

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ KULE SİSTEMİNDE ÜRETİLEN ISI
ENERJİSİNİN YÜKSEK SICAKLIK DEPOLAMA
SİSTEMİNDE MODELLENMESİ

Onur EROL

Ekim, 2022
İZMİR

GÜNEŞ KULE SİSTEMİNDE ÜRETİLEN ISI ENERJİSİNİN YÜKSEK SICAKLIK DEPOLAMA SİSTEMİNDE MODELLENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Onur EROL

Ekim, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ONUR EROL, tarafından **PROF. DR.EVREN MELTEM TOYGAR** yönetiminde hazırlanan “**GÜNEŞ KULE SİSTEMİNDE ÜRETİLEN ISI ENERJİSİNİN YÜKSEK SICAKLIK DEPOLAMA SİSTEMİNDE MODELLENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Evren Meltem TOYGAR

Prof. Dr. Binnur GÖREN KIRAL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hatice Seçil ARTEM

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecinde bana her zaman destek olan, yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Evren Meltem TOYGAR' a sonsuz teşekkürlerimi iletiyor, akademik ve sosyal hayatında başarılarının devamını diliyor ve gelecek zaman içerisinde çalışmalarımızın devam etmesini umuyorum.

Ayrıca projenin araştırma, geliştirme ve tasarım aşamasında değerli fikirlerini bizimle paylaşan ve bize yol gösteren saygıdeğer Yüksek Mühendis Tufan BAYRAM'a ve projeyi destekleyen TÜBİTAK kurumuna sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen ve çalışmamı başarılı tamamlamam için mütevazı davranan BALYEM firması çalışanlarına özellikle Süreyya DİREK' e teşekkürlerimi iletiyorum.

Her zaman yanımda olan ve kararlarımı destekleyen aileme sevgilerimi iletiyor ve sonsuz teşekkür ediyorum.

Onur EROL

GÜNEŞ KULE SİSTEMİNDE ÜRETİLEN ISI ENERJİSİNİN YÜKSEK SICAKLIK DEPOLAMA SİSTEMİNDE MODELLENMESİ

ÖZ

CSP (Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi) sistemi ile maliyet açısından uygun bir sistem geliştirerek yüksek ısı elde etmek, bu ısının verimli olarak depolanması, CSP'nin diğer enerji teknolojileriyle entegre edilerek, ısıtmada kullanıldığında ne kadar verimli olduğunun doğrulanması literatürdeki çalışmaların doğrultusunda amaçlanmaktadır. CSP ayna sisteminin prensibi, dünyada parabol aynalarda olduğu gibi gelen güneş ışınlarını odaklayarak yüksek ısı elde etmektir. İki eksen üzerinden güneşi bilgisayar ile otomatik olarak dik takip etmek suretiyle odaklama yüzeyinde yüksek sıcaklıklara ulaşılabilmektedir. Doğal kaynak olan güneş ışığını belirli bir hedef noktasına iki eksende hareket imkanı sağlayarak yansıtan sistemler heliostat olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada 6 metre ve 3 metre çaplarında iki farklı heliostat tasarlanmıştır. Tasarlanan heliostatlar özgün olmakla birlikte maliyet ve bulunabilirlik açısından tercih edilebilir durumdadır. Heliostatların bir güneş kule sistemi ve ısı deposuyla entegre edilerek çalışması sağlanacaktır. Yüksek sıcaklıklı termal depolama ile ilgili açık literatürde enerji sistemlerine yönelik araştırma yapılmış bu kavramların sınıflandırılmasına odaklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu sistemleri simüle etmek için kullanılan fiziksel modellerin gözden geçirilmesi, tasarlanması ve modellenmesi ile bilgisayar destekli analiz yöntemine başvurmak için hazırlık yapılmıştır. Ayrıca analitik metotlarla yapılacak çalışma ve araştırmalar literatürde yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırılarak geliştirilecek sistemin kritizesi yapılmıştır. Solidworks katı modelleme programı ve analizler için Ansys programı kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, güneş kule sistemi, heliostat, ısı depolama sistemi

MODELING OF THE HEAT ENERGY PRODUCED IN THE SOLAR TOWER SYSTEM IN THE HIGH TEMPERATURE STORAGE SYSTEM

ABSTRACT

It is aimed to obtain high heat by developing a cost-effective system with the CSP (Concentrated Solar Energy) system, to store this heat efficiently, to verify how efficient CSP is when used in heating by integrating it with other energy technologies, in line with the studies in the literature. The principle of the CSP mirror system is to obtain high heat by focusing the incoming sun rays, as in parabola mirrors in the world. High temperatures can be reached on the focusing surface by automatically following the sun vertically on two axes with the computer. Systems that reflect sunlight, which is a natural source, to a certain target point by providing movement in two axes, are defined as heliostats. In this study, two different heliostats with diameters of 6 meters and 3 meters were designed. As well as the designed heliostats are original, they are preferable in terms of cost and availability. Heliostats will be integrated with a solar tower system and heat storage. In the open literature on high temperature thermal storage, research on energy systems has been made and studies focused on the classification of these concepts have been carried out. Preparations have been made to review, design, and model the physical models used to simulate these systems, and to resort to computer-aided analysis. In addition, the studies and researches to be done with analytical methods were compared with the studies in the literature and the system to be developed was critiqued. Solidworks solid modeling program and Ansys program were used for analysis.

Keywords: Concentrated solar power, solar tower system, heliostat, heat storage system

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
1.1 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) Giriş.....	1
1.1.1 Güneş Termik Güç Tesisi.....	2
1.1.2 CSP Tesisleri İçin Termal Enerji Sistemleri.....	3
1.2 Güneş Kule Sistemi ve Heliostat Çalışmaları.....	5
1.2.1 Heliostat Opsiyonel Tasarımlar.....	6
1.2.2 Heliostat Bileşenleri.....	8
1.2.3 Heliostat Alanı.....	10
1.2.4 Yansıtıcı Modül.....	11
1.2.5 Yapı.....	12
1.2.6 Eğim.....	14
1.3 Termal Enerji Depolama ve Depolama Malzemeleri.....	15
1.3.1 Ticari Kullanımda Erimiş Tuzlar.....	16
1.3.2 Tankların Yapısı.....	17

BÖLÜM İKİ-MATERYAL METOT.....19

2.1	Güneş Kulesi ve Heliostat.....	19
2.2	Güneş Kule Sistemi Çalışma Prensibi.....	20
2.3	Heliostat Sistemleri.....	21
2.3.1	Takip ve Tahrik Sistemi.....	22
2.3.1.1	Güneş Açısı.....	23
2.3.1.2	Heliostat Açısı.....	25
2.3.1.3	Hareket Hızları.....	26
2.3.1.4	Motor Torku.....	27
2.3.2	İskelet Sistemi.....	29
2.3.3	Yansıtıcı.....	30
2.3.4	Kontrol Sistemi.....	30
2.3.4.1	Kalibrasyon	31
2.3.4.2	Optik Sensör.....	32
2.3.4.3	Heliostat Alan Kntrolü.....	33
2.4	Güneş Alıcısı.....	34

BÖLÜM ÜÇ-HELİOSTAT-KULE TASARIMI VE ANALİZLER.....35

3.1	Referans Alınan Tasarım.....	35
3.2	Sistemin Çalışma Prensibi.....	36
3.3	Heliostat Tasarımı.....	36
3.3.1	Tahrik Sistemi.....	37
3.3.1.1	Hidrolik Piston İle Tahrik	37
3.3.1.2	Vidalı Mil İle Tahrik.....	38
3.3.1.3	Mikro Step Motor.....	39
3.3.1.4	Servo Motor.....	40
3.3.1.4.1	Motor Tork Hesabı.....	40
3.3.1.5	Redüktör.....	42
3.3.2	Kontrol ve Takip Sistemi.....	43

3.3.2.1	Encoder.....	43
3.3.2.2	Solarux Yazılım.....	44
3.3.2.3	Sensörler.....	45
3.3.2.3.1	Yatay Açık Sensörü.....	45
3.3.2.3.2	Dikey Açık sensörü.....	46
3.3.3	Destek Yapısı.....	46
3.3.4	Ayna ve Çanak Tasarımı.....	54
3.3.4.1	Çanak Yapısı Montajı.....	54
3.3.4.2	Heliostat Ayna Tutucu Montajı Alt Elemanı.....	55
3.3.4.3	Heliostat Ayna Tutucu Ara Çember, Üst ve Alt Disk Elemanları.....	58
3.3.4.4	Ayna.....	60
3.3.5	6 metre ve 3 Metre Heliostatların Tasarım Resimleri.....	62
3.4	Kule Tasarımı.....	70
3.5	Analiz.....	72
3.5.1	Alt Destek Montajı.....	72
3.5.1.1	Rüzgar Kuvveti.....	73
3.5.1.2	Mil Kuvveti.....	73
3.5.1.3	Alt Montaja Gelen Kuvvetlerin İndirgenmesi ve Analiz Yapılması...74	
3.5.2	Üst Destek Montajı.....	76
3.5.3	Vidalı Mil Burkulma Analizi.....	77
3.6	Yerleşim Planı.....	81
3.7	Maliyet Araştırması.....	81

BÖLÜM DÖRT-SONUÇ.....83

KAYNAKLAR.....85

EKLER.....89

EK 1: Motor Kataloğu.....89

EK 2: Redüktör Kataloğu.....89

EK 3: Motor Tork Hesabı(MATLAB Kodu).....	90
---	----



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Genel kabul görmüş CSP teknolojisi türleri.....	2
Şekil 1.2 İki tanklı güneş kule sistemi.....	3
Şekil 1.3 CSP tesisleri için TES sistemlerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.4 CSP tesislerinde TES entegrasyonu için erimiş tuz iki tanklı doğrudan konsept.....	4
Şekil 1.5 CSP tesislerinde TES entegrasyonu için buhar akümülatör konsepti.....	5
Şekil 1.6 a) Yönlü cam/metal heliostat , b) Metal membran heliostat.....	5
Şekil 1.7 Büyük boyutlu tipik eleman örnekleri.....	10
Şekil 1.8 a) Gerilimli membran heliostat (PSA) , b) Cam metal heliostat.....	12
Şekil 1.9 Kaide ve çerçeve tertibatlı heliostat.....	13
Şekil 1.10 Küçük heliostatlar için düşük maliyetli destek yapısı.....	14
Şekil 1.11 Hedefteki heliostat görüntüsünün eğimden önceki (solda) ve sonraki (sağda) simülasyonu.....	15
Şekil 1.12 İki tanklı bir termal depolama sistemine sahip güneş enerjisi santralinin şematik çizimi.....	16
Şekil 1.13 CSP uygulamaları için bir termal depolama tankının temel şematik modeli.....	18
Şekil 2.1 Bir s-CO ₂ -Brayton güç döngüsü ile entegre olmak için daha yüksek tuz sıcaklıkları kullanan doğrudan depolamaya sahip Gen3 CSP erimiş tuz güç kulesi.....	21
Şekil 2.2 Basit heliostat gösterimi.....	22
Şekil 2.3 İzleme sistemi temel bileşenleri.....	23
Şekil 2.4 İlgili koordinat sistemine göre güneş konumu.....	23
Şekil 2.5 Takip sistemi açıları.....	24

Şekil 2.6 3 Güneş-güneş kulesi-heliostat arasındaki açı ilişkileri.....	26
Şekil 2.7 TRCPE/TRCPA-gün zaman grafiği.....	27
Şekil 2.8 Yükselme mekanizması diyagramı.....	28
Şekil 2.9 Azimut mekanizması diyagramı.....	29
Şekil 2.10 Heliostat düz ayna.....	30
Şekil 2.11 Heliostat görüntü merkezindeki görüntü işleme diziş.....	31
Şekil 2.12 Odak uzaklığı kalibrasyon hededine olan mesafenin yaklaşık üçte biri olan bir prototip heliostat için akı yoğunlukları.....	32
Şekil 2.13 Açık bir hacimsel alıcının ısınmasının simülasyonu	33
Şekil 2.14 Alıcı türleri.....	34
Şekil 3.1 Solarux CSP tasarım.....	35
Şekil 3.2 Örnek hidrolik piston.....	38
Şekil 3.3 Örnek vidalı mil.....	39
Şekil 3.4 Vidalı mil serbest cisim diyagramı.....	40
Şekil 3.5 Vidalı mil konum açılarının gösterimi.....	41
Şekil 3.6 Redüktör.....	43
Şekil 3.7 6 metre heliostat encoder montaj konumu.....	44
Şekil 3.8 İlk prototip solarux yazılımı.....	45
Şekil 3.9 3 metre heliostat disk tutucu.....	47
Şekil 3.10 6 metre heliostat disk tutucu 1ba.....	51
Şekil 3.11 6 metre heliostat ayak tutucu3a	51
Şekil 3.12 6 metre heliostat ayak tutucu	52
Şekil 3.13 6 metre heliostat ayak tutucu 4.....	52
Şekil 3.14 6 metre destek yapı montajı.....	53
Şekil 3.15 4 metre destek yapı montaj.....	53

Şekil 3.16 3 metre heliostat ayna tutucu 1A	55
Şekil 3.17 3 metre heliostat ayna tutucu 1B.....	56
Şekil 3.18 3 metre heliostat ayna tutucu 50m.....	57
Şekil 3.19 3 metre heliostat çanak ayna yapı montajı.....	31
Şekil 3.20 6 metre heliostat çanak ayna yapı montajı.....	57
Şekil 3.21 3 metre heliostat ayna tutucu alt disk.....	58
Şekil 3.22 3 metre heliostat ayna tutucu ara çember	59
Şekil 3.23 3 metre heliostat ayna tutucu üst disk.....	60
Şekil 3.24 3 metre heliostat ayna.....	61
Şekil 3.25 3 metre heliostat kertikli ayna.....	61
Şekil 3.26 3 metre heliostat aynasız montajı.....	62
Şekil 3.27 3 metre heliostat 90 derece konumu	63
Şekil 3.28 3 metre heliostat 45 derece konumu.....	63
Şekil 3.29 3 metre heliostat izometrik görünüş	64
Şekil 3.30 3 metre heliostat ayna tutucu eğim açısı.....	64
Şekil 3.31 3 metre heliostat ayna grubu montaj açısı gösterimi.....	65
Şekil 3.32 6 metre heliostat 90 derece konumu.....	65
Şekil 3.33 5 metre heliostat 45 derece konumu.....	66
Şekil 3.34 6 metre heliostat izometrik görünüş.....	66
Şekil 3.35 6 metre heliostat ayna tutucu eğim açısı.....	67
Şekil 3.36 6 metre heliostat ayna grubu montaj açısı gösterimi.....	67
Şekil 3.37 6 metre ve 3 metre heliostat 5 mm sac malzemeler dxf dosyası.....	67
Şekil 3.38 6 metre ve 3 metre heliostat 3 mm sac malzemeler dxf dosyası.....	68
Şekil 3.39 6 metre ve 3 metre heliostat 2 mm sac malzemeler dxf dosyası.....	69
Şekil 3.40 6 metre ve 3 metre heliostat 1.5 mm sac malzemeler dxf dosyası.....	69

Şekil 3.41 Kule tasarımı.....	71
Şekil 3.42 Üst montaj serbest cisim diyagramı.....	73
Şekil 3.43 Alt montaj serbest cisim diyagramı.....	74
Şekil 3.44 Heliostat alt montaj statik gerilme analizi.....	75
Şekil 3.45 Heliostat alt montaj statik deformasyon analizi.....	75
Şekil 3.46 Heliostat alt montaj yorulma analizi.....	75
Şekil 3.47 Heliostat üst montaj statik analizi.....	76
Şekil 3.48 Heliostat üst montaj deformasyon analizi.....	77
Şekil 3.49 Heliostat aynasının 90 derecedeki konumu.....	78
Şekil 3.50 Heliostat aynasının 35 derecedeki konumu.....	79
Şekil 3.51 Burkulma sınır şartları.....	79
Şekil 3.52 6 metre ve 3 metre heliostatların yerleşim planı.....	81

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Seçilmiş heliostat geliştirme programları 1970-2010.....	8
Tablo 1.2 Heliostat Bileşenleri.....	9
Tablo 1.3 Termal enerji depolaması için güneş tuzu kullanan operasyonel güneş enerjisi santralleri.....	17
Tablo 3.1 6 metre heliostat 1.5 mm kalınlık parça listesi.....	47
Tablo 3.2 6 metre heliostat 2 mm kalınlık parça listesi.....	47
Tablo 3.3 6 metre heliostat 4 mm kalınlık parça listesi.....	48
Tablo 3.4 6 metre heliostat 3 mm kalınlık parça listesi.....	48
Tablo 3.5 6 metre heliostat 5 mm kalınlık parça listesi.....	49
Tablo 3.6 6 metre heliostat mekanik malzemeler.....	49
Tablo 3.7 3 metre heliostat 1.5 mm kalınlık parça listesi.....	49
Tablo 3.8 3 metre heliostat 2 mm kalınlık parça listesi.....	49
Tablo 3.9 3 metre heliostat 3 mm kalınlık parça listesi.....	50
Tablo 3.10 3 metre heliostat 4 mm kalınlık parça listesi.....	50
Tablo 3.11 3 metre heliostat 5 mm kalınlık parça listesi.....	50
Tablo 3.12 3 metre heliostat mekanik malzemeler.....	50
Tablo 3.13 3 metre ve 6 metre heliostat maliyet tablosu.....	82

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

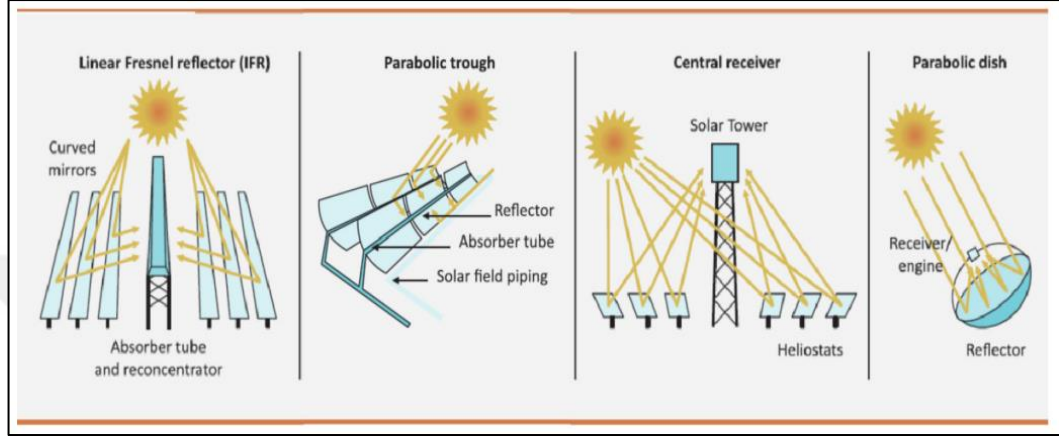
1.1 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) Giriş

Son yıllarda, yenilenebilir enerji çalışmaları ve pratik uygulamaları büyük ölçüde genişledi. Güneş enerjisi, enerji depolama sistemlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmaya ve kontrol etmeye yönelik uluslararası taahhütlerden en çok yararlanan teknolojilerden biridir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin (CSP) bir endüstri olarak gerçek doğuşu, 1980'lerde Kaliforniya'da, 354 MW-elektrik (MWe) kurulu güce sahip dokuz ayrı parabolik-oluk tabanlı 'Güneş Elektrik Üretim Sistemi'nin (SEGS) inşa edilmesiyle geldi. 1982'de ABD Enerji Bakanlığı, bir endüstri konsorsiyumu ile birlikte, 10 MW'lık bir merkezi alıcı tanıtım projesi olan Solar One'ı işletmeye başladı. Bu proje, elektrik üretmek için geleneksel bir türbini çalıştıran buhar üretmek için bir ısı transfer sıvısı kullanan güç kulesi sistemlerinin fizibilitesini ortaya koydu. 1996'da Solar Two, güneş parlamadığında bile elektrik üretmek için güneş enerjisinin nasıl verimli ve ekonomik bir şekilde depolanabileceğini gösterdi (Cabeza vd., 2019).

