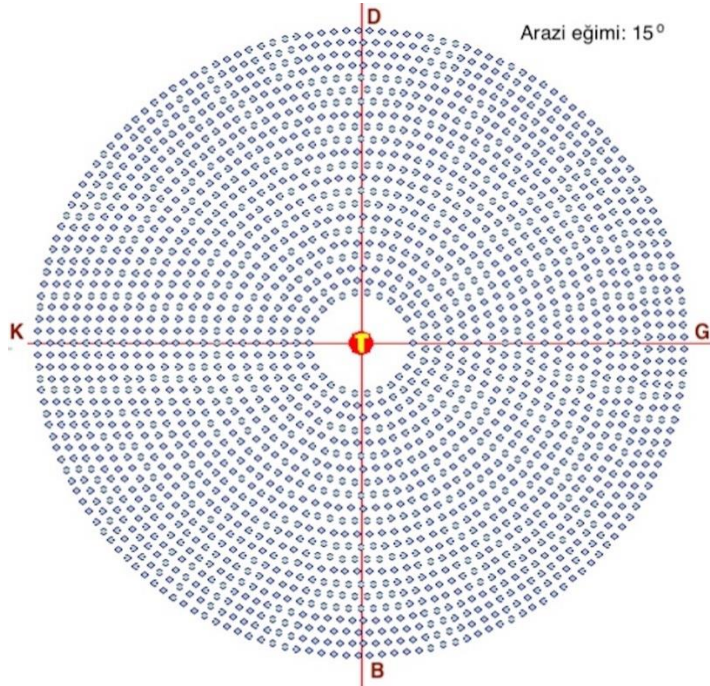
Şekil 4.9. Örnek heliostathesaplama ve tasarımı. Hesaplama 21 Aralık saat 12 için yapılmıştır. Kule yüksekliği 64 m ve arazinin Güney sınırındadır.



Şekil 4.10. Örnek heliostathesaplama ve tasarımı. Hesaplama 21 Aralık saat 12 için yapılmıştır. Kule yüksekliği 64 m ve Güney sınırdadır ve heliostatın düzenine müdahale edilmiştir.



Şekil 4.11. Örnek heliostatesaplama ve tasarımı. Hesaplama 21 Aralık saat 12 için yapılmıştır. Heliostat halkaları ve aynalar arası mesafeler arttırılmıştır. Kule arazinin merkezindedir ve yüksekliği 64 m alınmıştır.



Şekil 4.12 Örnek heliostat hesaplama ve tasarımı. Hesaplama 21 Aralık saat 12 için yapılmıştır. Arazi Güneye doğru 15° eğimlidir. Kule yüksekliği 64 m ve arazinin merkezindedir. Arazinin Güneye doğru eğimli olması heliostatın simetrik olmasına yol açmaktadır. Önemli bir tercih nedenidir.

4.5. Örnek Güç Hesaplamalarında Ön Kabuller

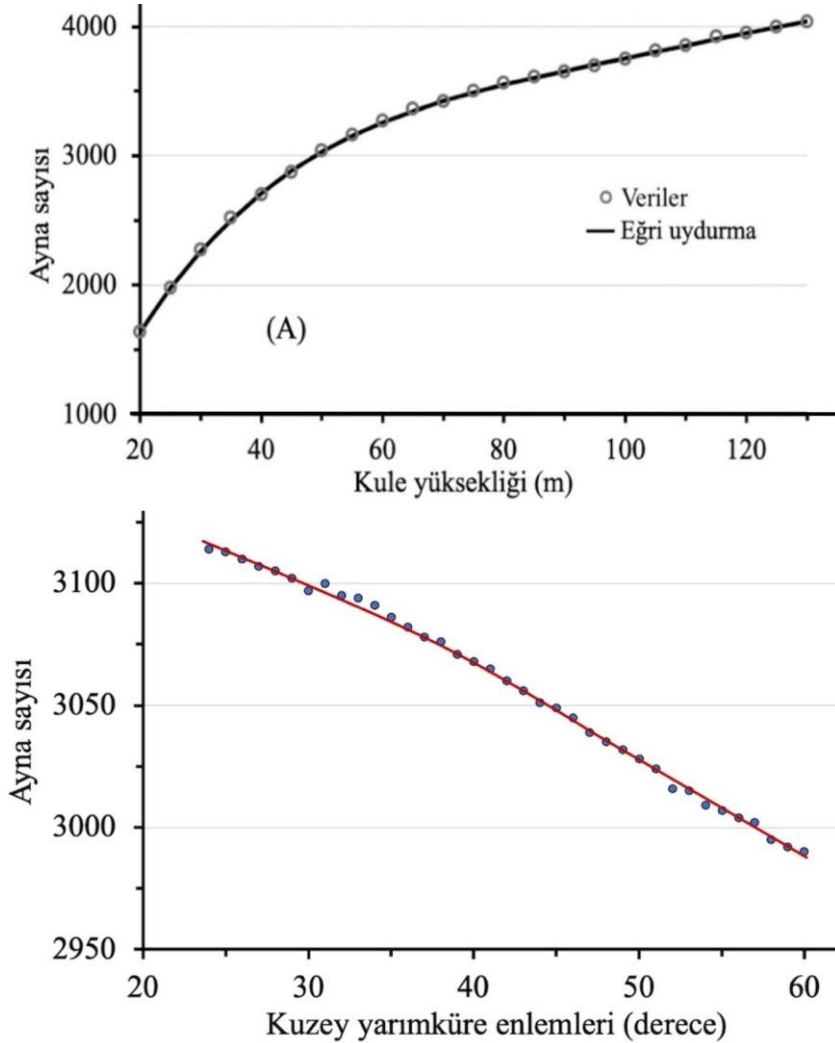
Heliostatın Güneşten aldığı ve alıcıya yansıttığı Güneş gücü ile aynı alana sahip yönelimi sabit olan fotovoltaik panelin aldığı Güneş gücü hesaplamalarında çok sayıdaki parametrelerden ve kabullerden bu çalışmada aşağıdaki sınırlı olanlar dikkate alınmıştır. Sabit yönelimli fotovoltaik paneller *heliostat* ile karşılaştırma amacıyla hesaplama dahil edilmiştir.

- i. Dünya üzerinde farklı enlemlerde *heliostatın* aldığı Güneş enerjisini görmek için Ülkelerimizin bulunduğu Kuzey yarımkürede Sahra kuşağında Ekvator üzerinde (Sahra Çölünde (Libya, K: 30° 02', D: 19° 17'), Türkiye, (Ankara, K: 40° 39', D: 33° 02'), Ukrayna (Kiev, K: 50° 26', D: 30° 37') ve Rusya'da (Moskova, K: 55° 53', D: 37° 28') konumları için hesaplama yapılmıştır.
- ii. Karşılaştırma amacıyla *Heliostat* tasarımı bütün konumlar için en uzun gün olan 21 Haziran öğle saatinde, güç hesaplamaları da 12 ayın 21'nci günü öğle vakti için yapılmıştır.
- iii. Yapılan hesaplamaların tamamında karşılaştırma amacıyla havanın açık ve bulutsuz olduğu varsayılmıştır. Bulut, yağmur, kar gibi meteorolojik olaylar nedeniyle Güneşlenme sürelerindeki farklılıklar bu hesaplamada dikkate alınmamıştır.
- iv. CSP sisteminin tamamının ve aynı yüzey alanına sahip fotovoltaik panellerin güç verimleri bu çalışmanın dışındadır ve dikkate alınmamıştır.