Güneş termik santralleri, ısı üretimi için enerji kaynağı olarak güneş radyasyonunu kullanır. Bu sistemler, güneşten gelen radyasyon enerjisini doğrusal alıcılara (örneğin parabolik oluklar) veya merkezi alıcılara (örneğin güneş kulesi) yoğunlaştırır. Emilen enerji bir güç bloğuna verilir veya buhar üretimine uygulanır (Cabeza, 2014).

Genel olarak kabul edilen dört CSP teknolojisi, Şekil 1.1'de kavramsal olarak gösterildiği gibi, bir alıcı üzerine yansıma yoluyla güneş ışığının yoğunlaştırılmasıyla karakterize edilir. Doğrusal Fresnel yansıtıcılar (LFR'ler) ve parabolik oluk toplayıcılar (PTC'ler), güneş ışığını doğrusal bir alıcı üzerinde yoğunlaştıran hat odaklı çözümlerdir. Tipik olarak yalıtım için havası boşaltılmış bir cam kapağa sahip çelik bir borudur. Bu teknolojilerin, özellikle teorik konsantrasyon oranıyla ilgili temel

sınırları vardır (Cabeza vd., 2010; Brent vd., 2017). Buna karşılık, merkezi alıcı ve parabolik çanak sistemleri, çok daha yüksek konsantrasyon oranlarına ulaşabilen ancak izleme doğruluğunda orantılı olarak daha fazla çaba gerektiren nokta odaklı çözümlerdir (Cabeza vd., 2019).



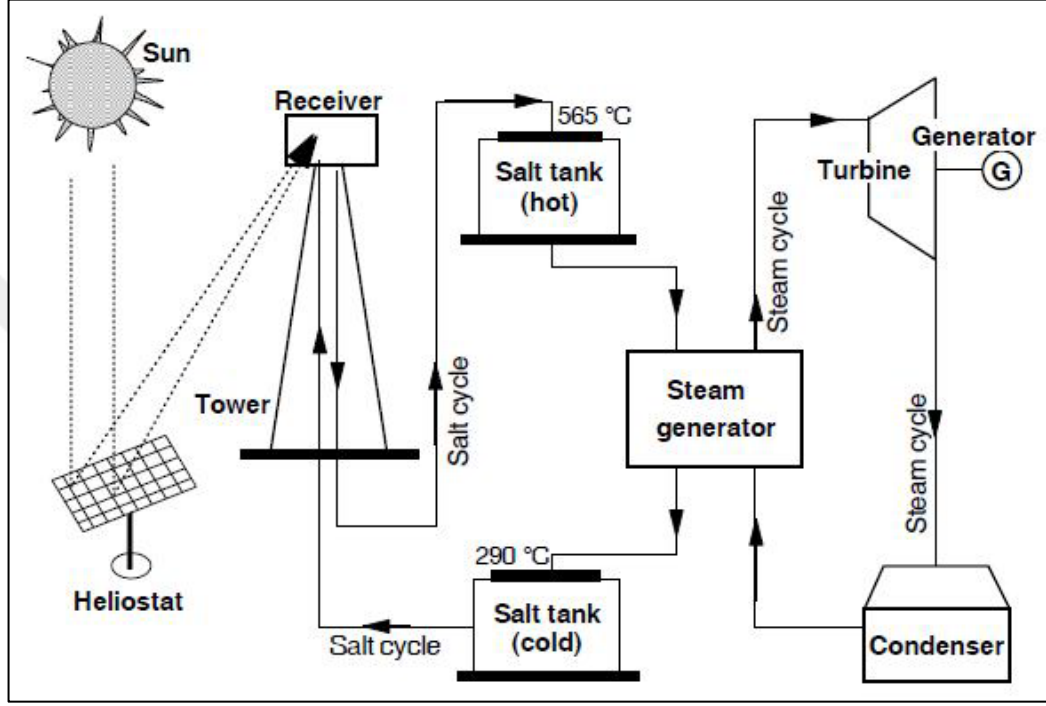
Şekil 1.1 Genel kabul görmüş CSP teknolojisi türleri (Cabeza vd., 2010)

1.1.1 Güneş Termik Güç Tesisi

Güneş termik santrali, ilk olarak güneş ışınımını ısıya dönüştüren enerji santrallerinden oluşur. Ortaya çıkan termal enerji, daha sonra bir termal motor tarafından mekanik enerjiye dönüştürülür ve daha sonra elektriğe dönüştürülür. Termodinamik nedenlerle, en yüksek verimi elde etmek için yüksek sıcaklıklar gereklidir. Bu tür yüksek sıcaklıklara, bir kollektör üzerine gelen güneş ışınımının enerji akı yoğunluğunun artırılmasıyla ulaşılır. Alternatif olarak, genel sistemin teknik/ekonomik optimizasyonu ile ilgili olarak, bazı durumlarda önemli ölçüde azaltılmış maliyetlerle sonuçlanan daha düşük sıcaklıklar da istenebilir (geniş yüzeyli uygun maliyetli kollektörlerin kullanımı) (Hiyama ve Syafaruddin, 2010).

Şekil 1.2’de örnek olarak gösterilen güneş kule sisteminin çalışma prensibi şu şekilde tanımlanmıştır. Tuz, "soğuk" bir tuz deposundan kuleye pompalanır ve oradan yansıyan güneş radyasyonu ile ısıtıldığı alıcıya aktarılır.

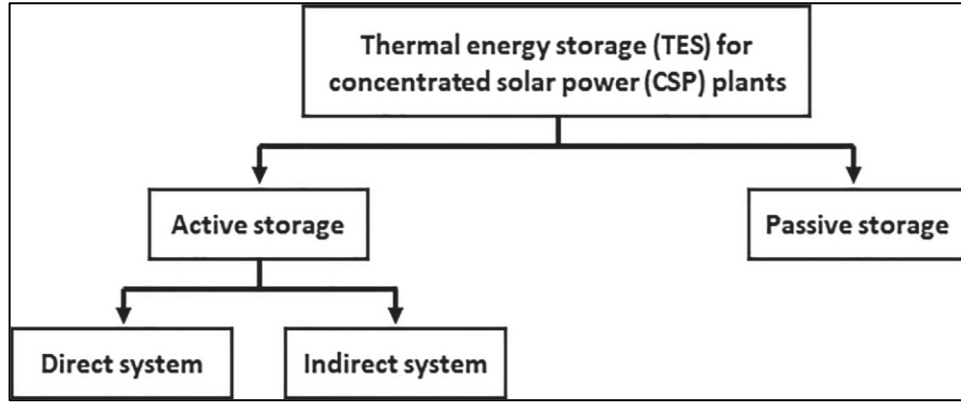
Daha sonra "sıcak" tanka ulaşır. Sıcak tuz ve dolayısıyla enerji, gerektiğinde depolama tesisinden alınır ve geleneksel bir buhar türbini çevrimi için buhar üreten bir buhar jeneratöründen pompalanır (Hiyama ve Syafaruddin, 2010).



Şekil 1.2 İki tanklı güneş kule sistemi (Hiyama ve Syafaruddin, 2010)

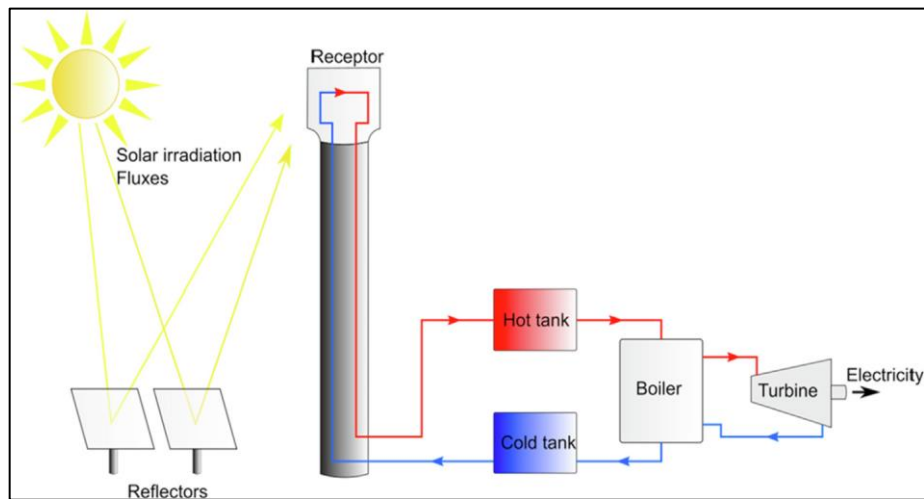
1.1.2 CSP Tesisleri İçin Termal Enerji Sistemleri

CSP tesisleri için TES çözümleri, aktif veya pasif sistemler olarak sınıflandırılabilir. Depolama ortamı bir sıvı olduğunda ve depolama tankları arasında akabildiğinde, sistem aktif tip olarak adlandırılır. Depolama ortamı HTF olarak da kullanılıyorsa, sistem doğrudan aktif olarak adlandırılır. Depolama ortamı ve HTF farklı olduğunda ek bir ısı eşanjörüne ihtiyaç duyulur ve ünite dolaylı aktif tip olarak adlandırılır. Depolama ortamı katı olduğunda, HTF yalnızca şarj ve boşaltma için depolama malzemesinden geçer. Böyle bir sisteme pasif tip denir. Şekil 1.3, aktif ve pasif depolama sistemleri olarak sınıflandırılan TES konfigürasyonlarının çeşitli örneklerini göstermektedir (Cabeza vd., 2019).

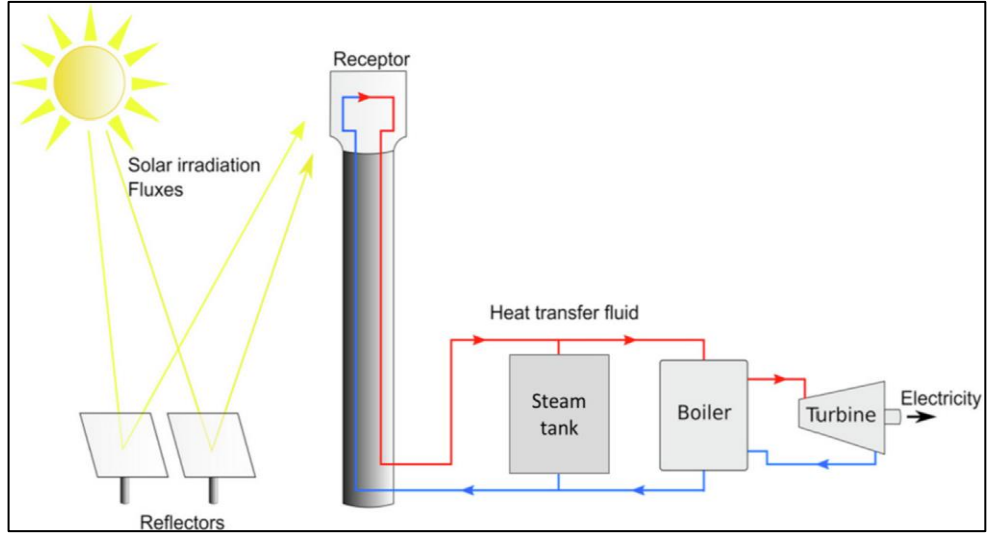


Şekil 1.3 CSP tesisleri için TES sistemlerinin sınıflandırılması (Cabeza vd., 2010)

Erimiş tuz iki tanklı doğrudan sistem, erimiş tuzun HTF'nin bulutlu dönemlerde veya gecelerde kullanılmak üzere doğrudan bir sıcak tankta depolandığı depolamadan oluşur. Soğutulan HTF, pompalanmadan ve tekrar ısıtılmadan önce diğer (soğuk) tanka pompalanır. Bu konfigürasyon, maliyetli ısı eşanjörlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Şekil 1.4, aktif doğrudan erimiş tuz TES sistemine sahip tipik bir güneş enerjisi santrali için proses akışını şematik olarak göstermektedir. Buhar akümülatörleri, türbini çalıştırmak için daha sonra serbest bırakılmak üzere alıcı tarafından üretilen fazla buharı biriktirerek depolama sağlayabilen basınçlı kaplardır. Şekil 1.5, aktif bir doğrudan buhar biriktirme TES sistemine sahip bir buhar kulesi tesisi için proses akışını şematik olarak göstermektedir (Cabeza vd., 2019).



Şekil 1.4 CSP tesislerinde TES entegrasyonu için erimiş tuz iki tanklı doğrudan konsept (Fan, Luo, Pelay, Rood ve Stitou, 2017)



Şekil 1.5 CSP tesislerinde TES entegrasyonu için buhar akümülatör konsepti (Fan vd., 2017)

1.2 Güneş Kule Sistemi ve Heliostat Çalışmaları

Heliostatlar, gelen güneş ışığının gün boyunca belirli bir hedef noktaya yansımısını sağlayan iki eksenli takip sistemi ile donatılmış yansıtıcı yüzeylerdir. Heliostatlar genellikle kavisli bir yüzey veya kısmi alanların uygun bir şekilde yönlendirilmesi yoluyla güneş ışığını yoğunlaştırır, böylece radyasyon akışı yoğunluğu artar (Hiyama ve Syafaruddin, 2010).



(a)



(b)

Şekil 1.6 a) Yönlü cam/metal heliostat , b) metal membran heliostat (Hiyama ve Syafaruddin, 2010)

Heliostat güneş takibi genellikle, heliostat konumlandırmasını çözmek için yerel bir kontrol ve hedefleme stratejisini atamak için bir merkezi kontrol içeren dağıtılmış bir kontrol sistemi olarak uygulanır. Genellikle yerel kontrole dahil edilen işlemci veya mikro bilgisayara, heliostatın dünyadaki konumunun enlem ve boylamı ile saat ve tarih verilir. Bunlardan güneş konumu denklemlerini kullanarak, aynadan görüldüğü gibi güneşin yönünü hesaplar. Örneğin pusula yönü ve yükseklik açısı. Ardından, hedefin yönü verildiğinde, bilgisayar gerekli açortayın yönünü hesaplar ve motorlara, genellikle step motorlara kontrol sinyalleri gönderir, böylece heliostatın yansıtıcı yüzeyini doğru hizaya getirirler. Bu işlem dizisi, aynanın doğru şekilde yönlendirilmesini sağlamak için sık sık tekrarlanır (Bonanos vd., 2014).

Heliostat yapısı ve temeli, 20 ila 30 yıl arasında tahmin edilen operasyonel ömrü boyunca ve tüm sıcaklık ve çevresel saha koşullarında kalıcı hasar olmadan herhangi bir çalışma koşulunda ortaya çıkabilecek herhangi bir yüke dayanmalıdır. Genellikle dayanacak yükler, tek tip rüzgar hızı için "alan-üç yarı yasası" olarak adlandırılan sözde uyarınca heliostat mekanik yapısı üzerinde momentler dayatan rüzgardan kaynaklanır. Ayrıca, yere daha yakın olan kısa heliostatlar için rüzgar hızları daha düşüktür. Bu nedenle, bu mekanik spesifikasyon, küçük boyutlu heliostatlarla daha kolay elde edilir. Böylece, heliostat boyutu arttıkça birim alan başına daha yüksek yükler, heliostatın yüke bağlı bileşenlerinin ağırlığını ve maliyetini artırır (Bonanos vd., 2014).

1.2.1 Heliostat Opsiyonel Tasarımlar

Genel sistem hususları dikkate alındığında, "heliostat" adı verilen bileşenin, merkezi bir alıcı sisteminin geri kalan temel bileşenlerinden oldukça bağımsız olduğu belirtilmelidir; yani, alıcı ısı taşıma sıvısının her türü, alıcı konfigürasyonu veya termal enerjinin son kullanım uygulaması için benzersiz heliostat tasarımları gerekli değildir. Ayrıca, farklı tasarımlar tek bir heliostat alanını paylaşarak birleştirilebilir. Bu bağımsızlık, kollektör sisteminin toplam sistem maliyetinin büyük bir bölümünü

temsil ettiğini kabul ederek, heliostatın birim maliyetini düşürmenin bir yolu olarak seri üretime vurgu yapılmasına izin verir (Bonanos vd., 2014).

Heliostat maliyeti, her bir bileşenden daha fazla kar alarak (örn. aynı sürücülerle daha büyük yansıtma alanlarını hareket ettirmek) veya özellikleri ve dolayısıyla bileşenlerin maliyetlerini azaltarak (örn. küçük heliostatlar üzerindeki yükler çok daha düşüktür, bu nedenle daha basit ve daha ucuz mekanik yapılara yol açar) düşürülebilir (Bonanos vd., 2014).

Son birkaç on yılda, heliostat tasarımlarında geleneksel cam ve çelik, kaide monteli yükseklik-azimut tasarımları kullanılmıştır, ancak alternatifler arasında “çeteli heliostatlar”, raylar üzerinde dönen heliostatlar, gerilmiş membran reflektörler, şişirilebilir (kabarcık) muhafazalar, paylaşılan destek vb. bulunur. Çeşitli örnekler Tablo 1.1’de listelenmiştir (Bonanos vd., 2014).