4.1.1. Ayna Sayısı Hesaplama Örnekleri

Bu çalışmada ortaya çıkan yazılımla yapılabilecek çok sayıdaki hesaplama örneği olarak önce belirli bir konumda ve bir arazide ayna sayısının sadece kule yüksekliğine bağlı değişimi ile Kuzey yarımkürede diğer parametreler ve veriler aynı kalmak kaydıyla ayna sayısının farklı enlemlere bağlı değişimi belirlenmiştir. Şekil 4.13 bu değişimleri vermektedir. Şekilde (A) değişimi ayna sayısının kule yüksekliğine bağlı değişiminde arazi Karapınar'da seçilmiş ve boyutu 400 m x 400 m alınmıştır. Değişimde görüldüğü üzere kule yüksekliğine bağlı olarak ayna sayısı kule yüksekliğiyle birlikte hızla artmakta, kule yüksekliği arttıkça yaklaşık doğrusal biçimde daha yavaş. Eğer sayı daha da artarsa ayna sayısının sabit kalacağı beklenebilir. Bu değişim *heliostat* için ayrılan arazi için ayna sayısının belirlenmesinde değerlendirilebilir.

Şekil 4.13 (B) aynı büyüklükteki arazinin Büyük Sahradan başlayarak Kuzey yarımkürede enlemlere bağlı ayna sayısı değişimini göstermektedir. Büyük Sahradan itibaren ayna sayısı Kuzeye doğru artmakta, yaklaşık Türkiye'nin Kuzeyinde, yani Karadeniz kıyılarında maksimuma ulaşmakta, daha Kuzeye gidildikçe azalmaktadır. Sayının artması ve kuzeye doğru azalması Güneş radyasyonunun geliş açısına bağlıdır. Bu değişimde ilave olarak aynaların Güneş izleme sistemlerine sahip olmalarının da bir biçimde sayıyı etkilemesi kaçınılmazdır.



Şekil 4.13. (A) Diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla aynı coğrafi konumda ve arazi alanında, (Karapınar, K: $37^{\circ} 43'$; D: $33^{\circ} 35'$), ayna sayısının farklı kule yüksekliğine bağlı değişimi. (B) Kule yüksekliği ve diğer parametreler sabit tutularak Sahra çölü ile Moskova arasında farklı enlem dairelerinde yapılan ayna sayısı hesaplamaları.

Heliostat tasarımının amaçları arasında öncelikle pahalı ve uzun yıllar çalışması beklenen tesisi yapmadan önce en uygun konfigürasyonu oluşturmak, bulunduğu coğrafi konuma bağlı olarak ısı değiştiriciye yansıttığı Güneş gücünü ve

günlük, aylık, yıllık, ya da kısa zaman aralıkları için toplanan Güneş enerjisini yaklaşık hesaplayabilmesidir. Yapılabilecek çok sayıda konfigürasyonuna örnek olarak Farklı enlem dairelerinde belirlenen bazı konumlarda güç ve enerji hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

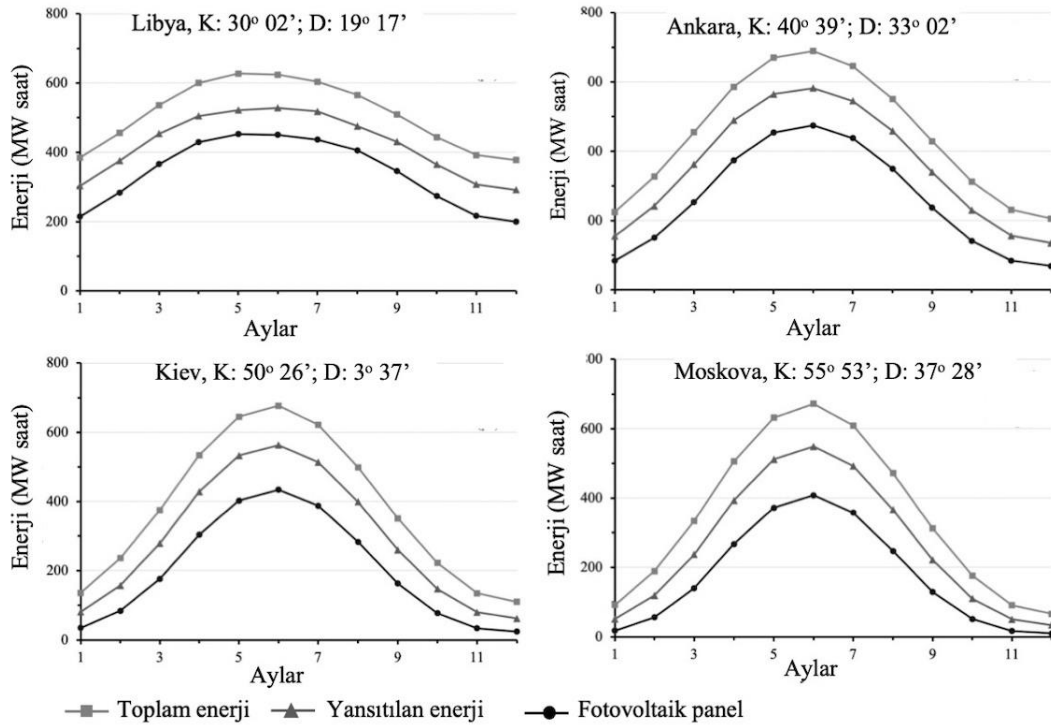
4.2. Hesaplama Örnekleri

Dünya üzerinde farklı enlem daireleri için yapılan örnek hesaplamalarda belirlenen konumlar Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Bu konumlar Güneş kuşağı olan Büyük Sahradan, Libya (K: 30° 02', D: 19° 17'), Ankara (K: 40° 39', D: 33° 02'), Kiev (K: 50° 26', D: 30° 37') ve Moskova (K: 55° 53', D: 37° 28') olarak belirlenmiştir. Hesaplamaların hepsi, birbirleriyle karşılaştırma yapabilmek için 21 Haziran Saat 12.00 için yapılmıştır. *Heliostatın* kurulduğu arazi ile kule konumu ve yüksekliği de aynı ölçülerde tutulmuştur: Boyutları 400 x 400 m, kule arazinin Güney sınırından 148 m uzaklıkta, kule yüksekliği 64 m ve arazi eğimi 0° olarak sabit tutulmuştur. Güç hesaplamaları bir yıl süreyle her ayın 21'nci günü için yapılmıştır (bu tarih *heliostat* tasarımı günü ile karıştırılmamalıdır).



Şekil 4.14. Güneş kuşağı olan Sahra çölünden (Libya) başlayıp Kuzey Yarımkürede güç ve enerji hesaplaması için örnek seçilen merkezler.

Kuzey yarımkürede seçilen merkezlerde (Libya-Güneş kuşağı, Ankara, Kiev ve Moskova) aynı şartlarda yapılan *heliostat* tasarımlarının ve aynı yüzey alanına sahip olup yönelimleri sabit olan fotovoltaik panellerin aylara göre güç değişimleri Şekil 4.15'te verilmiştir. Güneş kuşağında olması nedeniyle, ki deklinasyon fazla değildir, sadece Libya'da aylara göre değişim fazla değilken, daha kuzey enlemlerde kış ve yaz aylarında değişim beklendiği gibi bir hayli fazladır. Şekil 4.16 aynı merkezlerde toplanan aylara göre enerji değişimlerini vermektedir. Enerji değişimi yine beklendiği üzere güç değişimini izlemektedir.

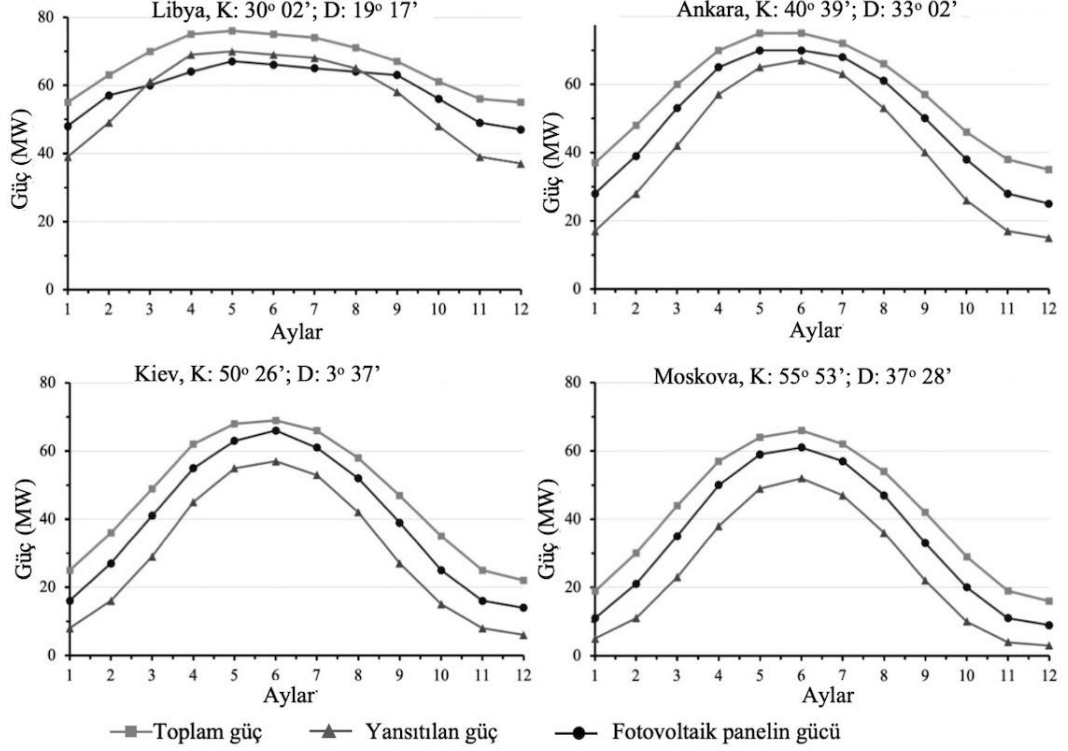


Şekil 4.15. Sahra çölünden Kuzey Yarımküreye doğru seçilen farklı enlemlerdeki merkezlerde yapılan enerji hesaplama örnekleri. Kıyaslama için aynı yüzey alanına sahip olan sabit yönelimli fotovoltaik panelin aldığı Güneş gücü de verilmiştir.

4.2.1. Karapınar için Yapılan Hesaplama Örnekleri

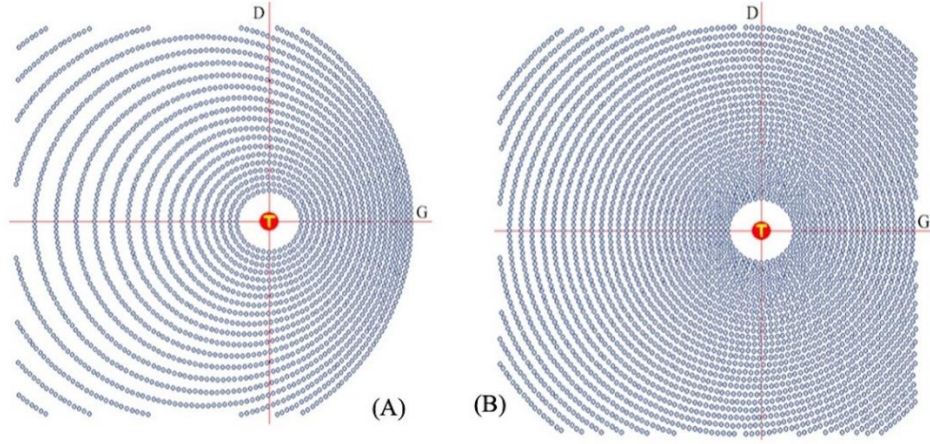
Konya'ya bağlı Karapınar ilçesinin kırsalı son yıllarda oldukça az yağış almaktadır. Buna karşılık güneşlenme günü diğer bölgelere göre fazladır. Ayrıca çölleşme eğilimi nedeniyle tarıma elverişli değildir ve yeteri kadar geniş alanlar vardır. Bu nedenle tarım dışında başka amaçla için değerlendirilmesi planlanmıştır. Bu amaçlardan birisi oldukça büyük bir fotovoltaik Güneş panel tarlası oluşturulmaktadır. Bu uygulamaya paralel ve ayrıca alternatif olarak CSP sisteminin de yapılması uygun

olacaktır. Tez metni içinde belirtilen birçok avantajından dolayı bu tesisin yapılmasının gerekli olduğuna inanıyoruz.



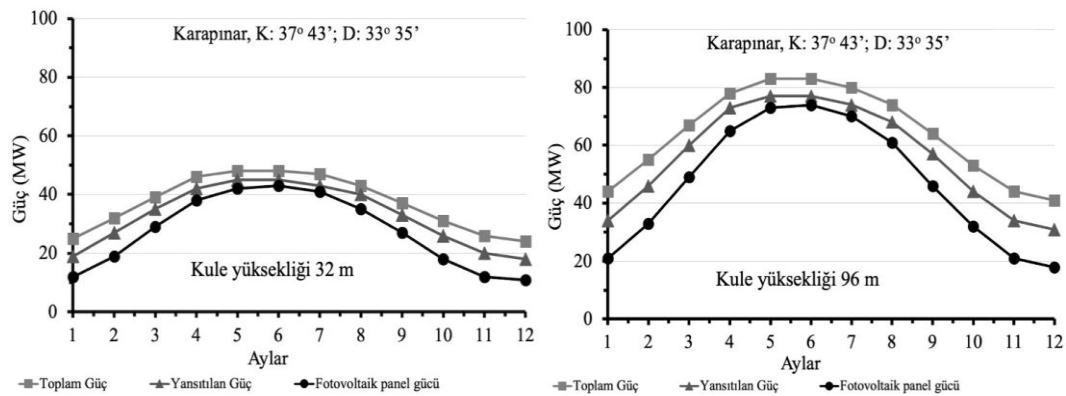
Şekil 4.16. Şekil 4.15'te verilen güç değişimlerini izleyen aylık güç değişimleri. panelin aldığı Güneş gücü de verilmiştir.

Şekil 4.17'te Karapınar için aynı boyuttaki ve aynı konumdaki arazide iki farklı kule yüksekliği için yapılan hesaplama çıktısı verilmiştir. Kule yüksekliğinin 32 m olduğu hesaplamada, (A şekli), beklendiği gibi *heliostatta* ayna sayısı 2330 ile az ve ayna aralıkları fazladır. Öte yanda kule yüksekliği 96 m alındığında (B şekli) odak noktası yüksekte olduğundan *heliostat* halkaları daha sık ve ayna sayısı 3760 olarak fazladır.