Tablo 1.1 Seçilmiş heliostat geliştirme programları 1970-2010 (Bonanos vd., 2014)

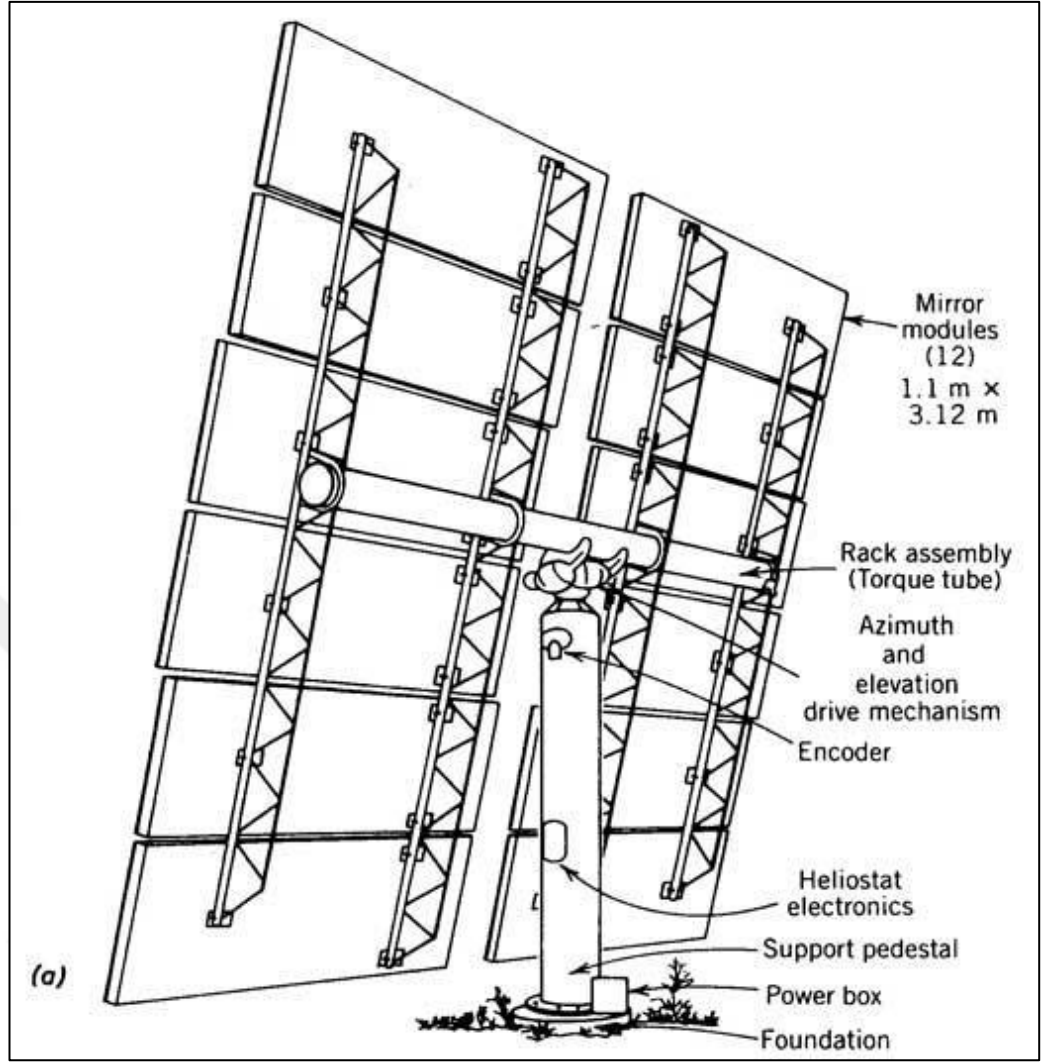
Year (approx.)	Program	Prime contractor or location	Size (m ²)
1970	Trombe Heliostats	France	45
1973-1974	National Science Foundation	University of Houston/McDonnell Douglas	13.4
1975-1977	Pilot plant	Boeing	48
	System Research	Martin Marietta	41
	Experiment	Honeywell	40
		University of Houston/McDonnell Douglas	31.4
		University of Houston/McDonnell Douglas	37.5
1977-1979	Central Receiver Test Facility (SNLA)	Martin Marietta	37.2
1978-1979	Pilot Plant Prototypes	Martin Marietta	39.9
		University of Houston/McDonnell Douglas	44.5
1979-1981	Second Generation Heliostat	Boeing	43.7
		Martin Marietta	57.4
		University of Houston/McDonnell Douglas	56.9
		Arco (Northrup)	57.8
1980-1981	Pilot Plant (Solar One)	Martin Marietta	39.9
1980's	CESA-1 (PSA-facility-Spain)	CASA	40
		ASINEL	65
		SENER	40
1981-1986	Large Area Heliostat	University of Houston/McDonnell Douglas	90
		Arco	95
		Arco	150
		Solar Power Eng. Co.	200
1984-1986	Stressed Membrane (SM)	Solar Kinetics Inc	150
		Science Applications	150
1990	Stressed Membrane (SM)	Science Applications International Corp.	100
mid-1990s	SM, but with glass	Solar 2/Spain	150
	GM-100	CIEMAT	105
mid-1990s	USISTF High Concentration Solar	University of Houston/McDonnell	9.2
	Central Receiver	Douglas/HiTek Services	
mid-1990s	ASM-150	Steinmüller (Germany)	150
1995-2000	Gher S.A. Hellas 01	Gher S.A. (Spain)	19.2
	Colon-Solar	Inabensa	70
	Sanlucar90	Inabensa	90
	Sanlucar90-Hydraulic drives	Inabensa	90
2006	Existing Amonix PV Tracker Converted to a Heliostat	APS (proposed)	320
2006-2007	PS-10 and PS-20 (Sanlucar 120)	Planta Solar (Abengoa, Spain)	121
2006-2008	Carpe Diem HelioCA 16	DLR	16
2006-2009	SHP (Australia)	DLR-Julich, Germany	8
2007	CSIRO (Australia)	CSIRO National Solar Energy Centre Solar Towers	4.5
2009	BrightSource	Solar Energy Development Center, Rotem, Negev, Israel	14.4
2010	eSolar Sierra SunTower	eSolar, Inc (Five 1 sq. meter)	5

1.2.2 Heliostat Bileşenleri

Heliostatlar, bunlarla sınırlı olmamak üzere mekanik yapı, temeller, aynalar, yüzeyler, izleme sistemi, kontrol sistemi ve her koşulda doğru performans ve çalışmayı sağlamak için gerekli tüm ilgili sabitlemeler, bileşenler ve altyapıdan oluşur (Şekil 1.7, Tablo 1.2). Tüm bu öğelerin çeşitli tasarım seçenekleri vardır. Ve son seçim, teknik özelliklerin ve maliyetlerin bir kombinasyonunu "optimize etmeyi" gerektirir (Bonanos vd., 2014).

Tablo 1.2 Heliostat Bileşenleri (Bonanos vd., 2014)

Heliostat Bileşeni	-	Alt elemanlar
Yansıtma modülü	-	Ayna modülü/yönleri
	-	Çerçeve / raf montajı
Temel	-	Temel / Zemin ankraji
Yapı	-	Destek yapısı
Sürüş mekanizması	-	Azimut ve yükseklik sürüşü
	-	Dişli kutusu
	-	Kablolama
Kontrol	-	Konum sensörü
	-	Güç sistemi ve heliostat saha kontrolörü ile arayüz
	-	Sürücü denetleyicisi
	-	Kablolama
	-	Heliostat yerel kontrolü için ana kontrol arayüzü elektroniği
	-	Zaman tabanı, bilgisayarlar, yazılım
Destek ekipmanı	-	Taşıma ekipmanı
	-	Bakım kamyonları ve ekipmanları
	-	Heliostat yıkama ekipmanı
	-	İşletim prosedürleri (ofset hata düzeltmeleri dahil, ...)
	-	Bakım Prosedürleri



Şekil 1.7 Büyük boyutlu tipik eleman örnekleri (Bonanos vd., 2014)

1.2.3 Heliostat Alanı

Bir heliostat alanının düzeni, teknik ve ekonomik optimizasyon ile belirlenir:

- Kuleye en yakın bulunan heliostatlar en düşük gölgelemeyi sunar,
- Kuzey yarımkürede kuzeye (veya güney yarımkürede güneye) yerleştirilen heliostatlar en düşük kosinüs kayıplarını gösterir,
- Bunun aksine, kulenin çok uzağına yerleştirilen heliostatlar, son derece hassas izleme gerektirir ve coğrafi konuma bağlı olarak, komşu heliostatlardan daha uzağına yerleştirilmelidir,

- Arazi maliyeti, takip ve yönlendirme hassasiyeti böylece alanın ekonomik boyutunu belirler (Hiyama ve Syafaruddin, 2010).

1.2.4 Yansıtıcı Modül

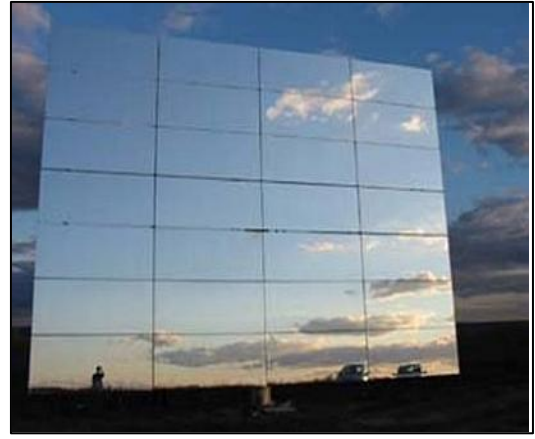
Bir heliostatın yansıtıcı modülü genellikle, yansıyan ışığı alıcı yüzey üzerinde yoğunlaştırmak için genellikle küresel bir modelde (eğimli) düzenlenmiş bir veya daha fazla aynadan (aynı zamanda yüzeyler olarak da adlandırılır) oluşur. Ek olarak, her ayna, yansıyan ışının konsantre olmasına yardımcı olmak için genellikle hafif içbükey bir biçimde monte edilir (bkz. Şekil 1.8). Ancak, inşaatı kolaylaştırmak için eSolar'ın kullandığı gibi düz aynalar da kullanılır. Yansıtıcı yüzeyin yüzeylere bölünmesi, yalnızca imalat sırasında teknik nedenlerle değil, aynı zamanda inşaat sırasında kullanımı kolaylaştırır ve daha büyük heliostatlar için eğrilik üzerinde daha kolay kontrol sağlar. Tipik yüzey boyutları 1 ile 10 m² arasındadır (Bonanos vd., 2014).

Modül, değişen rüzgar hızları ve ortam sıcaklığı gibi çok çeşitli çalışma koşulları altında doğru bir şekilde çalışmalıdır. İdeal bir reflektör aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır:

- Yüksek optik performans (örn. yansıma/geçirgenlik, aynasallık, geometrik konfigürasyon)
- Düşük özgül ağırlık
- Uzun Ömür ve Düşük Bakım Maliyetleri (Bonanos vd., 2014)



(a)



(b)

Şekil 1.8 a) Gerilimli membran heliostat (PSA) , b) Cam metal heliostat (Abengoa) (Bonanos vd., 2014)

1.2.5 Yapı

Birçok klasik heliostat için yapı yerden yüksekliği sağlayan kaide borusu ve yüzeylere sağlamlık kazandıran çerçeve montajı olmak üzere ikiye ayrılabilir (Bonanos vd., 2014).



Şekil 1.9 Kaide ve çerçeve tertibatlı heliostat (Kaynak: PSA) (Bonanos vd., 2014)

T tipi olarak da adlandırılan bu konfigürasyon (Şekil 1.9’ da gösterildiği gibi), en yaygın olarak orta veya büyük boyutlu heliostatlar için kullanılır. Kaide, yansıma modülü için gerekli yerden yüksekliği sağlar. Çerçeve düzeneği, ayna modülleri veya faset dizisini destekler. Modüller, yapıştırıcılar veya diğer mekanik tutturucular kullanılarak düzeneğe bağlanır. Her ayna modülü genellikle hafif bir içbükey eğriliğe sahiptir ve ayrıca yansıyan güneş ışığını alıcıya daha iyi odaklamak ve böylece performansı artırmak için destek yapısının düzlemine göre eğimlidir (hızalıdır). Genellikle bu yapı, birkaç çapraz kirişe sahip bir tork tüpünden oluşur. Ayna modülleri çapraz kirişlere takılıyken tork tüpü tahrik sistemine takılıdır. Kafes tipi kirişler, özellikle daha büyük heliostatlar için tercih edilen seçenektir, çünkü derinlikleri, gerekli sertliği sağlamak için çok az ağırlıkla değiştirilebilir. Bazı tasarımlarda

aynalara bağlanan kirişler, delikli preslenmiş metal plakalarla değiştirilir. Azimut/yükseltme dişlisi tahrik ünitesi, kaide ile tork borusu arasındaki bağlantıya kurulur. Tasarımın amacı, heliostat yapısına gerekli rijitliği vermek ve rüzgar yüklerinden kaynaklanan sapmaları en aza indirmektir. Büyük heliostat boyutları için bu, heliostat yapısının özgül ağırlığını, malzemesini ve maliyetini artıran ağır bir tork tüpü anlamına gelir. Daha küçük heliostatlarda, rüzgar ve diğer yükler çok daha küçüktür ve daha hafif bir çerçeve yapısının kullanılmasına izin verir. Örneğin, eSolar'ın heliostat tasarımı (bkz. Şekil 1.10) bu klasik yaklaşımlardan oldukça farklıdır. Pahalı temelden kaçınmak için birçok heliostat arasında paylaşılan bir zemin yapısına bağlı çok küçük bir kaideye sahiptir (Bonanos vd., 2014).

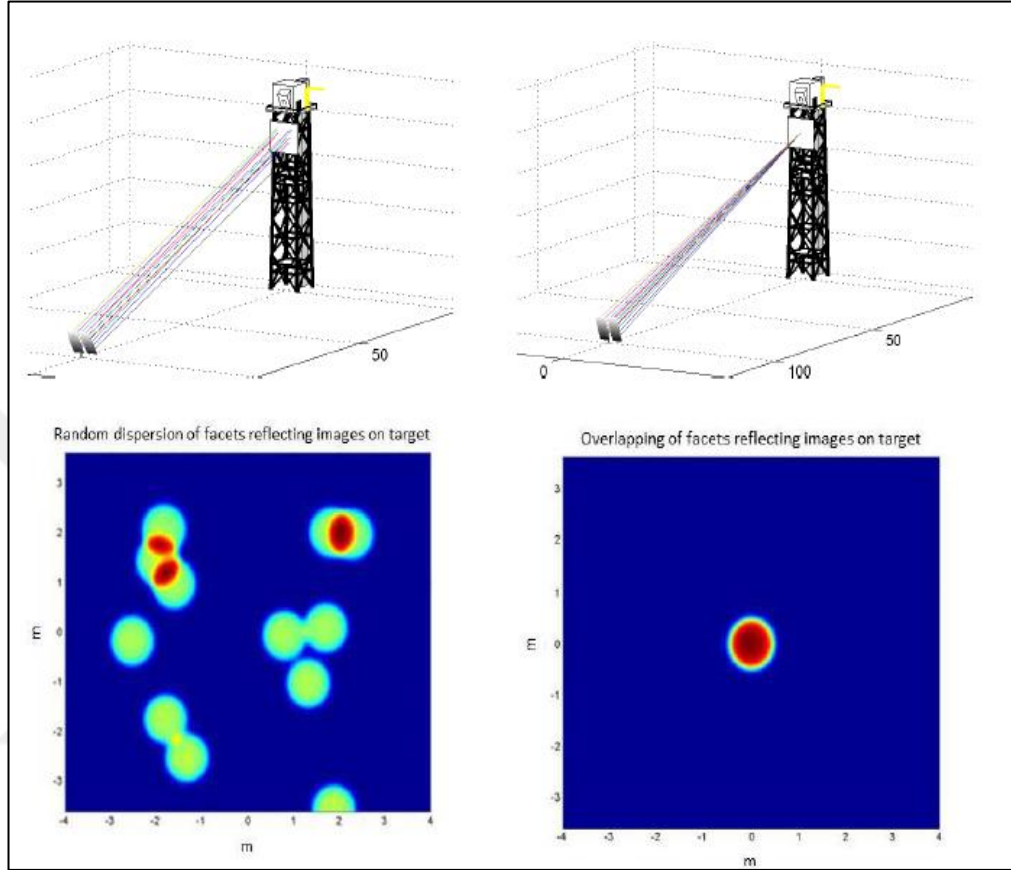


Şekil 1.10 Küçük heliostatlar için düşük maliyetli destek yapısı (Kaynak: eSolar) (Bonanos vd., 2014)

1.2.6 Eğim

Eğim terimi, bir heliostatın bireysel ayna yüzeylerinin destek yapısı üzerinde hizalanmasını ifade eder. Tek tek yüzeyler kavisli olsun ya da olmasın, eğme işlemi uygulanabilir ve belirli bir alandan elde edilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için

kullanılır (bkz. Şekil 1.1). Tek yönlü yapının küçük heliostatları için, yüzün eğriliği ve uygulanan eğim, sürekli eğimli bir yüzeye yol açar (Bonanos vd., 2014).

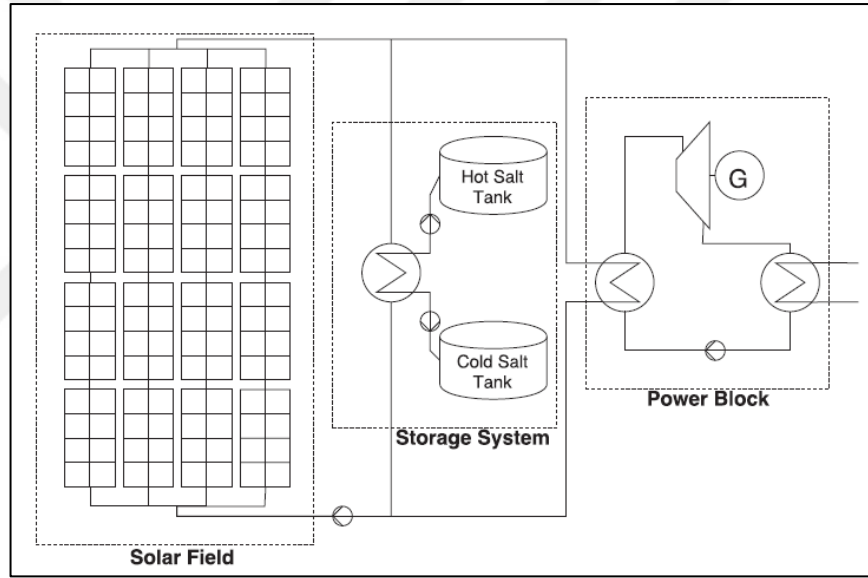


Şekil 1.11 Hedefteki heliostat görüntüsünün eğimden önceki (solda) ve sonraki (sağda) simülasyonu (Kaynak: [Monterreal2014]) (Bonanos vd., 2014)

1.3 Termal Enerji Depolama ve Depolama Malzemeleri

Bir enerji kaynağının rekabet gücü ve güvenilirliği, uygulanması için ana faktörlerden bazılarıdır. Termal depolama sistemleri (TES) bu konularda önemli bir rol oynar ve bulutlu dönemlerde ve geceleri ısı alışverişi için alternatif bir kaynak olarak güneş enerjisi santralleri ile entegre edilebilir ve radyasyondaki küçük dalgalanmaları azaltmaya yardımcı olur. Tesislerin yıllık kapasite faktörünü artırmanın yanı sıra büyüklüklerine bağlı olarak güneşten günde 24 saat enerjiye ulaşabilmektedir (Goswami vd., 2013).

Özellikle iki tanka duyarlı TES sistemlerinde depolama malzemesi olarak çoğunlukla nitrat tuzları kullanılmaktadır, bu teknoloji TES sistemleri arasında en yaygın teknoloji olan parabolik oluk teknolojisi ve merkezi kule ile güneş santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Andasol I, II ve III güneş enerjisi santralleri bu teknolojiyi kullanan santrallere örnektir. Bu sistem temel olarak, biri malzemeyi yüksek bir sıcaklıkta depolamak için (sıcak tank), diğeri ise malzemeyi daha düşük bir sıcaklıkta depolamak için (soğuk tank) olmak üzere iki depolama tankından oluşur (Şekil 1.12) (Günther vd., 2015).



Şekil 1.12 İki tanklı bir termal depolama sistemine sahip güneş enerjisi santralinin şematik çizimi (Cabeza, 2014)

1.3.1 Ticari Kullanımda Erimiş Tuzlar

CSP sistemleri için TES, çeşitli farklı ortamlar, teknolojiler ve boyutlar kullanır. Bu bölümde, TES için erimiş nitrat tuzlarını kullanan ticari güneş enerjisi santralleri ve teknolojileri, nitrat tuzu spesifikasyonlarının geliştirilmesine ilişkin tarihsel bir bakış açısıyla tartışılacaktır (Cabeza vd., 2019).

TES için nitrat tuzları kullanan ticari güneş santralleri (Tablo 1.3) iki ana toplama teknolojisi kullanır: parabolik oluklar ve güç kuleleri (merkezi güneş alıcıları olarak da adlandırılır). Parabolik oluklar, aynalar ve kolektör bire bir düzende üretildiğinden modüler yerleştirmeye uygundur. Sonuç olarak, lineer yoğunlaştırıcılar olarak hareket ederler ve maksimum 550 derece sıcaklık ile yaklaşık 100 güneş elde etme yeteneğine sahiptirler. Güç kuleleri, tek bir alıcı için büyük heliostat alanları gerektirir, çünkü güç kuleleri nokta yoğunlaştırıcılardır, ancak maksimum sıcaklıkları 2.638 °C'den yüksek olan 1.000'den fazla güneşe ulaşabilirler (Kaplan, 1985). Bir güç kulesinin daha yüksek çalışma sıcaklıkları tercih edilmesine rağmen, bunların yüksek sermaye maliyetleri engelleyici olmuştur, bu da daha düşük işletme sıcaklıklarına rağmen daha düşük sermaye maliyeti, modüler parabolik olukların daha yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur (Cabeza vd., 2019).