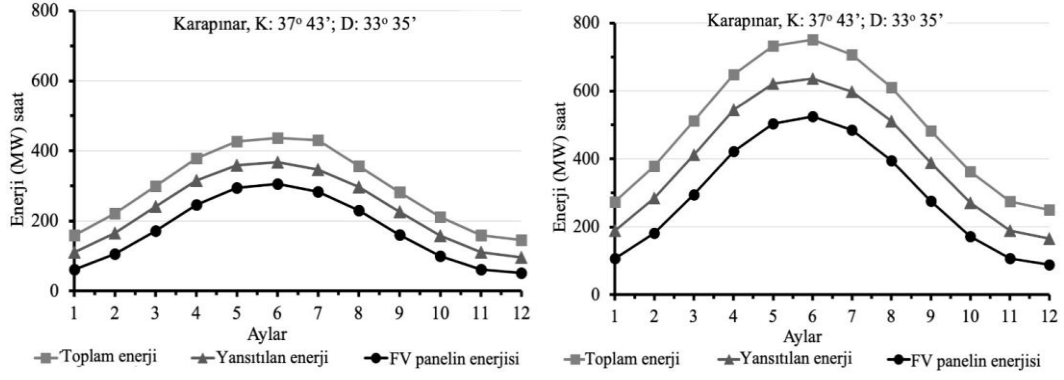


Şekil 4.17. Karapınarda aynı boyuttaki alanda iki farklı kule yüksekliği için yapılan heliostat tasarımları. (A): Kule yüksekliği 32 m, ayna sayısı 2330, (B): kule yüksekliği 96 m, ayna sayısı 3760.

Karapınar için aylık güç ve enerji hesaplaması aynı arazide iki farklı kule yüksekliği için yapılmıştır. Karapınar coğrafi konum olarak Ankara'ya ve Konya'ya yakın olduğundan güç değerleri de oldukça benzer değişim göstermektedir. Ancak Karapınarın iklim şartları çok daha farklıdır, daha fazla Güneşlenme gününe sahiptir. Kule yüksekliğinin 32 m olduğu tasarımda heliostatın ısı değiştiriciye yansıttığı güç değeri Ocak ve Aralık aylarında yaklaşık 20 MW ile Haziran ayında 45 MW arasında değişirken kule yüksekliğinin 96 m olduğu tasarım için güç değeri ayı aylarda 30 MW ile yaklaşık 70 MW arasında değişmektedir. Enerji değişimi de güç değişimini takip edecek biçimde değişmektedir. Kule yüksekliğinin 32 m olduğu hesaplamada heliostatın bir gün boyunca topladığı enerji Aralık-Ocak aylarında yaklaşık 100 kW saat iken Haziran ayında yaklaşık 600 kW saat olmaktadır.



Şekil 4.18. Karapınar'da 400 x 400 m boyutlu arazide kule yüksekliğinin 32 m (solda) ve 96 m (sağda) olması durumunda aylara göre her gün saat 12 için güç değişimi.



Şekil 4.19. Karapınar’da 400 x 400 m boyutlu arazide kule yüksekliğinin 32 m (solda) ve 96 m (sağda) olması durumunda aylara göre her gün gün boyunca toplanan enerji değişimi.

Kule yüksekliği açık biçimde aynı arazide daha fazla ayna ve dolayısıyla daha fazla güç toplama demektir. Fotovoltaik panellerin yerleşimleri bu çalışmada optimize edilmemiş, sadece aynı yüzey alanı kıyaslama için esas alınmıştır. Gerçekte fotovoltaik panellerin yüzey alanları kule yüksekliğine bağlı olmamalı, sadece Güneş radyasyonunun gelmesine göre bağlı yerleştirilmelidir. Bu durumda bile aynı yüzey alanına sahip fotovoltaik panelin topladığı güç her durumda daha azdır.

Heliostatta değerlendirilen güç topladığı güç değil, kuledeki ısı değiştiriciye yansıtılan güçtür. Kosinüs etkisinden dolayı bu güç gelen güçten daha azdır. Her ne kadar CSP sisteminin toplam verimi bu çalışmanın konusu dışında ise de, rapor edilen ve modern teknolojiden beklenen %30 veya üzeri verim dikkate alındığında maksimum verimi %15 civarında olan fotovoltaik panelin iki katı verim beklenir. Buradaki hesaplamalarda arazi fazla büyük değişir. Heliostatın çok daha büyük araziye yapılması mümkündür ve ciddi teknik zorluklar çıkarmaz. Bu dayanarak daha büyük araziye yapılacak bir heliostatın gücü de birhayli fazla olacaktır.

4.2.2. Heliostat Aynalarının Koordinat ve Yönelim Örnek Çıktıları

Tablo 4.2’de bir heliostat hesaplama çıktı örneği verilmiştir. Çıktılar Şekil 4.18’de kule yüksekliğinin 32 m olduğu heliostat hesaplamasından alınmıştır. Tabii ki çıktıların hepsi yerine bazı örnekler tabloya alınmıştır. Başta girdi değerleri verildikten sonra her bir halkanın yarıçapı ve kayma miktarı, peşinden verilen beş sütundan ilk üç sütun her bir aynanın x ve y koordinatı ile x (Güney) yönüne göre yerel azimut açıları verilmektedir. Bu değerler heliostatın tasarım sonucudur. Tabloda son iki sütun sadece hesaplamanın yapıldığı ana ait olan her bir ayna normalinin yönelim açıları olan zenit

ve azimut açılarıdır (bu azimut açısı yerel azimut açısından farklıdır). Bu açılar yılğününe ve saat açısına bağlı olarak değişir. Aynaların Güzeş izleyici mekanizmaları için gerekli koodinatlardır.

Tablo 4.2 Çalışmada oluşturulan yazılımla tasarlanan heliostatın çıktısı olan aynaların koordinatlarına ve ayna yönelimlerine örnek veriler. Veriler Karapınarda 32 m kule yüksekliği için alınmıştır.

Global position of the field
Latitude: 37 degree 43 minutes
Longitude: 33 degree 35 minutes
Plant field sizes- East-West: 400 m North-South: 400 m
Tilt angle of field (Facing to South): 0
Tower position- From East edge: 200 m From South edge: 200 m
Tower height 32 m
Design date- Month: 6 Day: 21
Design time- Hour: 12 Minute: 00
Noon/Refeence time of the day- Hour: 12 Minute: 00
% Shift between mirror distances in a helios ring: 10
Shift between heliostat rings: 0

| Helios Ring 1 | | | | | |
|---------------|----------------|-----------------|----------------------------|---------------------|----------------------|
| | | Radius: 32.0000 | Shift a in x axis: 0.0000 | | |
| Num | Azim-Phi (deg) | South-X(m) | East-Y(m) | Mirr.Norm-Phi (deg) | Mirr.Norm-Teta (deg) |
| 2 | 10.0000 | 31.5100 | 5.5570 | 275.0000 | 11.3000 |
| 3 | 20.0000 | 30.0700 | 10.9400 | 280.0000 | 14.4900 |
| 4 | 30.0000 | 27.7100 | 16.0000 | 285.0000 | 17.6300 |
| 5 | 40.0000 | 24.5100 | 20.5700 | 290.0000 | 20.7100 |
| 6 | 50.0000 | 20.5700 | 24.5100 | 295.0000 | 23.6800 |
| 7 | 60.0000 | 16.0000 | 27.7100 | 300.0000 | 26.5400 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Helios Ring 5 | | | | | |
| | | Radius: 39.0400 | Shift a in x axis: -0.1942 | | |
| 2 | 5.2940 | 64.4400 | 5.5490 | 272.6000 | 0.8770 |
| 3 | 10.5900 | 63.6700 | 11.0500 | 275.3000 | 3.0180 |
| 4 | 15.8800 | 62.4000 | 16.4600 | 277.9000 | 5.1530 |
| 5 | 21.1800 | 60.6300 | 21.7200 | 280.6000 | 7.2790 |
| 6 | 26.4700 | 58.3900 | 26.8100 | 283.2000 | 9.3900 |
| | | | | | |
| 35 | 180.0000 | -55.5800 | 0.0000 | 360.0000 | 45.0000 |
| 36 | 185.3000 | -55.3300 | -5.5490 | 2.6470 | 44.9500 |
| 37 | 190.6000 | -54.5600 | -11.0500 | 5.2940 | 44.8100 |
| 38 | 195.9000 | -53.2900 | -16.4600 | 7.9410 | 44.5700 |
| 39 | 201.2000 | -51.5200 | -21.7200 | 10.5900 | 44.2400 |
| | | | | | |
| 61 | 317.6000 | 49.0000 | -40.5200 | 68.8200 | 15.5800 |
| 62 | 322.9000 | 52.5500 | -36.2400 | 71.4700 | 13.5400 |
| 63 | 328.2000 | 55.6900 | -31.6600 | 74.1200 | 11.4800 |
| 64 | 333.5000 | 58.3900 | -26.8100 | 76.7600 | 9.3900 |
| 65 | 338.8000 | 60.6300 | -21.7200 | 79.4100 | 7.2790 |
| 66 | 344.1000 | 62.4000 | -16.4600 | 82.0600 | 5.1530 |
| 67 | 349.4000 | 63.6700 | -11.0500 | 84.7100 | 3.0180 |
| 68 | 354.7000 | 64.4400 | -5.5490 | 87.3500 | 0.8770 |

5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Dünya üzerinde herhangi bir coğrafi konum için bir yoğunlaştırıcı Güneş güç kule, CSP, sisteminin esas elemanı olan *heliostatın* tasarım hesaplamalarını yapan bir algoritma geliştirilmiş ve yazılım yapılmıştır. *Heliostat* tasarım ve hesaplamasında gerekli olan ve Dünyanın hareketini ifade eden denklemler astronomi ile ilgili kaynaklarından alınarak, bir *heliostatın* bir yıl boyunca her gün gündüz vakti maksimum Güneş gücünü toplayıp kuledeki ısı değiştiriciye-alıcıya yansıtacak biçimde değerlendirilmiştir. Öncelikle belirtmek gerekir ki *heliostat* tasarımı yılın seçilen uygun bir günü için yapılmalıdır. Hesaplamanın yapıldığı gün ve saat coğrafi konuma bağlı olarak değişirken de güç ve enerji hesaplamaları her gün gündüz vakti anlık yapılabilmektedir.

Heliostat tasarımı Fresnel ayna yönteminin değerlendirilmesiyle yapılmıştır. Fresnel aynanın temeli olan içbükey aynanın özelliği gereği, Güneş radyasyonunun gelme açısı değiştiğinde odaklama da değişecek, hatta sadece belirli bir gelme açısı için doğru odaklama yapacak, diğer açılarda odaklama yapmayacaktır. Dolayısıyla yapılan bir heliostatta aynaların odaklamayı sadece kuledeki ısı değiştiricide odaklamaları için Güneş izleyici mekanizma olması zorunludur.

Farklı coğrafi bölgeler için yapılan bütün hesaplamalarda güç ve enerji karşılaştırması yapabilmek için daha yılın bütün günlerinin ve günün her anının açık ve bulutsuz olduğu varsayılmıştır.

Bu tezde önce Kuzey yarımkürede Sahra Çölünden (Libya) itibaren kuzeye doğru Ankara, Kiev ve Moskova için sadece koordinat değişmesi dışında diğer parametreler aynı tutularak heliostat hesaplamaları yapılmıştır. Coğrafi konumlar dışında diğer bütün parametreler aynı tutularak örnek tasarımlar yapılmıştır. İlgili güç ve enerji değişim grafiklerinden görüldüğü üzere heliostatın topladığı anlık güç ve günlük enerjiler arasında Sahra Çölü dışında Moskovaya kadar olan enlem dairelerindeki coğrafi konumlarda bir miktar azalmakla birlikte ciddi farklar yoktur. Bunun nedeni aynaların Güneş izlemeleri sonunda günün her anında maksimum ölçüde güneş gücünü ısı değiştiricide toplamalarıdır.

Türkiye’de Karapınar kırsalı, çölleşme nedeniyle tarıma ve yerleşime uygun olmadığından, buna ek olarak yeterli Güneş aldığından ve Güneşlenme günün diğer bölgelere kıyasla fazlaca olduğundan Güneş enerji sistemleri için uygun

görülmektedir. Buna dayanarak son yıllarda yenilenebilir enerji tesislerinin Karapınarda yapılması bir politika haline gelmiştir.

Şekil 4.18 ve 4.19 Karapınarda farklı iki kule yüksekliği için yapılan hesaplamaların sonucunu vermektedir. Bu hesaplamalardan, yeteri yükseklikte kule ve yeteri büyüklükte arazi belirlenerek bir hayli yüksek güç elde edilebileceği açıktır.

Bunlara ek olarak aynı yüzey alanına sahip olan sabit yönelimli (yatayla 23°) fotovoltaik panelin aldığı Güneş gücü de karşılaştırma amacıyla hesaplamalara ilave edilmiştir.

Hesaplamalarda heliostat ve CSP sisteminin ve fotovoltaik Güneş panellerinin verimleri dikkate alınmamıştır. Fotovoltaik panelin verimi yaklaşık bilinmesine rağmen CSP sisteminin bir bütün olarak verimi sistemin diğer elemanlarına bağlı olduğundan önceden belirlenememektedir, ayrıca bu çalışmanın konusu dışındadır. Bu nedenle sadece Güneşten alınan güçler hesaplanmıştır.

Bölüm 2’de bu alanda yapılan çok sayıda çalışmada verilen CSP sistemler ile doğrudan bir karşılaştırma yapmak uygun görünmemektedir. Öncelikle dikkate alınması gereken husus bu çalışmada tasarlanan *heliostatın* henüz gerçekleşmemiş olmasıdır. Kaynaklarda raporlanan verimler ilk yapılan CSP sistemlerinde %5 iken son yapılmış tesislerde %30 değerine kadar artmıştır, ancak bu verimler arttırılmaz değildir. Kaynakların içinde Alvarez vd. (2007) inceledikleri birkaç CSP sisteminin verimlerini %21 ile %29 arasında raporlamışlardır. Gelişen modern teknolojilerle ısı değiştirici, yalıtımlı ısı aktarımı ve sıcak madde deposu ve kapasitesi, buhar çevrimi ile buhar türbini-jeneratör bileşenlerinin birleşik verimlerinin %30 değerinden fazla olması beklenmektedir. Uzun vadeli üretimlerde az bir artış, örneğin %1 oranındaki artış bu tür sistemlerde önemlidir, kamu ve özel teşebbüs için önemlidir.