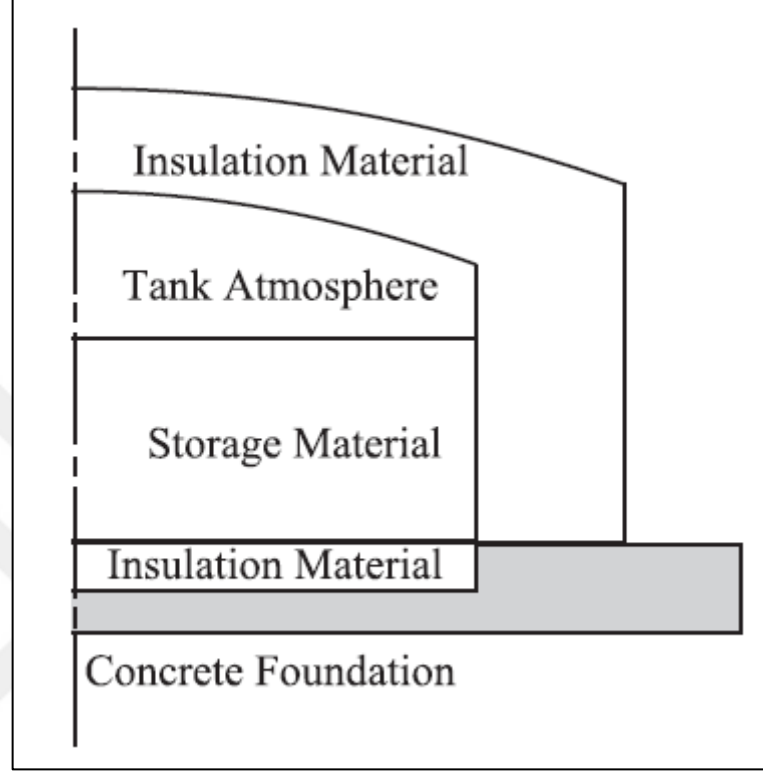
Tablo 1.3 Termal enerji depolaması için güneş tuzu kullanan operasyonel güneş enerjisi santralleri (Cabeza vd., 2019)

Plant	Technology	Temperature Range [°C]	Storage [Hours]	Turbine Capacity [MW]	Heat-Transfer Fluid
Gemasolar Therosolar Plant	Power tower	290–565	15	20	Solar salt
SunCan Dunhuang	Power tower	290–565	15	10	Solar salt
Crescent Dunes	Power tower	290–565	10	110	Solar salt
Andasol-1, 2, 3	Parabolic trough	293–393	7.5/plant	50/plant	Diphenyl/diphenyl oxide
Archimede	Parabolic trough	290–550	8	5	Solar salt
Arcosol 50	Parabolic trough	293–393	8	49.9	Diphenyl/diphenyl oxide
Arenales	Parabolic trough	293–393	7	50	Diphenyl/diphenyl oxide
Aste 1A/1B	Parabolic trough	293–393	8/plant	50/plant	Diphenyl/diphenyl oxide
Astexol II	Parabolic trough	293–393	8	50	Diphenyl/diphenyl oxide
Bokpoort	Parabolic trough	293–393	9.3	55	Diphenyl/diphenyl oxide
Casablanca	Parabolic trough	293–393	7.5	50	Diphenyl/diphenyl oxide
Extresol-1, 2, 3	Parabolic trough	293–393	7.5/plant	50/plant	Diphenyl/diphenyl oxide
KaXu Solar One	Parabolic trough	293–393	2.5	100	Diphenyl/diphenyl oxide
La Africana	Parabolic trough	293–393	7.5	50	Diphenyl/diphenyl oxide
La Dehesa	Parabolic trough	293–393	7.5	50	Diphenyl/diphenyl oxide
La Florida	Parabolic trough	293–393	7.5	50	Diphenyl/diphenyl oxide
Manchasol-1, 2	Parabolic trough	293–393	7.5/plant	50/plant	Diphenyl/diphenyl oxide
NOOR I	Parabolic trough	293–393	3	160	Diphenyl/diphenyl oxide
Solana Generating Station	Parabolic trough	293–393	6	280	Diphenyl/diphenyl oxide
Termesol 50	Parabolic trough	293–393	7.5	50	Diphenyl/diphenyl oxide
Termosol 1, 2	Parabolic trough	293–393	9/plant	50/plant	Diphenyl/diphenyl oxide
Xina Solar One	Parabolic trough	293–393	5.5	100	Diphenyl/diphenyl oxide

1.3.2 Tankların Yapıları

Tanklar genellikle yalıtım katmanları ve metal kaplama ile çevrelenen metalik silindir şeklinde yapılır. Bu tanklar beton, artan sıcaklıkla basınç dayanımını kaybettiğinden, genellikle ısı alışverişini desteklemek için içine kanallar yerleştirilmiş

beton temellere monte edilir. Şekil 1.13, CSP uygulamaları için tipik bir termal depolama tankını göstermektedir (Araujo ve Medina, 2018).



Şekil 1.13 CSP uygulamaları için bir termal depolama tankının temel şematik modeli (Araujo ve Medina, 2018)

BÖLÜM İKİ

MATERYAL VE METOT

2.1 Güneş Kulesi ve Heliostat

18.yy'da 1. Sanayi Devriminin başlamasından bu yana makinelerde güç ihtiyacı yeni talepler doğurmuştur. Mekanik sistemlerin güç ihtiyacı ilk olarak sonsuz bir ömre sahip olmayan kömürden su ve buhar elde edilmesiyle karşılanmıştır. Günümüzde ise Endüstri 4.0 ya da 4.Sanayi Devrimi sürecine gelinceye kadar birçok enerji kaynağı çeşitleri kullanılmıştır. Bunlar arasında güneş enerjisi çok fazla yatırım yapılan bir alandır. Güneş sonsuz bir enerji kaynağı olduğundan dolayı dünyada birçok farklı uygulama alanlarında güneş ışığından faydalanmak üzere sistemler geliştirilmektedir.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi güneşten gelen ışığı belli bir noktada toplayarak yüksek sıcaklık elde edilen sistemlerin genel adıdır. Kısaca CSP (Concentrated Solar Power) sistemleri diyebiliriz. Bölüm 1.1'de bahsedildiği gibi dünyada bu sistemin dört farklı türü vardır. Her sistemin amacı aynı olsa da kullandığı yöntem, maliyetler, uygulama alanları gibi vb. konularda farklılık göstermektedir. Bu çalışmada güneş kule sistemi üzerine odaklanılmış bu yönde çalışmalar yapılmıştır.

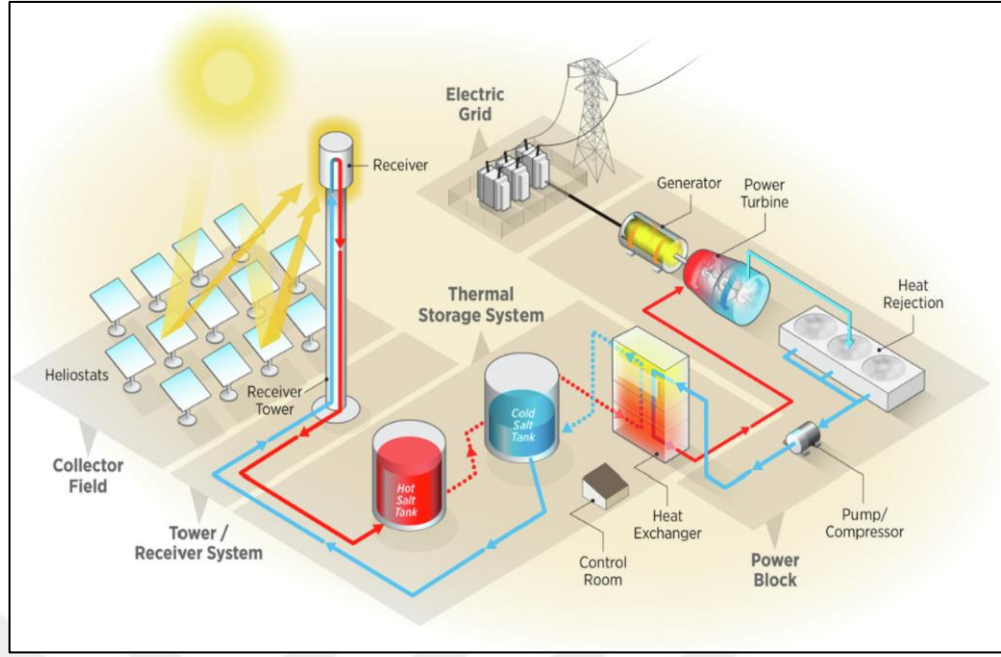
Bu tezde güneş kule sisteminin odaklanma elemanı olan heliostatlara yönelik çalışmalar yapılmıştır. Düzlemsel aynalar ile kurulumları yapılan ve güneş ışığını iki ekseninde takip ederek kule sistemine aktaran heliostat sistemleri incelenmiştir. Daha önce yapılan sistemler incelenerek heliostatların uygulama problemleri belirlenmiş ve bu problemlere çözüm aranmıştır. Bu problemlerden kısa şöyle bahsedebiliriz. Piyasada mevcut heliostatların yansıtma yüzeyi eğim açıları, heliostatın alandaki konumuna göre hesaplanır ve heliostat yansıtma yüzeyi hesap yapılan her konum için ayrı ayrı üretilir. Bu da her farklı eğimli heliostat yansıtma yüzeyi için farklı üretim kalıbı gerektirir. Bu yöntem ise maliyetleri artırır, zaman kaybına neden olur.

Çalışmamızda bahsi geçen problemler göz önünde bulundurularak modüler bir sistem üretme üzerine incelemeler yapılmış ve prototip bir sistem tasarlanmıştır.

2.2 Güneş Kule Sistemi Çalışma Prensibi

Güneş kule sistemi heliostat, kule ve termal bir depolama alanı sistemlerinden oluşur. Heliostatlar güneş ışığını yansıtma yüzeylerinde bulunan aynalar aracılığı ile alıcı kule üzerindeki odak bölgesine yansıtır. Heliostatın dünyadaki konumu, kuleye olan mesafesi ve ayna iç bükey eğrilik oranları gibi parametreler doğru şekilde yansıtma için önem arz etmektedir. Bu hesaplamalar sistemin kurulumunu yapacak olan Solarux tarafından geliştirilen bir algoritma ile aracılığı ile yapılacaktır. Termal depolama için seramik malzemesi ucuz olması, yüksek sıcaklıklara ulaşılabilmesi ve çevreye zarar vermemesi için tercih edilmiştir. Muhafaza malzemesi için çelik sac tercih edilmiştir.

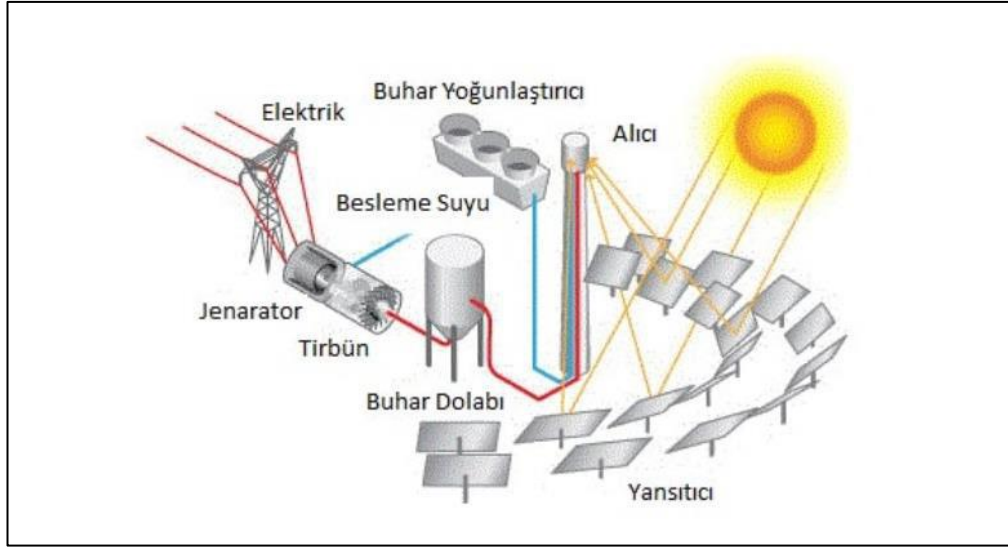
Yüksek termalden elektriğe dönüşüm verimliliği elde etmek ve yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimini azaltmak için Avrupa'dan (FP7 ve H2020 programları) ve ABD'den (SunShot Initiative) farklı girişimler başlatıldı. Bu girişimler, geleneksel elektrik enerjisi üretimi ile maliyet rekabet gücünü artıran yeni nesil CSP'ye odaklanıyor. Bir CSP tesisini bir süper kritik CO₂ (s-CO₂) Brayton güç çevrimi ile entegre ederek daha yüksek verimler elde edilebilir. Bu entegrasyonu başarmak için CSP'nin 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışması gerekir, bu da 550 °C -750 °C aralığında yüksek sıcaklıkta gelişmiş akışkanlar gerektirir (bkz. Şekil 2.1) (Cabeza vd., 2019).



Şekil 2.1 Bir s-CO₂-Brayton güç döngüsü ile entegre olmak için daha yüksek tuz sıcaklıkları kullanan doğrudan depolamaya sahip Gen3 CSP erimiş tuz güç kulesi (Andraka vd., 2017)

2.3 Heliostat Sistemleri

Heliostatlar (Yansıtıcı Ayna), güneşten gelen ve geniş bir alana yayılan ışınları güneş kulesi sisteminde bulunan alıcı üzerine, yüzeyinde bulunan aynalarla yoğunlaştıran sistemlerdir. Güneş ışınlarını, üzerinde bulunan takip kamerası ve bilgisayar kontrol sistemi sayesinde güneşin gün içerisinde değişen konumuna göre iki ekseninde hareket ederek kule üzerindeki alıcıya toplar. Heliostatın basit çalışma prensibi Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2017).

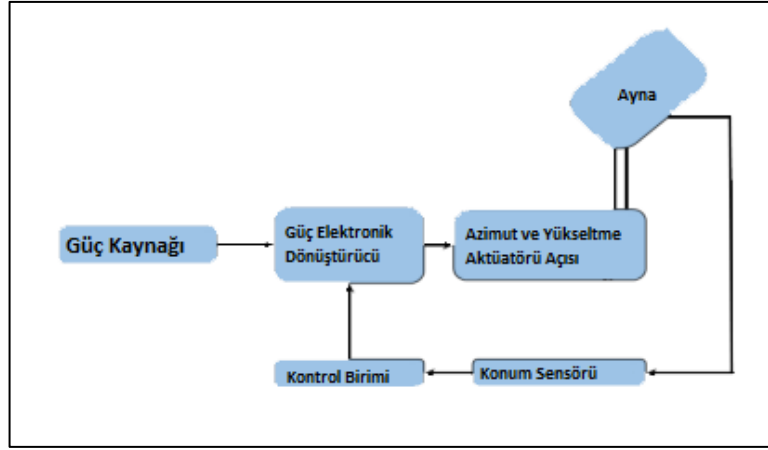


Şekil 2.2 Basit heliostat göstermi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2017)

Heliostat genel olarak beş kısımdan oluşur. Bunlar genel itibari ile tahrik sistemi, iskelet sistemi, yansıtıcı, kontrol sistemi ve takip sistemidir.

2.3.1 Takip ve Tahrik Sistemi

Güneş ışınlarını toplamak için güneş takip sistemleri sürekli olarak doğru bir şekilde ayarlanmalıdır. Tek eksenli bir izleme sistemi daha az maliyetlidir ve kontrol sisteminin elde edilmesi kolaydır. Ancak verimlilikleri iki eksenli güneş takip sistemine göre daha azdır. Şekil 2.3'te önerilen izleme sisteminin temel bileşenlerini göstermektedir. Lineer aktüatöre bağlı bir elektrik motoruna bağlı bir güç elektroniği dönüştürücüsünden oluşur. Konum sensörü, sürücü sisteminin motor konumunu doğru bir şekilde kontrol etmek için motor konumunu geri beslemek için kullanılır. Güneş takip algoritması, kontrol darbelerini güç elektroniği dönüştürücüsüne iletme ve aktüatörleri hedeflenen açılara taşımak için kontrol ünitesi içinde uygulanmaktadır. Güneş ışınlarını takip etmek için, güneş, kule ve Heliostat açıları olmak üzere üç set açı tanımlanmalıdır. Aşağıdaki alt bölüm, bu açıları tanımlamak için kullanılan matematiksel modeli açıklamaktadır (Abido vd., 2020).

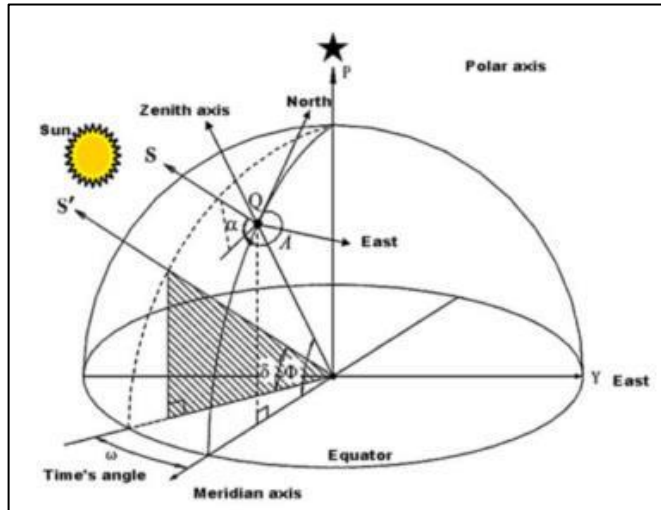


Şekil 2.3 İzleme sistemi temel bileşenleri (Abido vd., 2020)

Matematiksel modeli oluştururken güneş açısı, heliostat açısı, hareket hızı ve motor torku parametreleri esas alınır.

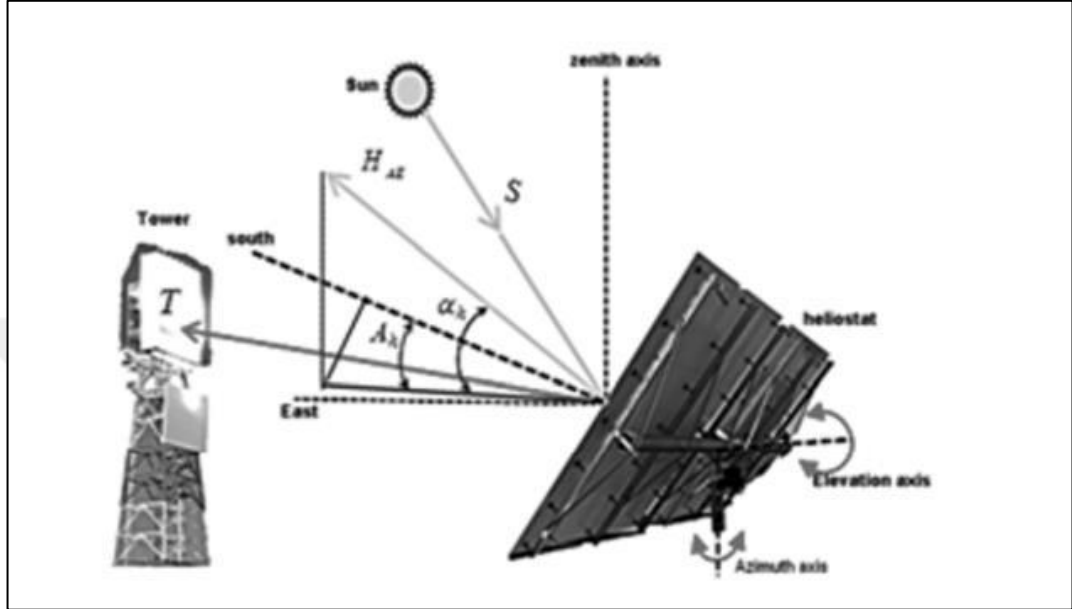
2.3.1.1 Güneş Açısı

Heliostata ait bütün takip – tahrik sistemleri güneşin hareketi esas alınarak yapılır. Bu hareketi iki açıya dayandırarak açıklayabiliriz. Bunlar yükseklik (α) ve Azimut (A) açılarıdır. Şekil 2.4’te bu açıların gösterimi yapılmıştır (Bouaichaoui vd., 2016).



Şekil 2.4 İlgili koordinat sistemine göre güneş konumu (Bouaichaoui vd., 2016)

Güneşten gelen ışın vektörü (S') sapma (δ) ve zaman (ω) açılarıyla tanımlanır. Bu açılar şekil 2.4'te mevcuttur. Şekil 2.5'te takip sistemi açıları verilmiştir (Bouaichaoui vd., 2016).