Dünyada farklı ülkelerde son 20 yıldan bu yana CSP sistemleri inşa edilmiştir, ancak hala geliştirilmeye ihtiyaç vardır. Başta ABD, İspanya, Çin ve Hindistan bu sisteme yatırım yapmaktadırlar. Üretim güçleri ABD’de kurulu 500 MW güce kadar artmıştır, Tablo 1.4. Türkiye’de son yıllarda Mersinde 5 MW güçte bir CSP yapılmıştır. Ancak bu CSP hem gecikmiştir hem de gücü düşüktür. Diğer enerji üretim sistemleri yanında güçlü bir alternatif olarak CSP sisteminin de Türkiyede ve özellikle Karapınarda kurulması gereklidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

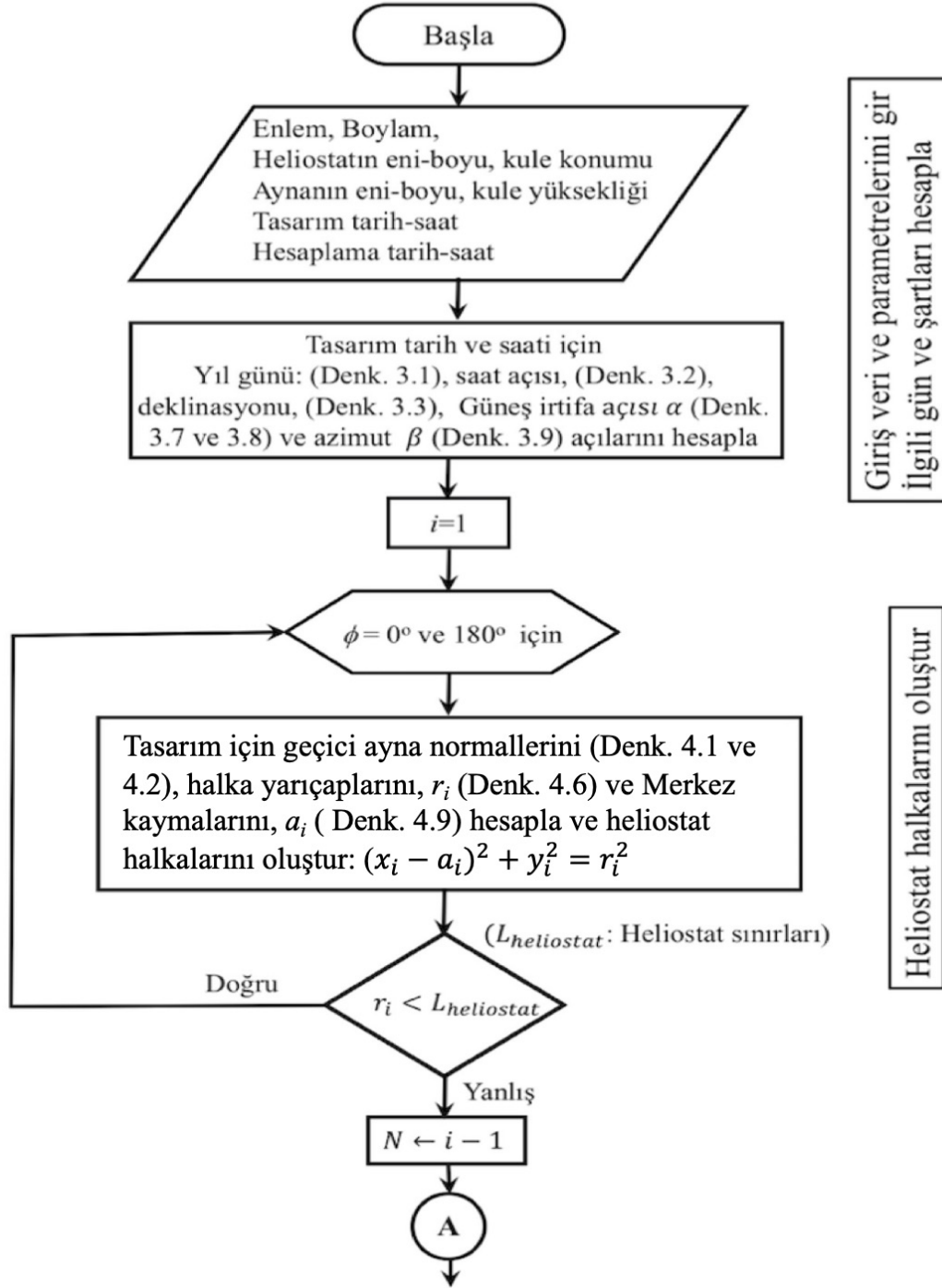
Bu tez çalışmasında bir Türkiye’de gerekli gördüğümüz fakat yaygın olmayan yoğunlaştırıcı Güneş Güç kulesi, Concentrated Solar Power), CSP), sisteminin en önde gelen elemanı olan *heliostat* tasarımının yapıldığı bir algoritma ve yazılım yapılmıştır. Bu yazılımla önce Dünya üzerinde, Kuzey ve Güney Yarımkürede herhangi bir coğrafyada belirlenen bir arazide, arazi boyutları, (yüzey alanı), kule yüksekliği, yıl günü ve zamanı, ayna sayısı gibi bazı girdilerle tasarım yapılabilmektedir. Programın (algoritmanın) çıktısı, arazi üzerinde her bir aynanın konumu, Güneşten gelen ve kule tepesindeki ısı değiştirici-alıcıda topladıkları anlık güç, günlük, aylık, yıllık enerji üretimleri yanında, her bir aynanın Güneş ileyici mekanizması için günün her saatinde gerekli yönelim açı değerleri alınmaktadır.