Şekil 2.5 Takip sistemi açıları (Bouaichaoui vd., 2016)

Sapma açısı (2.1) denklemi ile hesaplanır.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{(360(284+N))}{365}\right) \quad (2.1)$$

Burada N yıl içerisindeki günün sıra sayısıdır. Örneğin 1 Ocak için $N=1$ alınır veya 11 Şubat için $N= 42$ alınır.

Zaman açısı (2.2) denklemi ile hesaplanır.

$$W = 15(TSV - 12) \quad (2.2)$$

Burada TSV 24 saat içerisindeki güneş zamanıdır ve denklem (2.3) ile bulunabilir.

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{4L + E_t}{60}\right) \quad (2.3)$$

Burada TL saat tarafından verilen zaman, DE Greenwich çizgisine göre zaman farkı, L sitenin boylamı ve E_t zaman denkleminin düzeltmesidir.

Şekil 2.5'te Q pozisyonuna göre irtifa (Φ) açısı, S konum vektörünün yükseklik ve azimut açıları ile tanımı gösterilmiştir. Yükseklik açısı ve azimut açısı sırasıyla denklem (2.4) ve denklem (2.5) de tanımlanmıştır.

$$a = \sin^{-1} (\sin(\delta) \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cos(w) \cos(\Phi)) \quad (2.4)$$

$$A = \cos^{-1} \frac{\sin(\delta) \cos(\Phi) - \sin(\delta) \sin(w) \cos(\Phi)}{\cos(a)} \quad (2.5)$$

2.3.1.2 Heliostat Açısı

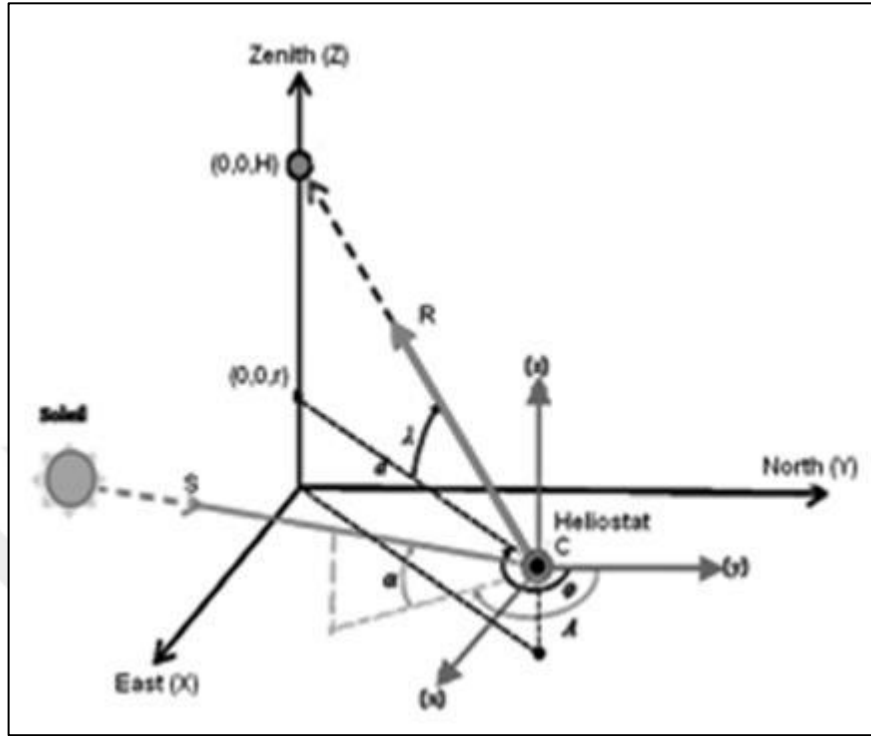
Heliostatın güneş kulesine göre pozisyonu ön aç (ϕ) ve odak açısı (λ) ile tanımlanır. Bu açılar heliostat ile güneş kulesi arasındaki mesafeye göre ilişkilendirilir. Şekil 2.6'da bu açılar gösterilmiştir (Bouaichaoui vd., 2016).

Odak Açısı denklem (2.6) ile hesaplanabilir.

$$\lambda = \arctan\left(\frac{H_t - r}{d}\right) \quad (2.6)$$

H_t kulenin alıcı yüksekliği ve r heliostat yüksekliğidir. Bu parametreler heliostatın herhangi güneş pozisyonunda azimut – yükseklik takip konumlarını belirlemek içindir.

Kordinat sistemi heliostatın yansıtma yüzeyi ile heliostatın sabitlendiği yüzey arasında konumlandırılmıştır (Bouaichaoui vd., 2016).

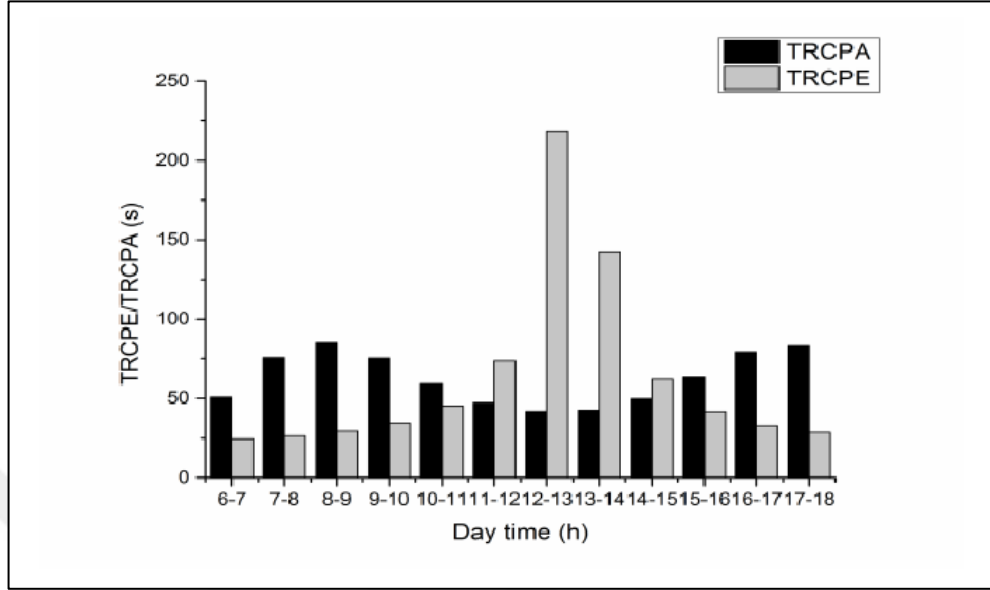


Şekil 2.6 Güneş-güneş kulesi-heliostat arasındaki açı ilişkileri (Bouaichaoui vd., 2016)

2.3.1.3 Hareket Hızları

Heliostat durumları, azimut ve yükseklik açısı ile belirlenmiş, burada iki açının değişimi, güneş merkezi alanındaki farklı konum ve farklı yıllık durumlara göre bu parametrelerin değerini yenilemek için gereken süre cinsinden esas alınmıştır. Şekil 2.7’de TRCPE yükseklik açısının, TRCPA ise azimut açısının değişmesi için gerekli süredir. Bu iki faktörü, bir azimut hızı yükselmesini belirlemek için konum değişiminin adım zamanı olarak kabul edilir. 8H00 ile 9H00 ve 16H00 ile 18H00 arasındaki iki zaman örneğinde maksimum TRCPA neredeyse 90 saniye ve minimum değeri 12H00 ile 13H00 arasında ve 50 saniye değerinde. TRCPE için sabah 25 saniyeden artar ve 12H00 ile 13H00 arasında maksimum olur ve öğleden sonra azalmaya başlar ve sabah aynı değere döner, bu bilgilere dayanarak heliostatın yükselme (Ω_{EL}) ve azimut (Ω_{AZ}) hızları

sırasıyla denklem (2.7) ve denklem (2.8) eşitliklerine göre hesaplanabilir (Bouaichaoui vd., 2016).



Şekil 2.7 TRCPE/TRCPA–Gün zaman grafiği (Bouaichaoui vd., 2016)

$$\Omega_{EL} = \frac{\Delta a_h}{TRCPE} \quad (2.7)$$

$$\Omega_{AZ} = \frac{\Delta a_h}{TRCPA} \quad (2.8)$$

2.3.1.4 Motor Torku

Heliostatın yükseklik ve azimut ekseninde senkronize harekete başlaması için, motorun heliostata etkiyen yapısal yüklerden (P) daha fazla tork uygulaması gerekir. Yükselme mekanizması, yansıma yüzeyini motor tarafından kontrol edilen sonsuz vida ile hareket ettirir. Yukarı ve aşağı yönde hareket ederkenki torklar sırasıyla denklem (2.9) ve denklem (2.10) da verilmiştir (Bouaichaoui vd., 2016).

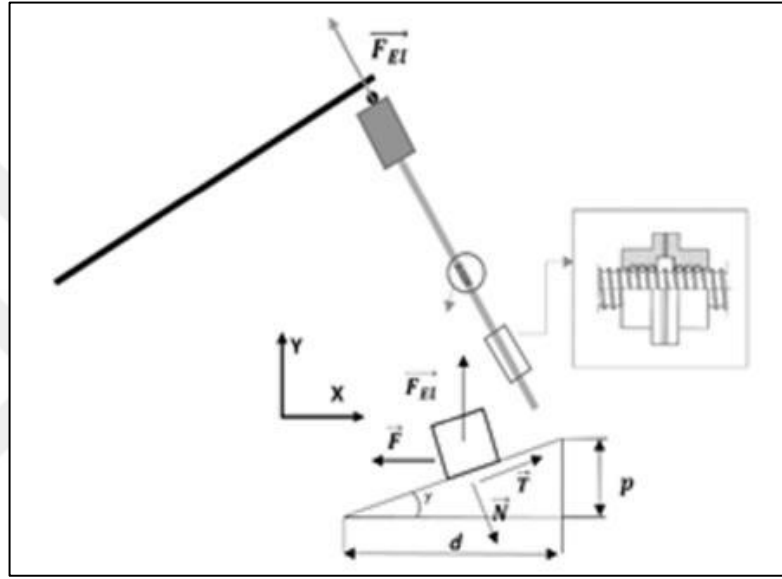
Yukarı :

$$C_{EL,motor} = \frac{F_{EL,D}}{2} \left(\frac{f\pi d + p}{\pi D - fp} \right) S \quad (2.9)$$

Aşağı:

$$C_{EL,motor} = \frac{F_{EL}D}{2} \left(\frac{p-f\pi d}{\pi D+f p} \right) S \quad (2.10)$$

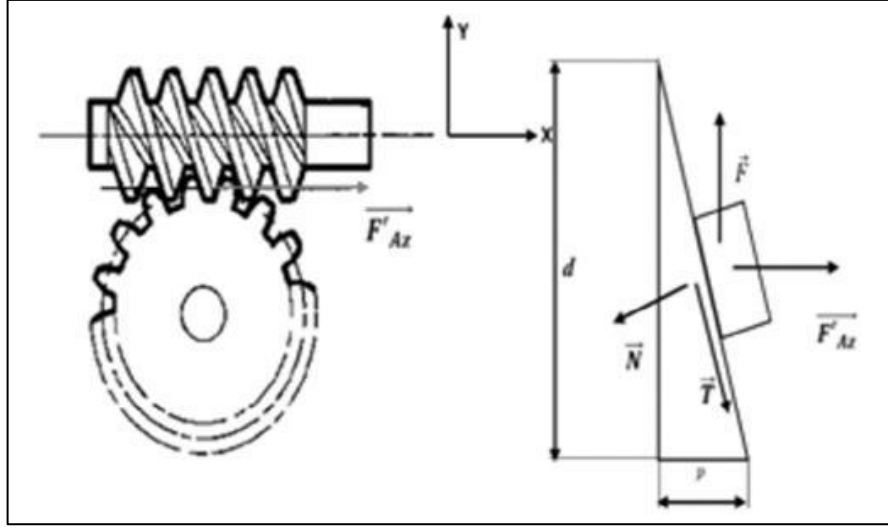
Bu denklemlerde, F_{EL} , yükselme kuvveti, p , yükselme mekanizmasının sonsuz vida adımı, D , vida çapı, f sürtünme katsayısı ve s ise güvenlik faktörüdür (1.2 - 1.3 alınır). Bu kuvvetler şekil 2.8’de gösterilmiştir (Bouaichaoui vd., 2016).



Şekil 2.8 Yükselme mekanizması diyagramı (Bouaichaoui vd., 2016)

Azimet mekanizmasındaki tork ise Şekil 2.9’da gösterilmiştir ve denklem (2.11) göre hesaplanır. Burada F_{AZ} ve F_{EL} sırası ile azimet ve yükselme mekanizmasına etkiyen kuvvetlerdir (Bouaichaoui vd., 2016).

$$C_{AZ,motor} = \frac{F_{AZ}D}{2} \left(\frac{p+f\pi d}{\pi D-f p} \right) S \quad (2.11)$$



Şekil 2.9 Azimut mekanizması diyagramı (Bouaichaoui vd., 2016)

2.3.2 İskelet Sistemi

Güneş kulelerinde genellikle cam yüzeyli ve çelik yapıli “T” tipi heliostatlar kullanılır. Cam ve çelik farklı ısı genleşme katsayısına sahip olduğundan aynalar genellikle destek yapısına ayna düzlemine her iki yönden esnek olan pimler ile bağlanırlar. Heliostatlarda damgalı (stamped) adı verilen destek yapılar kullanılabilir. Damgalı destek yapılar daha fazla sertlik sağladığı için daha ince cam aynaların kullanılmasına olanak sağlar. Metal saç levhalarda bulunan açıklıklar ağırlığı azaltır. Yapıştırıcının sahip olduğu esneklik nedeniyle cam ve çeliğin termal genleşmedeki farklılıkları telafi edilir. Bağlanma anında geometri optimize edilebildiğinden sıcaklık değişikliklerinin neden olduğu geometrik değişiklikler ve buna bağlı olarak oluşan ışın kalitesindeki değişim en aza indirilebilir. Bu sistemin üretimi yüksek oranda otomatikleştirilebilir. Heliostat aynaların geliştirilmesiyle sandviç (Sandwich) panel aynalar geliştirilmiştir. Sandviç panel ayna yüzeyleri alternatiflere kıyasla çok iyi optik performans, ince cam kullanımı buna bağlı olarak gelişmiş yansımaya ve rijitlik sunar (Coventry vd., 2017).

2.3.3 Yansıtıcı

Heliostatlar güneşten gelen ışınları alıcıya yansıtmak için bir yansıtıcı malzemeye ihtiyaç duyarlar. Güneşten gelen ışınları alıcıya yansıtmak için en uygun seçenek cam aynalar veya yansıtıcı filmlerdir. Plastik aynalar veya cilalanmış metaller yeterli yansıtmaya sahip olmadığından heliostatlar için uygun değildirler. Şekil 2.10’da gösterildiği gibi cam aynalar ucuz, dayanıklı ve yüksek yansıtma kapasitesine sahip oldukları için tercih edilirler (Coventry vd., 2017).

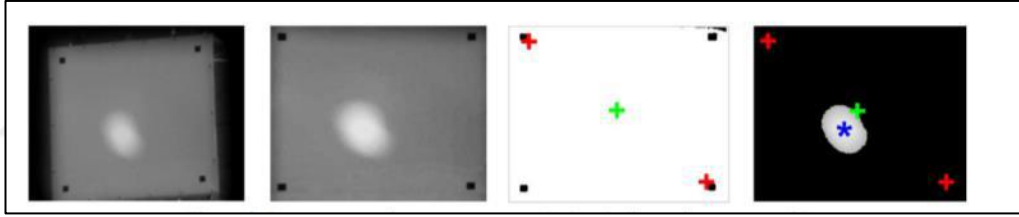


Şekil 2.10 Heliostat düz ayna (Anonim, 2019)

2.3.4 Kontrol Sistemi

Güneşten gelen ışınlarını önceden belirlenmiş bir hedefe heliostatlar ile yansıtılır. Bu nedenle, sistemdeki her heliostat, yansıyan güneş görüntüsünü alıcıdan ayrı bir kalibrasyon hedefine yönlendirmek üzere düzenli olarak kontrol edebilir. Sahada bulunan bir kamera, hedefe yansıtılan güneş görüntüsünü fotoğraflayarak dijital görüntüyü merkezi bir bilgisayara aktarır (Gauché ve Malan, 2014). Görüntü işleme teknikleri, Şekil 2.11'e göre her bir heliostat için zaman damgalı bir hedef noktası

ofsetleri kümesini hesaplamak için kullanılır. Kontrol sisteminde iki farklı yaklaşım vardır bunlar: geleneksel yaklaşım, kalibrasyon ölçümlerini ve açık döngü kontrolünü kullanırken, modern çözümler geri besleme ve kapalı döngü kontrolü için sensörler kullanır. Açık döngü kontrolü için ön koşul, çok düşük bir istatistiksel hata veya geri tepme ve kararlı, öngörülebilir bir sistematik davranıştır. Kalibrasyon çabası hataya açık sistemlerde büyük olabilir. Ayrıca heliostat geometri modeli, heliostat modeli ile değişebilen gerçek kusurları tanımlamaya uygun olmalıdır. Kapalı döngü sistemleri yalnızca oynama, geri besleme sensörünün ölçüm doğruluğu ve motor kontrolü ile sınırlıdır. Sensör-heliostat kalibrasyonu bozulmadan kaldığı sürece yerçekimi, rüzgâr ve sıcaklık altındaki deformasyon gibi zor etkiler telafi edilebilir. İzleme doğruluğu, dökülmeyi azaltan ve belirli bir genel akı dağılımı elde etmek için tüm heliostat alanının daha iyi kontrol edilmesini sağlayan kapalı döngü sistemlerinde daha iyi olabilir (Coventry vd., 2017).



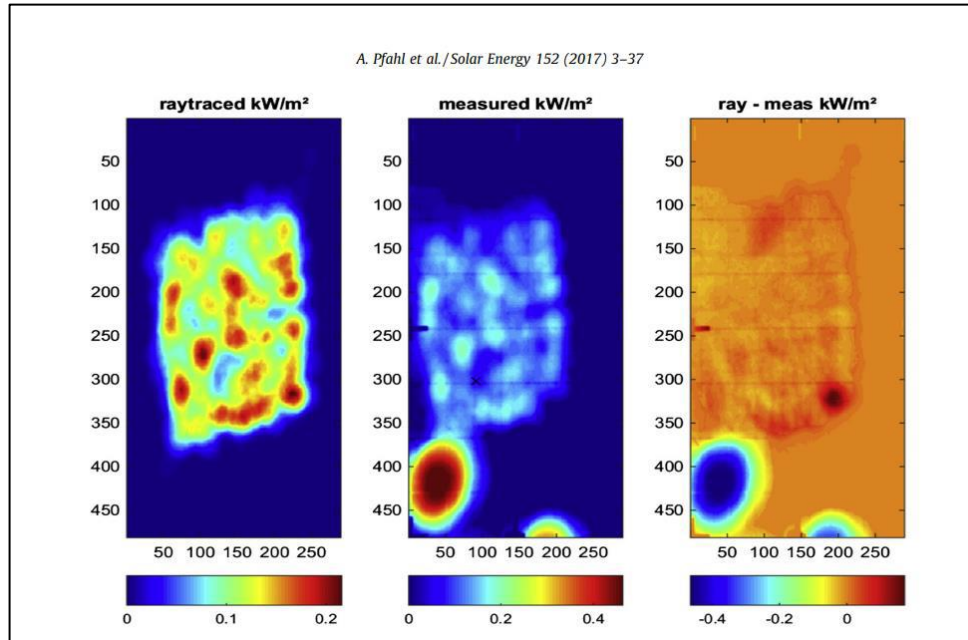
Şekil 2.11 Heliostat görüntü merkezindeki görüntü işleme dizisi (Gauché ve Malan , 2014)

2.3.4.1 Kalibrasyon

Heliostat kalibrasyon sorunu, kule tabanlı CSP sistemlerinin tasarımı için evrenseldir. Sadece birkaç metre çapında bir ışık soğuran alıcı, kulenin tabanından yüzlerce metre uzayabilen bir heliostat alanıyla çevrili bir kulenin üzerine oturur. Reflektör yüzeyinden alıcıya bu kadar büyük mesafelerde, yansıyan güneş ışığının yönündeki küçük bir yanlışlık bile alıcının yüzeyinde akının büyük bir doğrusal yer değiştirmesine neden olabilir (Huibregtse vd., 2015).

2.3.4.2 Optik Sensör

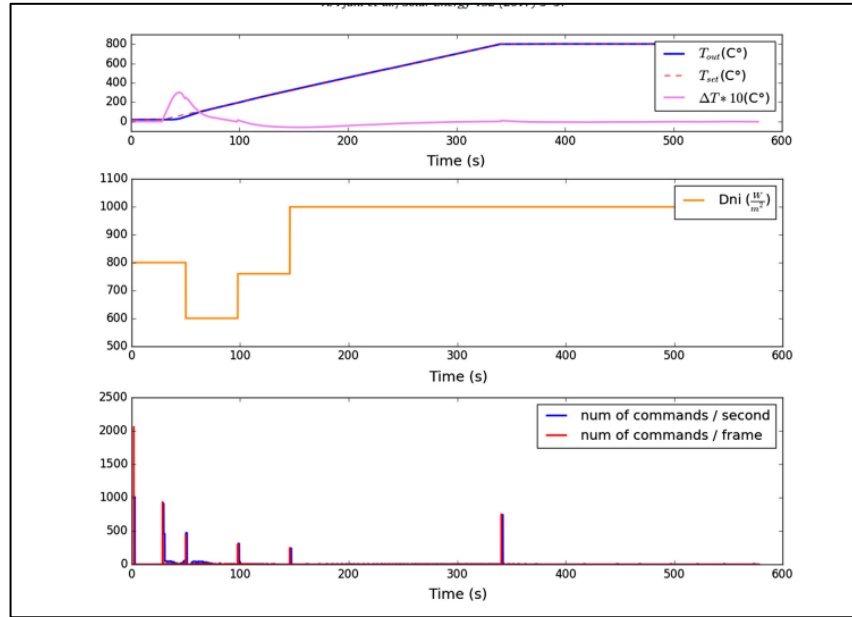
Kule üzerine kurulu kameralara veya sahadaki özel direklere ek olarak, oryantasyonu ölçmek için doğrudan heliostat üzerine monte edilen sensörler, kalibrasyon için veya kapalı döngü kontrolü için geri bildirim olarak kullanılabilir. Kapalı döngü kontrolü için, optik sensör, görüntü işleme yoluyla güneşin ve alıcının konumunu algılar. Kapalı döngü kontrolü için, optik sensör, görüntü işleme yoluyla güneşin ve alıcının konumunu algılar. Tamamen hizalanmış bir kamera için, heliostat, aynı zamanda aynanın normal vektörünü (N) temsil eden görüntü merkezi, Güneş (S) ve alıcı (R) arasındaki merkez noktası ile çakışacak şekilde hareket ettirilir (bkz. Şekil 2.12). Genel bir kamera için, kameranın aynaya göre ilk kalibrasyonu gereklidir. Şekil 2.12'de (solda), ayna panelinin normal vektörü, güneşe giden vektör ile alıcıya giden vektör arasında dörtgen şeklindedir, böylece güneşten gelen ışınlar alıcıya çarpar. Optik sensör, önemli bir ekstra maliyete neden olmayacak küçük bir standart balık gözü lensi olan ticari tip bir akıllı telefon kamera çipi olabilir. Böyle bir sistem DLR'de geliştirilme aşamasındadır (Gauché ve Malan , 2014).



Şekil 2.12 Odak uzaklığı kalibrasyon hedefine olan mesafenin yaklaşık üçte biri olan bir prototip heliostat için akı yoğunlukları (Huibregtse vd., 2015)

2.3.4.3 Heliostat Alan Kontrolü

Heliostatlar güneş ışığını toplayıp konsantre ederken, alıcı üzerindeki sıcaklığın ve akı dağılımının kontrol edilmesi gerekir. Değişen çevresel koşullar nedeniyle, kontrol sistemi, istenen ve verimli bir akı dağılımını ve dolayısıyla alıcı üzerindeki sıcaklık profilini elde etmek için heliostat hedef noktalarını sürekli olarak uyarlamak zorundadır. Sistem kalibrasyonunu koordine temeli ve heliostat izleme ile ilgilenmelerdir. Houston üniversitesinin geliştirdiği DAPS sitemi sayesinde gün boyunca nişan noktalarını değiştirilebilir. Şekil 2.13'te simüle edilmiş açık hacimsel alıcı ve simüle edilmiş 2153 heliostat için sıcaklık kontrolünün başarısını göstermektedir. Sıcaklık sapmaları, mevcut güç talebi karşılamak için yetersiz olduğunda – ya stoktan raya ilk hareketten ya da DNI eksikliğinden dolayı meydana gelir. Şekil ayrıca gönderilen heliostat komutlarının sayısını da görselleştirmektedir. Ani DNI değişiklikleri durumunda sistem, izleme heliostatlarının sayısını aktif olarak uyarlamak zorundadır. Kablosuz bağlantılı bir heliostat alanı olması durumunda, kontrol sistemi gönderilen komutların sayısını en aza indirmeye çalışmalıdır (Gauché ve Malan, 2014).

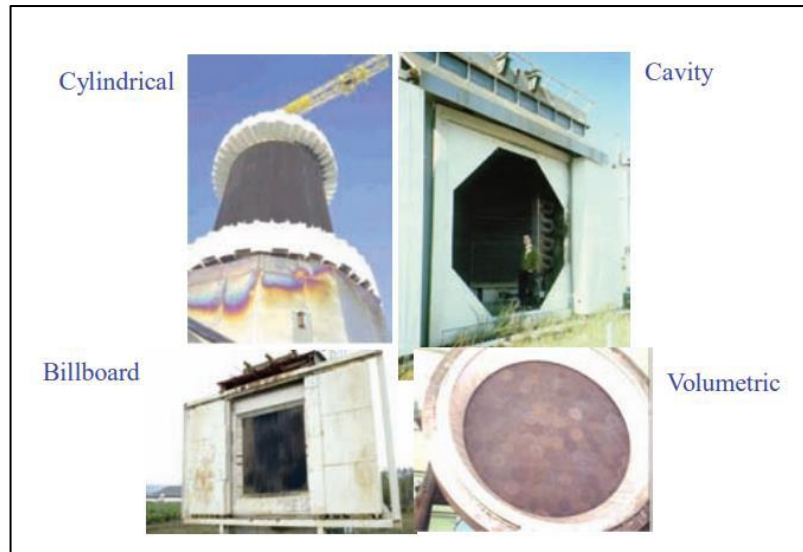


Şekil 2.13 Açık bir hacimsel alıcının ısınmasının simülasyonu (2,5 C/s) (Gauché ve Malan, 2014)

2.4 Güneş Alıcısı

Güneş enerjisi kulesi sisteminde alıcı, heliostatlardan gelen yüksek yoğunluktaki güneş ışınlarının termodinamik çevrimde kullanılmak üzere termal enerjiye dönüştürüldüğü bir ısı eşanjörüdür. Alıcılarda heliostatlardan gelen ışıma kayıplarını en aza indirmek için boşluklar, siyah tüp paneller veya gözenekli soğurucular kullanılır. Tipik bir soğurucunun çalışma sıcaklık aralığı 500 ile 1200°C arasında ve gelen akı 300 ile 1000kW/m² değerlerinde olduğu için soğurucunun termal verimlilik ve dayanıklılığı yüksek olmalıdır (González-Aguilar ve Romero, 2014).

Konstrüksiyon çözümüne, ara yutucu malzemelerin kullanımına ve kullanılan termal akışkanın türüne veya ısı transfer mekanizmalarına bağlı olarak alıcılar sınıflandırılabilir. Geometrik konfigürasyona göre iki tasarım seçeneği mevcut; dış (external) ve çukur (cavity) tipi alıcılar. Dış alıcılar düz plaka boru şeklinde bir panel ile tasarlanabilir veya silindir şeklinde olabilir. Çukur tipi alıcılarda ise heliostatlardan yansıyan ışınlar, ısı transfer yüzeyine ulaşmadan önce bir açıklıktan kutu benzeri bir yapıya geçer. Şekil 2.14'te dış ve çukur tipi alıcılar gösterilmiştir (González-Aguilar ve Romero, 2014).



Şekil 2.14 Alıcı türleri (Gauché ve Malan, 2014)

BÖLÜM ÜÇ

HELİOSTAT-KULE TASARIMI VE ANALİZLER

3.1 Referans Alınan Tasarım

Bu çalışmada heliostatlar daha önceki yıllarda Solarux firmasının TÜBİTAK projesi olan parabolik çanak CSP sistemi baz alınarak yapılmıştır (bkz. Şekil3.1). Önceki tasarımda kullanılan kremayer dişli sistemi uzun hareket mesafesi ve ağır yük taşıma durumlarında kullanılmaktadır. Güneş kule sistemlerinde odaklanma sapmaları önemli bir problem olduğundan bu tasarımda vidalı mil sistemi tercih edilmiştir.



Şekil 3.1 Solarux CSP Tasarım – 2014 TÜBİTAK

3.2 Sistemin Çalışma Prensibi

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri adından da anlaşılacağı üzere güneş ışınlarının bir noktaya odaklanması prensibi ile çalışır. Odaklama, heliostatlar aracılığı ile yapılır. Heliostatlar ise yansıtma yüzeylerinde bulunan aynalar aracılığı ile güneş ışınlarını alıcı kule üzerindeki odak bölgesine yansıtır. Güneş ışınlarını yansıtmak için ise yansıtma yüzeyinin belirli bir iç bükey eğime sahip olması gerekir. Bu eğim, heliostatın alandaki konumuna göre hesaplanır. Sistemimizde bu hesaplamalar sponsor firmamız Solarux tarafından geliştirilen bir algoritma aracılığı ile yapılır. Hesaplanan eğim değeri, heliostatın üretimi sırasında verilir. Heliostatın odak kalibrasyonu ise alana montajlandıktan sonra üzerinde bulunan vidaların sıkılıp gevşetilmesiyle ayarlanabilir ve heliostat kullanıma hazır hale gelir. Heliostatın kalibrasyonu ve üretimi kolaylaşmış olup bu özellik, heliostata modülerlik kazandırmıştır.

3.3 Heliostat Tasarımı

Heliostatlar güneş kule sisteminin toplam maliyetinin %50 sine yakın kısmını kapsamaktadır. Bu yönden yatırım yapılacak sistemde maliyeti azaltmak açısından heliostat tasarımı büyük öneme sahiptir. Heliostatlar aşağıdaki alt sistemlerden oluşur.

- Tahrik Sistemi
- Kontrol ve Takip Sistemi
- Destek Yapısı
- Ayna ve Çanak Tasarımı

3.3.1 Tahrik Sistemi

Heliostatlar güneşten gelen ışınları iki eksenle dönüş hareketi ile alıcıya odaklamaktadır. Odaklama sağlanırken heliostat hareketinin toleransı oldukça düşüktür. Dönüş çözünürlüğü yatayda ve dikeyde 0,02 derecedir. Hareket aralığı ise yatayda 0 – 360 derece, dikeyde 0 – 90 derecedir. Bu sebeple tahrik sisteminin yatayda ve dikeyde hassasiyeti sağlayacak kapasitede olması gerekmektedir. Bu yüzden seçilecek tahrik sisteminin önemi büyüktür. Heliostatlarda genel olarak tahrik sistemleri hidrolik piston sistemi ve vidalı mil sistemidir.

3.3.1.1 Hidrolik Piston ile Tahrik

Hidrolik pistonların çalışma prensibi silindirik yapı elemanı içerisinde sıkıştırılmış yağa gerekli bası – çeki kuvvetleri uygulanarak hareketin iletilmesidir. İçerisinde barındırdığı yağın özelliği itibariyle sistemin sızdırmazlığının çok iyi yapılması gerekmektedir. Hidrolik pistonlar prensibi itibariyle sisteme etkiyen dik kuvvetleri karşılamaktadır. Heliostata etkiyen rüzgâr kuvvetleri sistemde yan kuvvetler oluşur hidrolik piston sistemi bu kuvvetleri karşılamakta zorlanır. Ayrıca hidrolik piston sistemleri oldukça maliyetlidir. Bu sebepler dolayısı ile sistemimizde hidrolik piston ile tahrikin sağlanması uygun görülmemektedir. Şekil 3.2’de örnek hidrolik piston sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Örnek hidrolik piston

3.3.1.2 *Vidalı Mil ile Tahrik*

Vidalı miller cıvata somun ilişkisine benzer prensiple çalışan makine elemanlarıdır. Mil üzerine açılmış dişler sayesinde mil üzerindeki dönme hareketi doğrusal harekete dönüştürülür. Genel formu Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Hareket iletiminde sağladığı birçok avantaj sayesinde endüstride oldukça yaygın kullanılmaktadır. Hassas ölçüm ve hassas pozisyonlama gerektiren sistemlerde vidalı miller oldukça önemli bir elemandır. Heliostat hareketlerinin çok düşük toleransları vidalı mil ile karşılanabilir. Ayrıca hidrolik piston sistemlerine göre daha düşük maliyetle elde edilebilir. Bu sebeplerden dolayı tahrik sisteminin vidalı mil ile yapılması öngörülmüştür.

6 metre heliostat tahrik sistemi için 24 mm çapında ve 2647,68 mm uzunluğunda 2 adet vidalı mil özel olarak tasarlanmıştır. 3 metre heliostat tahrik sistemi için 17,5 mm çapında ve 2737,92 mm uzunluğunda 1 adet vidalı mil özel olarak tasarlanmıştır. Her iki heliostatta vida adımları 10 mm'dir.



Şekil 3.3 Örnek vidalı mil

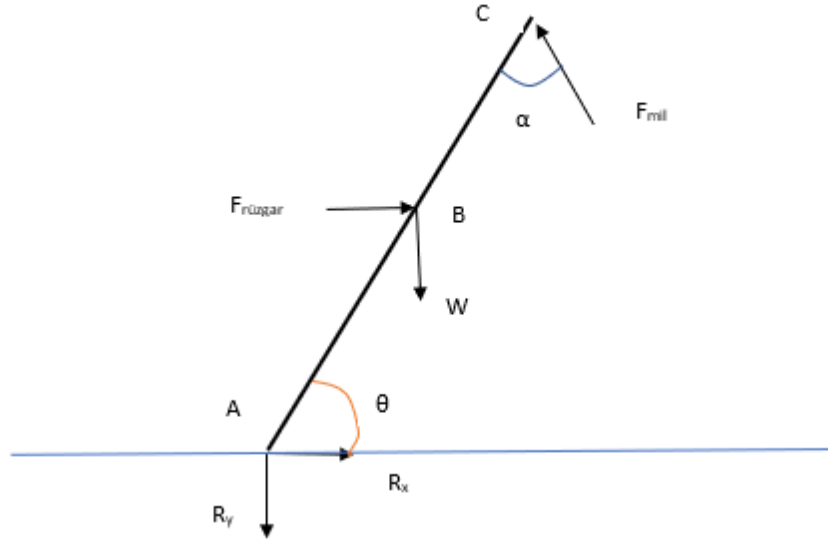
3.3.1.3 Mikro Step Motor

Heliostat konseptimizde yatay hareket 0 – 360 derece aralığa ve 0,02 derece çözünürlüğe sahiptir. Heliostat ile odak noktası arasındaki mesafe arttıkça yatay ekseninde odaktan sapma oldukça artmaktadır. Yansıtılan ışınlar odak noktasına ulaşmamaktadır. Sapmaların motordan aktarılan güçten dolayı olması muhtemel sebeplerdendir. Bu ihtimali en aza indirmek hassas güç aralıklarına sahip motor kullanılarak sağlanabilir. Belirtilen gerekliliklerden dolayı tasarımıımızda yatay hareket mikro step motor ile sağlanmaktadır.

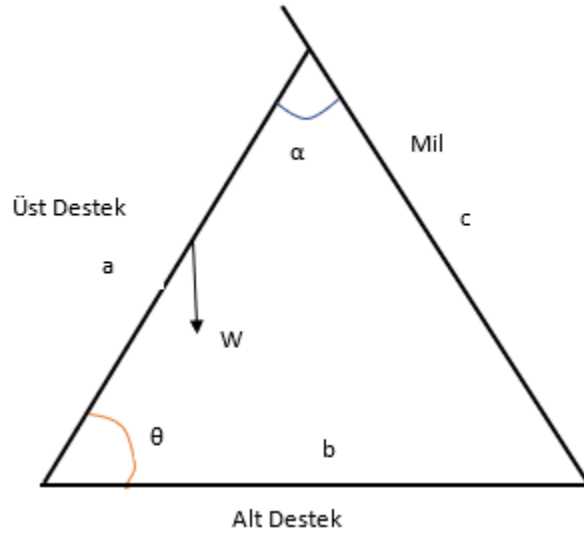
3.3.1.4 Servo Motor

Heliostat konseptimizde dikey hareket 0 – 90 derece aralığa ve 0,02 derece çözünürlüğe sahiptir. Ancak dikeydeki sapmalar ile yataydaki sapmalar aynı oranda değişmemektedir. Dikeydeki sapmalar heliostat ile odak noktasındaki mesafe arttıkça artmaktadır fakat yansıtılan ışınlar odak noktasına ulaşmaktadır. Dikey açılı motorları asenkron motorlardır. Asenkron motor seçim ile maliyetin de azaltılması amaçlanmıştır.

3.3.1.4.1 Motor Tork Hesabı. Maliyet açısından uygun motor seçimi için motor hesabının yapılması gerekmektedir. Servo motor vidalı mili tahrik ettiği için vidalı milden gelen torkun bulunması gerekir. Vidalı mile etkiyen kuvvet açığa bağlı olarak değişim Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu yüzden vidalı mile etkiyen kuvveti açığa bağlı bir fonksiyon olarak hesaplamak gerekmektedir.



Şekil 3.4 Vidalı mil serbest cisim diyagramı



Şekil 3.5 Vidalı mil konum açılarının gösterimi

Kosinüs teoremi kullanılarak Şekil 3.5'te gösterilen α açısı θ cinsinden yazılır ve denklem (3.1) elde edilir.

$$\cos(\alpha) = 0,707 * \frac{1 - \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \cos(\theta)}} \quad (3.1)$$

$$\alpha = \arccos \left(0,707 * \frac{1 - \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \cos(\theta)}} \right)$$

Şekil 3.4'teki kuvvetler A noktasına göre moment alınır ve mile etkiyen kuvvet (F_{mil}) θ açısına bağlı bir fonksiyon olarak bulunur. Bu fonksiyon denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$W * \cos(\theta) * AB + F_{rüzgar} * \sin(\theta) * AB = F_{mil} * AC * \sin(a) \quad (3.2)$$

$$F_{mil} = \frac{W * \cos(\theta) * AB + F_{rüzgar} * \sin(\theta) * AB}{AC * \sin(a)}$$

Denklem (3.1) ve denklem (3.2)'den türetilerek denklem (3.3) elde edilir.

$$F_{mil} = \frac{W * \cos(\theta) * AB + F_{rüzgar} * \sin(\theta) * AB}{AC * \sin\left(\arccos\left(0.707 * \frac{1 - \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \cos(\theta)}}\right)\right)} \quad (3.3)$$

Motor torkunun hesabında özel olarak üretilen vidalı mil özellikleri alınarak MATLAB programı ile araştırma esnasında elde edilen formüller ile hesabı yapılmıştır. Matlab kodları EK-3'te verilmiştir. Mile $\theta = 35$ derecede maksimum kuvvet etki etmektedir. Denklem (2.9) ve denklem (3.3) kullanılarak yapılan hesap sonucunda:

$$F_{mil} = 1917 \text{ N}$$

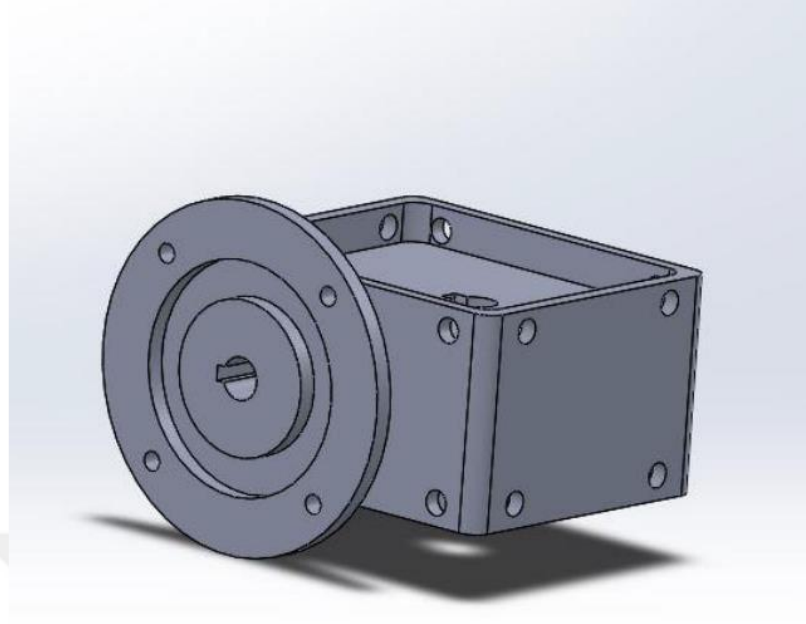
$$C_{motor \text{ torku}} = 1,015 \text{ Nm}$$

bulunmuştur.