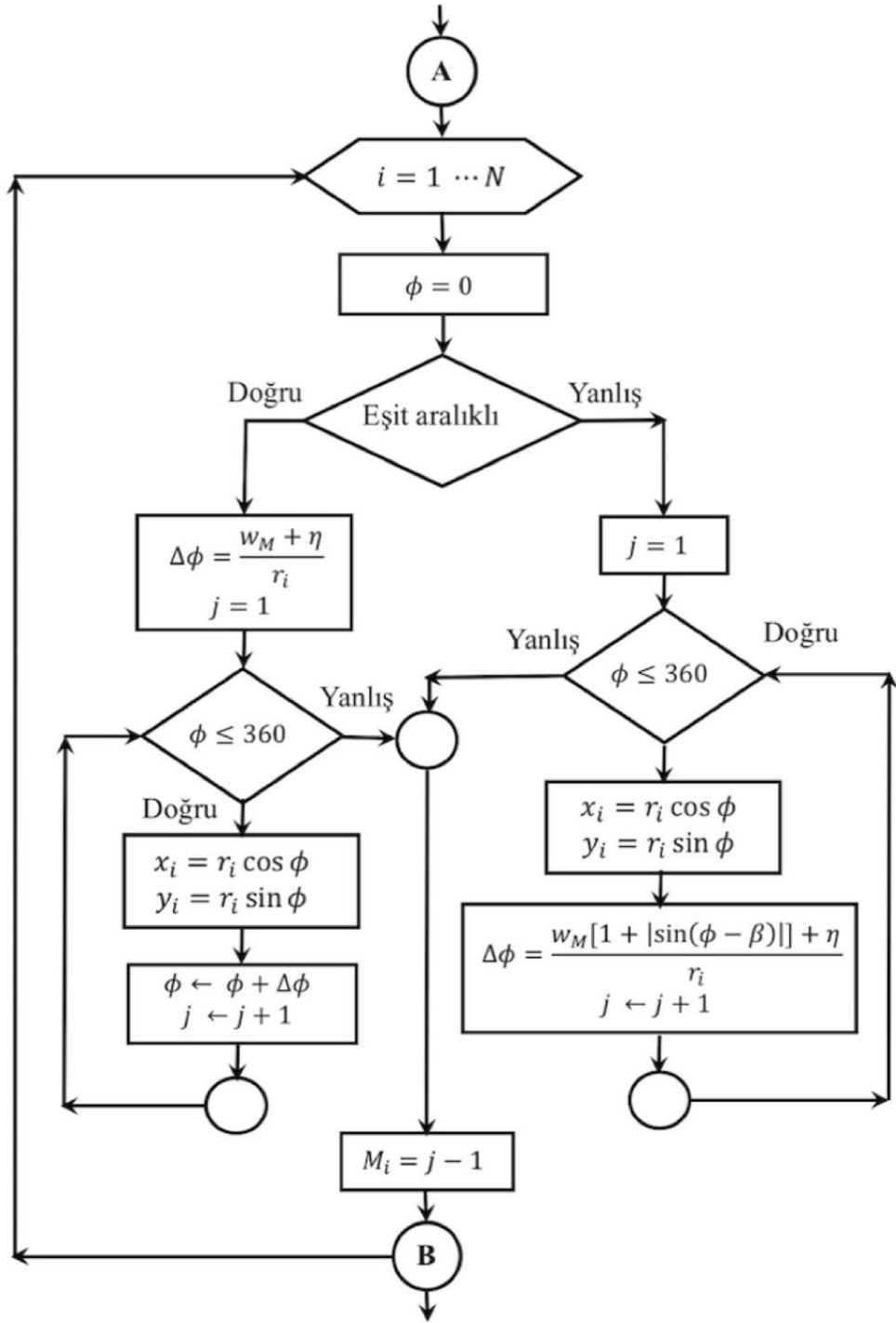
Bu çalışmanın bu alanda ve yöntemle ilk olduğundan elbette eksiklikler olacaktır ve bu eksikliklerin büyük kısmı heliostatın belirli oranda küçültülmüş modeli yapılarak bu model üzerinde gözlenerek gerekli düzeltmeler yapılabilir. CSP’nin diğer bileşenleri olan ısı değiştirici-alıcı, ısı transferinde kullanılacak uygun sıvı ve yalıtımlı ısı transfer sistemi ile ısı yalıtımlı sıcak ve soğuk sıvı deposu ve deponun kapasitesi ayrı çalışma gerektirmektedir. Buhar türbini-generatör çifti teknolojisi bilindiğinden ve standartlaştığından yapılan CSP sistemine uygun ölçüde olanı seçilerek sisteme eklenebilir.

Algoritmada ve yazılımda görebildiğimiz fakat eklenemeyen önemli bir parametre, *heliostatın* kurulacağı arazinin rakımıdır. Bu parametre daha çok sistem yapılması sırasında ve belki de sonra dikkate alınacak ve sistemde modifikasyonlar yapılabilecektir. Güneşlenme ve bulutlanma süreleri sistemin kurulacağı coğrafi bölgenin iklim şartlarına bağlı olarak dikkate ayrıca alınmalıdır.

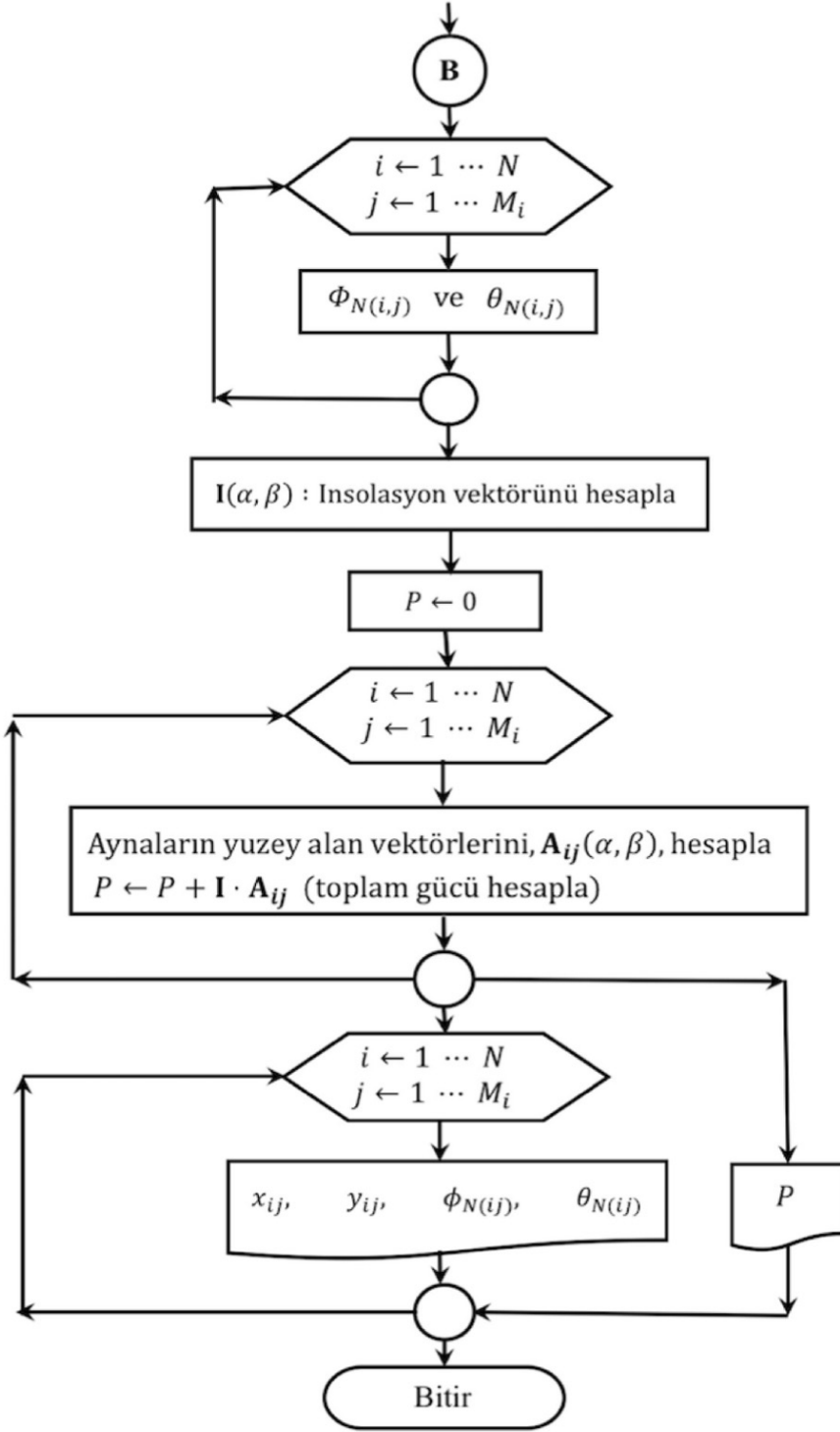
7. EK-A. BU TEZ ÇALIŞMASINDA GELİŞTİRİLEN ALGORİTMANIN AKIŞ DİYAGRAMI

(Sadiye Emel Karaoğlu, Ali Joma Nazari ve Recep TAPRAMAZ-danışman)





Heliostat halkalarında aynaları eşit aralıklı ya da Denk. 4.7 ile düzenle, (η : Tolerans)