Hesaplanan motor torkundan güç hesabı yapılmıştır. Hesaplanan güç 0,16 kW olarak bulunmuş ve bu değerin üzerinde bir motor seçimi yapılmıştır.

3.3.1.5 Redüktör

Elektrik motorlarının kullanıldığı yerlerde, motordan gelen yüksek dönüş hızlarını makine tarafından ihtiyaç duyulan dönüş hızına düşürmek için redüktör kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.6'da sistemde kullanılan redüktör örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Redüktör

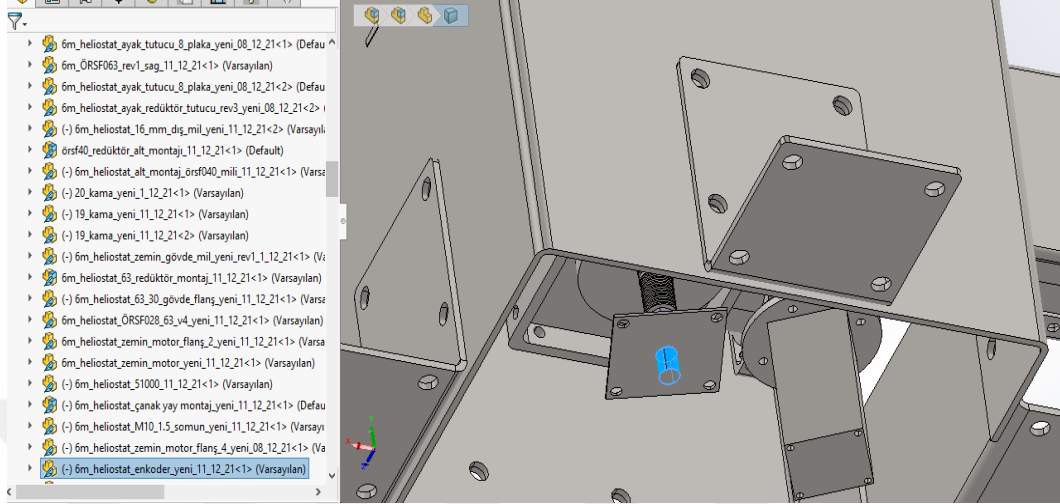
3.3.2 Kontrol ve Takip Sistemi

Heliostat sistemlerinde manuel, zaman ayarlı, ışık sensörlü ve bilgisayar kontrollü takip sistemleri mevcuttur. Takip sisteminin manuel olması enerji üretiminde büyük zaman kayıplarına yol açar. Işık sensörlü takip sistemlerinin ise kurulum, uygulama ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir. Bu sebeplerden dolayı heliostat tasarımında bilgisayar destekli zaman – konum ayarlı takip sisteminin kullanılması uygun görüldü. Takip sisteminin kurulumu için ise encoder, Solarux yazılımı, sensörler ve Arduino kullanıldı.

3.3.2.1 Encoder

Encoder bir milin açısal konumunu veya hareketini analog veya dijital çıkış sinyallerine dönüştüren elektro-mekanik bir cihazdır. Sistemde 0,02 hassasiyeti elde

edebilmek için 14 bit encoder kullanılmıştır. Encoder redüktör miline Şekil 3.7’de görüldüğü gibi montajı yapılmıştır.

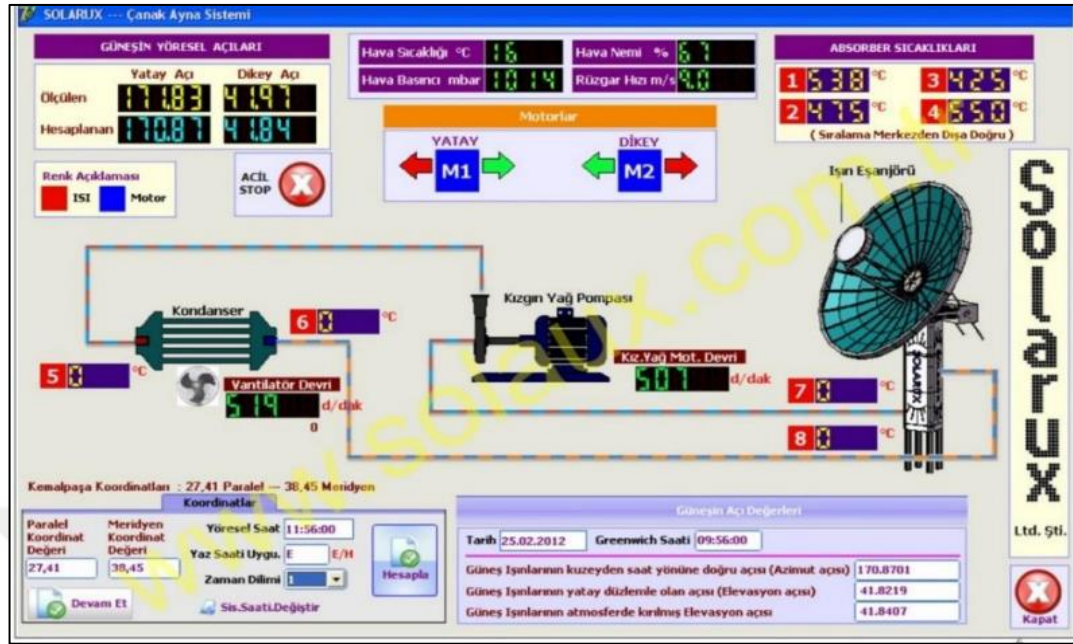


Şekil 3.7 6 metre heliostat encoder montaj konumu

3.3.2.2 Solarux Yazılım

Heliostat tasarımında konum ve zamana bağlı olarak değişen Azimuth ve yükseklik açıları, kurulumu yapacak olan Solarux firması tarafından geliştirilen Solarux Solar Tracking programı ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken enlem, boylam ve Greenwich saati referans alınmaktadır. Genel algoritma prensibi algoritmaya tanıtılan konum – zaman bilgilerine göre güneşten gelen ışınların, heliostat yansıtma yüzeyine göre açılarını hesaplamaktır. Algoritmadan alınan veriler motorlara gerekli hareket sinyallerini iletmektir.

Şekil 3.8’de gösterilen Solarux firmasına ait ilk prototip yazılım gösterilmektedir. Girdi olarak yerel saat, paralel kordinat değeri, merdiyen koordinat değeri, yaz saati uygulaması ve zaman dilimi bilgileri girilir. Program hesaplama yapar ve çıktı olarak yükseklik ve azimuth açılarını veririr. Son güncel yazılım Solarux Firmasının “Know How” prensibinden dolayı paylaşılamamaktadır.



Şekil 3.8 İlk Prototip Solarux Yazılımı (Bayram, 2014)

3.3.2.3 Sensörler

Sensörler ortamdaki veya sistemdeki değişiklikleri algılayan ve bu değişiklikleri belirli çıktılara dönüştürebilen cihazlardır. Sensörler ısı, ışık, nem, hareket, yükseklik ve basınç gibi birçok çevresel olaydan etkilenirler ve bu etkilere karşı ekrana çıktı sağlarlar. Heliostatlarda ise aynaya gelen güneş ışınlarını kuleye yansıtmak için her bir heliostatın doğru açı ve yükseklikte bulunup bulunmadığını ayrıca rüzgâr yüklerinden dolayı bu açılarda sapmalar olup olmadığını tespit etmek için sensörler kullanılır. Heliostatlarda kullanılan bu sensörler açı sensörü ve gravity sensörüdür.

3.3.2.3.1 Yatay Açı Sensörü. Heliostatın kurulduğu coğrafi bölgeye bağlı olarak heliostata yüksek rüzgâr yükleri etki edebilir. Bu rüzgâr yüklerine bağlı olarak heliostatların açılarında sapmalar meydana gelebilir. Heliostatlarda küçük açı sapmalarında bile aynaya gelen güneş ışınlarını kuleye odaklama esnasında büyük sapmalar meydana gelebilir ve verimliliğe olumsuz yönde büyük etkiler yaratabilir.

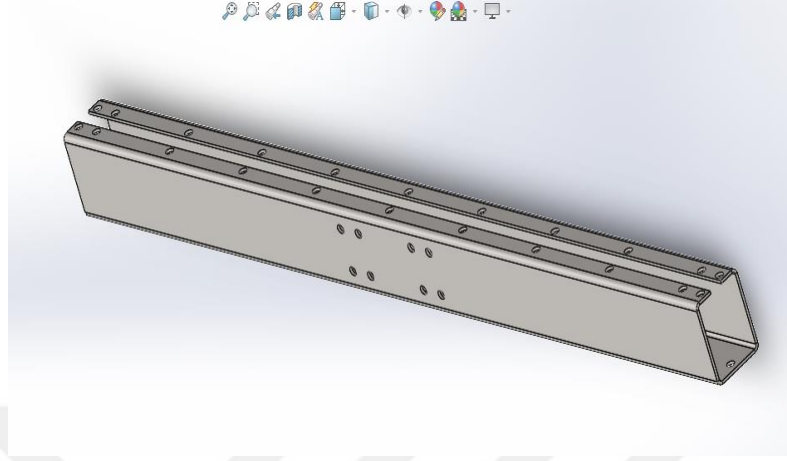
Bu nedenle heliostatın yataydaki konumunu tespit etmek için yatay açı sensörü kullanılır. Açı sensörü aynanın yüzeyine yapıştırılır. Yapıştırılan açı sensörü 0° ile 360° arasında heliostatın hangi yatay açıda bulunduğunu tespit edip bunu çıktı olarak bize sunar.

3.3.2.3.2 Dikey Açı Sensörü. Heliostata gelen yükler ve heliostatın ağırlığı nedeni ile heliostatın yüksekliğinde sapmalar meydana gelebilir. Bu sapmaları tespit edebilmek için ise bir sensöre ihtiyaç duyulur. Dikey açı sensörü heliostatın dikey açısını ölçer ve çıktısını sunar. Bu sayede heliostatın dikey açısındaki sapmaları tespit edip aynaya gelen ışınları kuleye tam odaklayabilmek için gerekli dikey açı düzeltmeleri elektronik aksamlar vasıtasıyla gerçekleştirir.

3.3.3 Destek Yapısı

Destek yapısı aynaların montaj konumlarını koruyan, gelen rüzgar kuvvetlerini karşılayan ve yapıya aktaran, sistemin kendi ağırlığını taşıyan elemanlardır. Maliyet açısından uygun olan St37 sac malzemeden büküm ve lazer kesimle imalatı yapılacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiştir. 6 metre ve 3 metre heliostatlarda tasarım amacı olarak aynı farklı ölçülerde elemanlar kullanılmıştır. Aynaların montajı için ayna atkıları 15 derecelik eğime sahip olacak şekilde parabol bir çanak-ayna montajını sağlamaktadır. Şekil 3.9’da 3 metre heliostat için kullanılan malzeme örnek olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.9-3.15 arası ve Tablo 3.1-3.12 arasında malzeme özellikleri, kullanılan malzeme adetleri, malzemelerin hangi montaj grubuna dahil olduğu, imalat resimleri için verilen parça numarası detayları, destek yapısı elemanlarından bazıları ve 3 metre heliostat ve 6 metre heliostat destek yapıları izometrik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.9 3 Metre heliostat disk tutucu

Tablo 3.1 6 metre heliostat 1.5 mm kalınlık parça listesi

6 M heliostat parça listesi								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
6M Montaj V6	70	1	adet	6m_heliostat_acı_kalibrasyon_3	6M_H_A_070	1,5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	71	2	adet	6m_heliostat_encoder_tutucu	6M_H_A_071	1,5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	72	1	adet	6m_helistat_acı_kalibrasyon_1	6M_H_A_072	1,5	St37	çizildi

Tablo 3.2 6 metre heliostat 2 mm kalınlık parça listesi

6 M heliostat parça listesi								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
6M Alt Montaj	30	1	adet	6m_zemin_motor_flaş_4	6M_H_A_030	2		çizildi
6M Montaj V6	37	24	adet	6m_ayna_tutucu_1A_rev1	6M_H_A_037	2	St37	çizildi
6M Montaj V6	49	20	adet	6m_ayna_tutucu_1B_rev2	6M_H_A_049	2	St37	çizildi
6M Montaj V6	69	4	adet	6m_ayna_tutucu_1BA_rev2	6M_H_Ü_069	2	St37	çizildi

Tablo 3.3 6 metre heliostat 4 mm kalınlık parça listesi

6 M heliostat parça listesi								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
6M Montaj V6	50	24	adet	6m ayna 1 rev1	6M_H_A_050	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	51	22	adet	6m ayna 2 rev1	6M_H_A_051	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	52	22	adet	6m ayna 3 rev1	6M_H_A_052	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	53	24	adet	6m ayna 4 rev1	6M_H_A_053	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	54	1	adet	6m ayna 2a rev1 sol	6M_H_A_054	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	55	1	adet	6m ayna 2a rev1 sağ	6M_H_A_055	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	56	1	adet	6m ayna 3a rev1 sol	6M_H_A_056	4	düşük demirli cam	çizildi
6M Montaj V6	57	1	adet	6m ayna 3a rev1 sağ	6M_H_A_057	4	düşük demirli cam	çizildi

Tablo 3.4 6 metre heliostat 3 mm kalınlık parça listesi

6 M heliostat parça listesi								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
6M Alt Montaj	1	1	adet	6m ayak tutucu 1	6M_H_A_001	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	2	1	adet	6m ayak tutucu 1a	6M_H_A_002	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	4	1	adet	6m ayak tabla 3 rev3	6M_H_A_004	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	5	1	adet	6m ayak tabla 3 rev3 sağ	6M_H_A_005	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	6	2	adet	6m ayak tabla 3a rev1	6M_H_A_006	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	7	1	adet	6m ayak tutucu 4a	6M_H_A_007	3	St37	çizildi
6M Alt Montaj	8	1	adet	6m ayak tutucu 4ab	6M_H_A_008	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	31	1	adet	6m ayna tutucu ara çember 1 v2	6M_H_A_031	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	33	1	adet	6m ayna tutucu ara çember 2 v2	6M_H_A_033	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	36	44	adet	6m ayna tutucu 50mm_2 rev7	6M_H_A_036	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	39	24	adet	6m atkı 1 rev1	6M_H_A_039	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	40	24	adet	6m atkı 2	6M_H_A_040	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	41	24	adet	6m atkı 3	6M_H_A_041	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	42	22	adet	6m atkı 4	6M_H_A_042	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	43	22	adet	6m atkı 5	6M_H_A_043	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	44	24	adet	6m atkı 6 rev1	6M_H_A_044	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	45	24	adet	6m atkı 7 rev1	6M_H_A_045	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	46	24	adet	6m atkı 8 rev1	6M_H_A_046	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	47	2	adet	6m atkı 4a	6M_H_A_047	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	48	2	adet	6m atkı 5a	6M_H_A_048	3	St37	çizildi
6M Montaj V6	58	4	adet	6m ayna tutucu 50mm_a_2 rev7	6M_H_A_058	3	St37	çizildi
6M Üst Montaj	59	2	adet	6m disk tutucu 1c arka	6M_H_U_059	3	St37	çizildi
6M Üst Montaj	61	1	adet	6m disk tutucu 1b sağ rev2	6M_H_U_061	3	St37	çizildi
6M Üst Montaj	62	1	adet	6m disk tutucu 1b sol rev2	6M_H_U_062	3	St37	çizildi
6M Üst Montaj	63	2	adet	6m disk tutucu 1ca arka	6M_H_U_063	3	St37	çizildi
6M Üst Montaj	64	2	adet	6m disk tutucu 1ba	6M_H_U_064	3	St37	çizildi

Tablo 3.5 6 metre heliostat 5 mm kalınlık parça listesi

6 M heliostat parça listesi								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
6M Alt Montaj	3	4	adet	6m ayak tutucu 6	6M_H_A_003	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	9	1	adet	6m ayak tutucu 4	6M_H_A_009	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	10	2	adet	6m ayak tutucu 7	6M_H_A_010	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	11	2	adet	6m ayak tutucu 8	6M_H_A_011	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	12	2	adet	6m ayak tutucu 8 plaka	6M_H_A_012	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	13	2	adet	6m ayak tutucu 9	6M_H_A_013	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	14	2	adet	6m ayak tutucu 3a	6M_H_A_014	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	15	2	adet	6m ayak tutucu 3b rev1	6M_H_A_015	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	16	1	adet	6m ayak tabla 1	6M_H_A_016	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	17	4	adet	6m ayak tabla 2	6M_H_A_017	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	18	4	adet	6m ayak tabla 2 ön sol	6M_H_A_018	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	19	1	adet	6m zemin gövde plaka 2	6M_H_A_019	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	20	1	adet	6m zemin gövde plaka 1	6M_H_A_020	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	21	3	adet	6m zemin tutucu 1	6M_H_A_021	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	22	1	adet	6m zemin tutucu 1 ön geniş	6M_H_A_022	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	23	1	adet	6m zemin gövde	6M_H_A_023	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	24	2	adet	6m ayak redüktör tutucu rev3	6M_H_A_024	5	St37	çizildi
6M Montaj V6	32	1	adet	6m ayna tutucu alt disk rev3	6M_H_A_032	5	St37	çizildi
6M Montaj V6	34	24	adet	6 m ayna tutucu merkezden gelen atıklar	6M_H_A_034	5	St37	çizildi
6M Montaj V6	35	1	adet	6m ayna tutucu üst disk rev6	6M_H_A_035	5	St37	çizildi
6M Montaj V6	38	24	adet	6m ayna tutucu açt ayar sacı	6M_H_A_038	5	St37	çizildi
6M Üst Montaj	60	4	adet	6m ayak tutucu 3	6M_H_Ü_060	5	St37	çizildi
6M Üst Montaj	65	4	adet	6m dikey açt mili somunu konsolü	6M_H_Ü_065	5	St37	çizildi
6M Üst Montaj	66	6	adet	6m dikey açt mili somunu tutucusu	6M_H_Ü_066	5	St37	çizildi
6M Alt Montaj	73	2	adet	6m_heliostat_zemin_gövde_mil_üst_disk_yeni	6M_H_A_073	5	St37	çizildi

Tablo 3.6 6 metre heliostat mekanik malzemeler

6 M heliostat parça listesi							
No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
25	1	adet	6m alt montaj örsf040 mili	6M_H_A_025	yok		çizildi
26	12	adet	6m zemin fren	6M_H_A_026	yok		çizildi
27	2	adet	6m 19 kama	6M_H_A_027	yok		çizildi
28	1	adet	6m 20 kama	6M_H_A_028	yok		çizildi
29	1	adet	6m zemin gövde mil rev1	6M_H_A_029	yok		çizildi
67	2	adet	6m dikey açt mil somunu	6M_H_Ü_067	yok		çizildi
68	2	adet	6m dikey açt mili	6M_H_Ü_068	yok		çizildi