Anlık Güneşin gelme açılarını, Denk. 3.8 ve Denk. 3.9 ile aynaların normallerinin açılarını, Denk. 4.1 ve 4.2 ile hesapla

Heliostatın aldığı ve kulede topladığı gücü, (Denk. 4.11) ile hesapla

Sonucu yaz

KAYNAKLAR

- Al-Kouz, W.; Nayfeh, J.; Boretti, A. (2020) Design of a parabolic trough concentrated solar power plant in Al-Khobar, Saudi Arabia, E3S web of Conferences 160, 02005. doi.org/10.1051/e3sconf/202016002005
- Al-Kouz, W.; Nayfeh, J.; Boretti, A. (2020) Design of a parabolic trough concentrated solar power plant in Al-Khobar, Saudi Arabia, E3S web of Conferences 160, 02005. doi.org/10.1051/e3sconf/202016002005
- Al-Kouz, W.; Nayfeh, J.; Boretti, A. (2020) Design of a parabolic trough concentrated solar power plant in Al-Khobar, Saudi Arabia, E3S web of Conferences 160, 02005. doi.org/10.1051/e3sconf/202016002005
- Alaphilippe, M.; Bonnet, S.; Stouffs, P. (2007) Low Power Thermodynamic Solar Energy Conversion: Coupling of a Parabolic Trough Concentrator and an Ericsson Engine, Int. J. Thermodynamics, 10(1) 37-45. dergipark.org.tr/en/download/article-file/65701
- Barlev, D.; Vidu, R., Stroeve, P. (2011) Innovation in concentrated solar power, Solar Energy Materials and Solar Cells 95(10) 2703-2725. doi.org/10.1016/j.solmat.2011.05.020
- Battleson, K. w. (1981) SOLAR POWER TOWER DESIGN GUIDE: Solar Thermal Central Receiver Power Systems, A Source of Electricity and/or Process Heat, Sansia National Lab. Livermore, California, US. doi.org/10.2172/6335255
- Benammar, S.; Khellaf, A., Mohammedi, K. (2014) Contribution to the modeling and simulation of solar power tower plants using energy analysis, Energy Conversion and Management, 78 923-930. doi.org/10.1016/j.enconman. 2013.08.066
- Boudaoud, S.; Khellaf, A.; Mohammedi, K.; Behar, O. (2015) Thermal performance prediction and sensitivity analysis for future deployment of molten salt cavity receiver solar power plants in Algeria, Energy Conversion and Management 89 655-664. dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.033
- Butti, K. ve Perlin J. (1980) A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology, Cheshire Books.
- Carballo, J. A.; Bonilla J.; Berenguel, M.; Fernandez,J.; Garcia, G. (2020) Solar tower power mockup for the assessment of advanced control techniques, Renewable Energy 149, 682-690. doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.075
- Chandra, L.; Dixit, A. (editörler) (2018) Concentrated Solar Thermal Energy Technologies Recent Trends and Applications (knferans bildiri kitabı), Springer Proceeding in Energy. doi.org/10.1007/978-981-10-4576-9
- Chen, R.; Rao, Z.; Liao, S. (2018) Determination of key parameters for sizing the heliostat field and thermal energy storage in solar tower power plants, Energy Conversion and Management 177 385-394.
- Collado, F.; Guallar, J. (2019) Quick design of regular heliostatfields for commercial solar tower power plants, Energy, 178 115-125. doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.117
- Giostri, A.; Binotti, M.; Sterpos, C.; Lozza, G. (2020) Small scale solar tower coupled with micro gas türbine, Renewable Energy 147, Part 1, 570-583. doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.013
- Heller, P. (editör), (2017) The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems, Analysis, Measurement and Assessment, Elsevier, Woodhead Publishing series in energy.

- Karttunen, H., Kröger P., Oja H., Routanen M., Donner K J. (editors) (2017) *Fundamental Astronomy* (sixth ed.) Springer.
- Leutz, R., Suzuki, A. (2001) *Nominating Fresnel Lenses, Design and Performance of Solar Concentrators*, Springer. doi 10.1007/978-3-540-45290-4
- Romero-Alvarez M.; Zarza E. (2007) *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy - Concentrating Solar thermal power*, Plataforma Solar de Almeria CIEMAT, Taylor & Francis LLC. Doi: 10.1201/b18947-47
- Sabonnadière J-C (editör) (2007) *Renewable Energies*, John Wiley and Sons
- Sabonnadiere, J-C. (editör) (2009) *Renewable Energy*, Wiley Iste
- Selbaş, R.; Yakut, A. K.; Şencan, A. (2003) Güneş Kulesi Modeli İle Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Bir Uygulama, pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 9(2) 179-184. www.journalagent.com/pajes/pdfs/PAJES_9_2_179_184.pdf
- Srilakshmi, G.; Ramaswamy, M. A.; Thirumalai, N. C. (2016) *Design of Solar Field and Performance Estimation of Solar Tower Plants*, Center for Study of Science, Technology and Policy (CSTEP) India, <https://www.seriius.org/pdfs/design-solar-tower-plants.pdf>
- Şen Z. (2008) *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy, Springer.
- Wei, X.; Lu Z.; Yu, W.; Zhang, H; Wang, Z. (2011) Tracking and ray tracing equations for the target-aligned heliostat for solar tower power plants, *Renewable Energy* 36(10) 2687-2693. doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.022
- Wei, X.; Lu, Z.; Lin, Z.; Zhang, H.; Ni, Z. (2008) Optimization procedure for design of heliostat field layout of a 1MWe solar tower, *Solid State Lightning and Solar Energy Technologies, Photonics Asia 2007*, Pekin, basılmış konferans bildirisi, 684119, /doi.org/10.1117/12.755285
- Wei, X.; Lu, Z.; Wang, Z.; Yu W.; Zhang, H.; Yao, Z. (2010) A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant, *Renewable Energy* 35(9) 1970-1975. doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.026
- Zhang, H. I.; Baeyens, J.; Degreve, J.; Caceres, G. (2013) Concentrated solar power plants: Review and design methodology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 466-481.
- Zhang, H. L.; Baeyens, J., Degreve, J; Caceres, G. (2013) Concentrated solar power plants: Review and design methodology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 466-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032>
- Zhou, Y.; Zhao, Y. (2014) Heliostat Field Layout Design for Solar Tower Power Plant Based on GPU, *IFAC proceedings Volumes* 47(3) 4953-4958. doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01581
- Zhu G. (2013) Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors, *Solar Energy* 94 240-252. DOI: 10.1016/j.solener.2013.05.003
- Zhu, G. (2013) Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors, *Solar Energy* 94 240-252. doi: 10.1016/j.solener.2013.05.003

ÖZ GEÇMİŞ

Fotoğraf

Sadiye Emel Karaoğlu 22.05.1991 tarihinde Ağrı'da doğdu.. Konya Ereğli Atatürk Lisesini bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümün'den 2014 yılında derece alarak mezun oldu. Mezuniyetinden bu yana eğitim kurumlarında, kurum müdürü olarak görev yapan Emel, orta derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

E mail : emel.karaoglu@hotmail.com

Telefon :05523478591

ORCID NO: 0000-0001-9675-7339

Yayınlanmış Çalışmalar:

- 1. Simple Heliostat Design for Central Concentrated Solar Power System,** Hezarfen Uluslararası Fen, Matematik ve Mühendislik Bilimleri Kongresi 25-26 Eylül 2020, sayfa 128-137 Antalya Türkiye