Tablo 3.7 3 metre heliostat 1.5 mm kalınlık parça listesi

3 M heliostat parça listesi Tarih:								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	4	12	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_1A_yeni_rev2	3M_H_Ü_004	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	5	22	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_50m_yeni	3M_H_Ü_005	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	10	10	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_1B_yeni_rev2	3M_H_Ü_010	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	13	2	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_50m_yeni_rev2a	3M_H_Ü_013	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	16	2	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_1BA_yeni_rev2	3M_H_Ü_016	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	54	2	adet	3m_heliostat_encoder_tutucu	3M_H_A_054	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	55	1	adet	3m_heliostat_zemin_gövde_kapağı	3M_H_A_055	1,5	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	56	1	adet	3m_heliostat_açt_kalibrasyon_1	3M_H_A_056	1,5	St37	ÇİZİLDİ

Tablo 3.8 3 metre heliostat 2 mm kalınlık parça listesi

3 M heliostat parça listesi Tarih:								
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
3M DISK ALT MONTAJ	20	2	adet	3m_heliostat_disk_tutucu_1aa_yeni_rev1	3M_H_DA_020	2	St37	ÇİZİLDİ
3M DISK ALT MONTAJ	24	2	adet	3m_heliostat_disk_tutucu_1b_yeni	3M_H_DA_024	2	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	50	1	adet	3m_heliostat_zemin_motor_flaş_4_yeni	3M_H_A_050	2	St37	ÇİZİLDİ

Tablo 3.9 3 metre heliostat 3 mm kalınlık parça listesi

3 M heliostat parça listesi				Tarih:				
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	2	1	adet	3m_Heliostat_Ayna_Tutucu_Ara_Çember_yeni	3M_H_Ü_002	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	6	12	adet	3m_heliostat_ayna_atki_1_yeni_rev1	3M_H_Ü_006	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	7	11	adet	3m_heliostat_ayna_atki_2_yeni_rev2	3M_H_Ü_007	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	8	11	adet	3m_heliostat_ayna_atki_3_yeni	3M_H_Ü_008	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	9	12	adet	3m_heliostat_ayna_atki_4_yeni_rev1	3M_H_Ü_009	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	14	1	adet	3m_heliostat_ayna_atki_2_A_yeni	3M_H_Ü_014	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	15	1	adet	3m_heliostat_ayna_atki_3_A_yeni	3M_H_Ü_015	3	St37	ÇİZİLDİ
3M DISK ALT MONTAJ	21	1	adet	3m_heliostat_disk_tutucu_1c_rev4_yeni	3M_H_DA_021	3	St37	ÇİZİLDİ
3M DISK ALT MONTAJ	23	1	adet	3m_heliostat_disk_tutucu1c_arka_yeni_rev1	3M_H_DA_023	3	St37	ÇİZİLDİ
3M DISK ALT MONTAJ	25	2	adet	3m_heliostat_disk_tutucu_1ca_rev4_yeni	3M_H_DA_025	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	32	1	adet	3m_heliostat_ayak_tabla_3_yeni_sol	3M_H_A_032	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	33	1	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_4_yeni_rev1	3M_H_A_033	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	34	1	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_1_yeni_rev1	3M_H_A_034	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	35	1	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_1_a_yeni_rev1	3M_H_A_035	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	37	2	adet	3m_heliostat_ayak_tabla_3_a_yeni	3M_H_A_037	3	St37	ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	53	1	adet	3m_heliostat_ayak_tabla_3_yeni_sag	3M_H_A_053	3	St37	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	58	6	adet	3m_heliostat_alt_üst_disk_tutucu	3M_H_A_058	3	St37	ÇİZİLDİ

Tablo 3.10 3 metre heliostat 4 mm kalınlık parça listesi

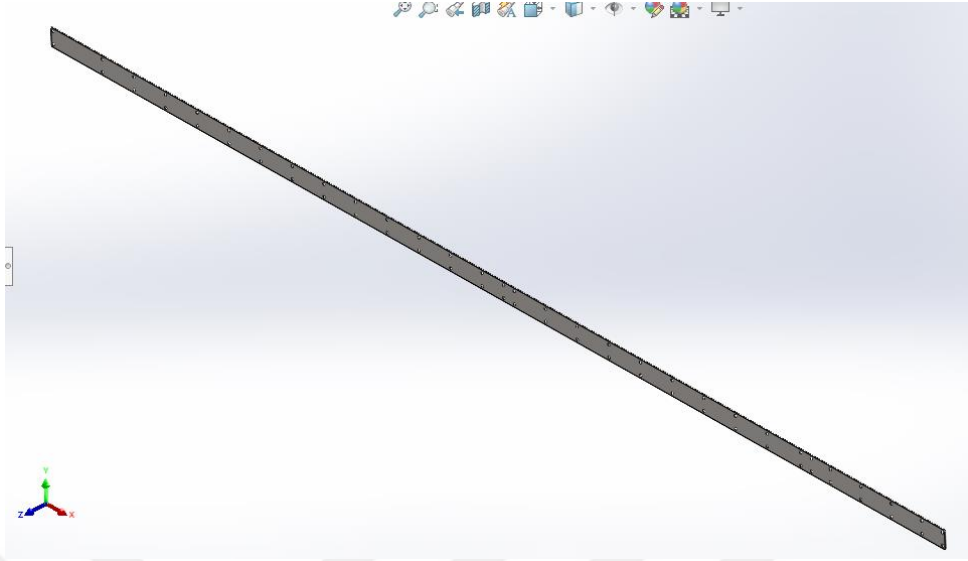
3 M heliostat parça listesi				Tarih:				
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	11	1	adet	3m_heliostat_ayna_2_yeni	3M_H_Ü_011	4	düşük demirli cam	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	12	1	adet	3m_heliostat_ayna_1_yeni	3M_H_Ü_012	4	düşük demirli cam	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	18	1	adet	3m_heliostat_ayna_1_kesik_yeni	3M_H_Ü_018	4	düşük demirli cam	ÇİZİLDİ
3M AYNA TUTUCU MONTAJ AYNALI	19	1	adet	3m_heliostat_ayna_2_kesik_yeni	3M_H_Ü_019	4	düşük demirli cam	ÇİZİLDİ

Tablo 3.11 3 metre heliostat 5 mm kalınlık parça listesi

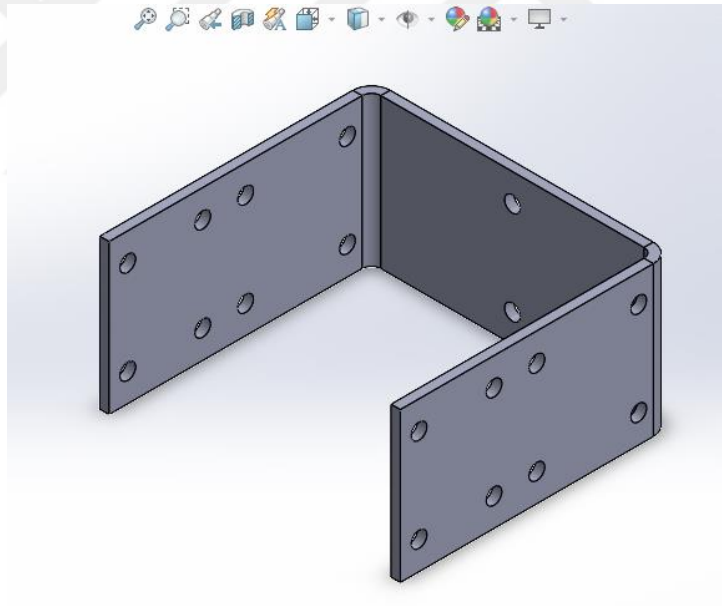
3 M heliostat parça listesi				Tarih:			
No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
1	1	adet	3m_Heliostat_Ayna_Tutucu_Alt_Disk_rev6_yeni	3M_H_Ü_001	5	St37	ÇİZİLDİ
3	1	adet	3m_Heliostat_Ayna_Tutucu_Üst_Disk_yeni_rev3	3M_H_Ü_003	5	St37	ÇİZİLDİ
17	12	adet	3m_heliostat_ayna_tutucu_acı_ayar_saci_yeni	3M_H_Ü_017	5	St37	ÇİZİLDİ
22	4	adet	3m_heliostat_disk_tutucu_1d_yeni_rev2	3M_H_DA_022	5	St37	ÇİZİLDİ
26	1	adet	3m_heliostat_dikey_açı_mili_somunu_konsolü_yeni_rev1	3M_H_DA_026	5	St37	ÇİZİLDİ
27	1	adet	3m_heliostat_dikey_açı_mili_somunu_konsolü_yeni_rev1_2	3M_H_DA_027	5	St37	ÇİZİLDİ
29	2	adet	3m_heliostat_dikey_açı_mili_somunu_tutucusu_yeni_rev1	3M_H_DA_029	5	St37	ÇİZİLDİ
30	1	adet	3m_heliostat_ayak_tabla_1_yeni	3M_H_A_030	5	St37	ÇİZİLDİ
31	4	adet	3m_heliostat_ayak_tabla_2_yeni	3M_H_A_031	5	St37	ÇİZİLDİ
36	2	adet	3m_heliostat_ayak_reduktör_tutucu_yeni	3M_H_A_036	5	St37	ÇİZİLDİ
38	4	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_5_yeni	3M_H_A_038	5	St37	ÇİZİLDİ
40	1	adet	3m_heliostat_zemin_gövde_yeni	3M_H_A_040	5	St37	ÇİZİLDİ
41	1	adet	3m_heliostat_zemin_gövde_plaka_1_yeni	3M_H_A_041	5	St37	ÇİZİLDİ
42	1	adet	3m_heliostat_zemin_gövde_plaka_2_yeni	3M_H_A_042	5	St37	ÇİZİLDİ
43	1	adet	3m_heliostat_zemin_tutucul_yeni_40mm	3M_H_A_043	5	St37	ÇİZİLDİ
44	3	adet	3m_heliostat_zemin_tutucul_yeni	3M_H_A_044	5	St37	ÇİZİLDİ
45	1	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_4_a_yeni	3M_H_A_045	5	St37	ÇİZİLDİ
46	2	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_7_yeni_rev1	3M_H_A_046	5	St37	ÇİZİLDİ
47	4	adet	3m_heliostat_ayak_tutucu_3_yeni	3M_H_A_047	5	St37	ÇİZİLDİ
57	2	adet	3m_heliostat_zemin_gövde_mil_üst_disk	3M_H_A_057	5	St37	ÇİZİLDİ

Tablo 3.12 3 metre heliostat mekanik malzemeler

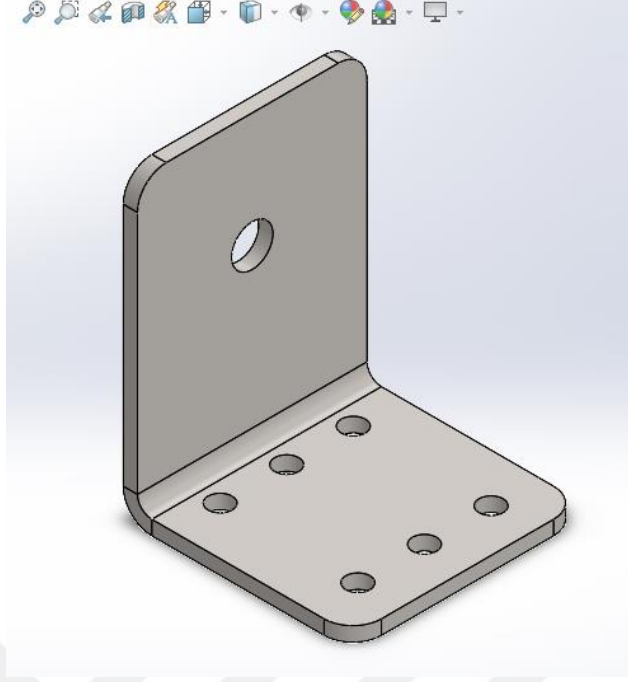
3 M heliostat parça listesi				Tarih:				
MONTAJ GRUBU	No.	Miktar	Birim	Parça ismi	Resim no	Kalınlık mm	Malzeme	İMALAT ÇİZİMİ
3M DİSK ALT MONTAJ	28	1	adet	3m_heliostat_dikey_açı_mili_somunu_yeni	3M_H_DA_028	10		ÇİZİLDİ
3M ALT MONTAJ	39	8	adet	3m_heliostat_zemin_fren_yeni	3M_H_A_039	7		ÇİZİLDİ



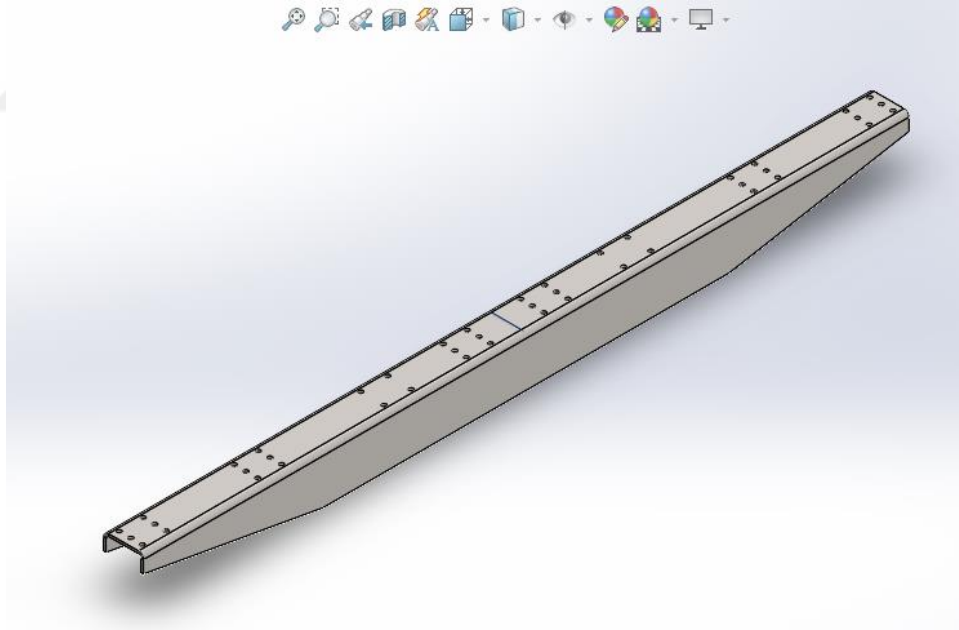
Şekil 3.10 6 metre heliostat disk tutucu 1ba



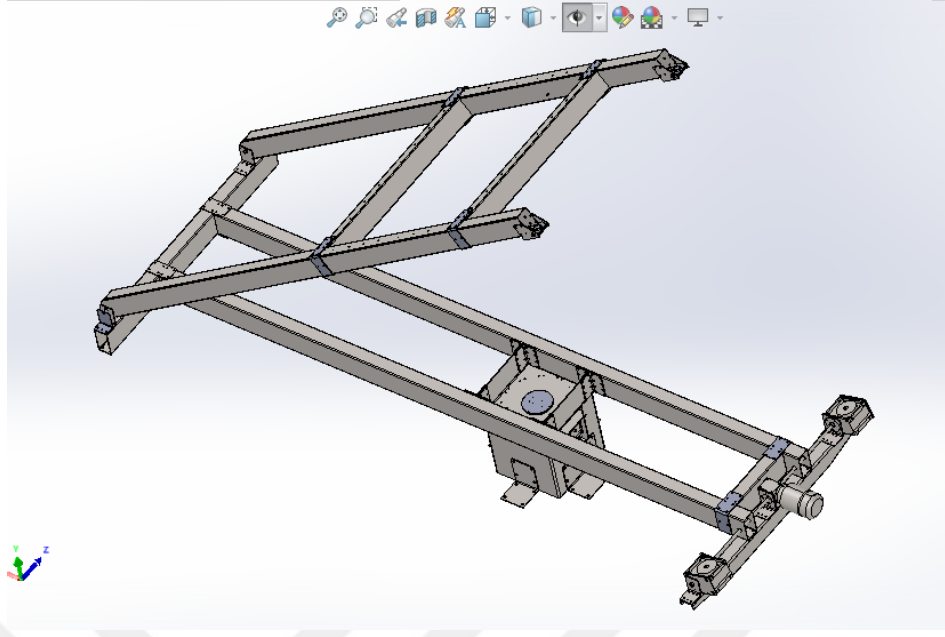
Şekil 3.11 6 metre heliostat ayak tutucu 3a



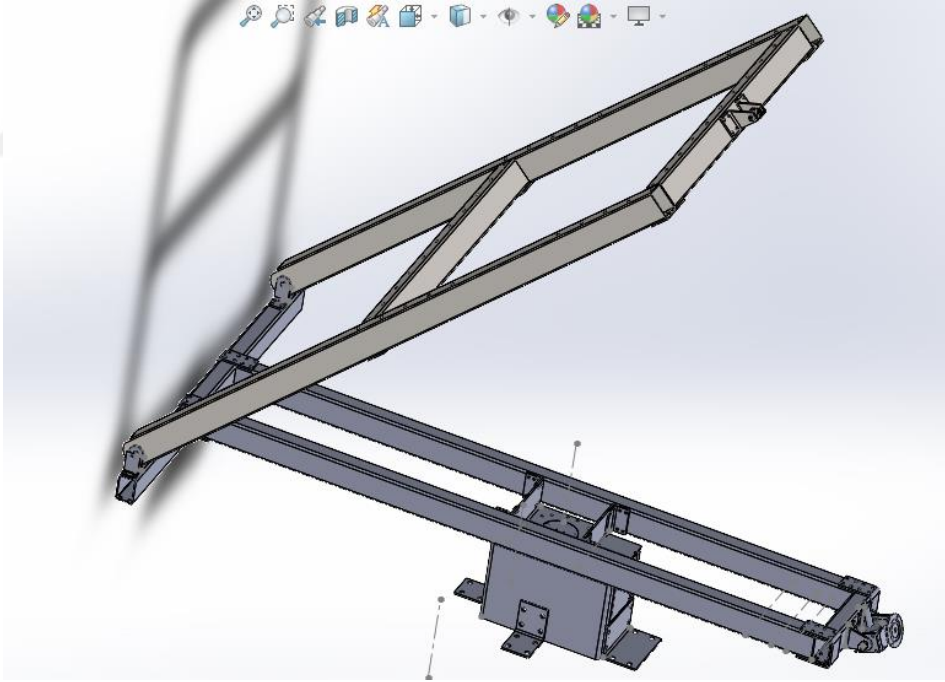
Şekil 3.12 6 metre heliostat ayak tutucu 7



Şekil 3.13 6 metre heliostat ayak tutucu 4



Şekil 3.14 6 metre destek yapı montajı



Şekil 3.15 3 metre destek yapı montajı

3.3.4 Ayna ve Çanak Tasarımı

Heliostatlar, çanak yapısında bulunan iç bükey aynaları kullanarak gelen ışınları alıcıda toplarlar. Bu da heliostatın kullanıldığı sistemde farklı konumlarına göre farklı türlerde iç bükey ayna kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Heliostatlarda kullanılacak aynaların iç bükeyliği üretim esnasında konuma göre hesaplanan farklı farklı çanak kalıplar ile veya heliostat monte edilirken her bir ayna parçasının arkasına yerleştirilen vakumlama yöntemi ile sağlanmaktadır. Fakat iki yönleme de maliyet açısından bakıldığında, kalıplama yönteminde konuma göre farklı kalıpların hazırlanmasını gerektirmektedir. Vakumlama yönteminde ise çanakta kullanılan aynaların tek tek vakumlanması gerekir fakat vakum özelliğinin iyi bakım yapılmaması durumunda ise aynanın iç bükey özelliğinin kaybolmasına neden olup odakta sapmalara sebebiyet vermektedir.

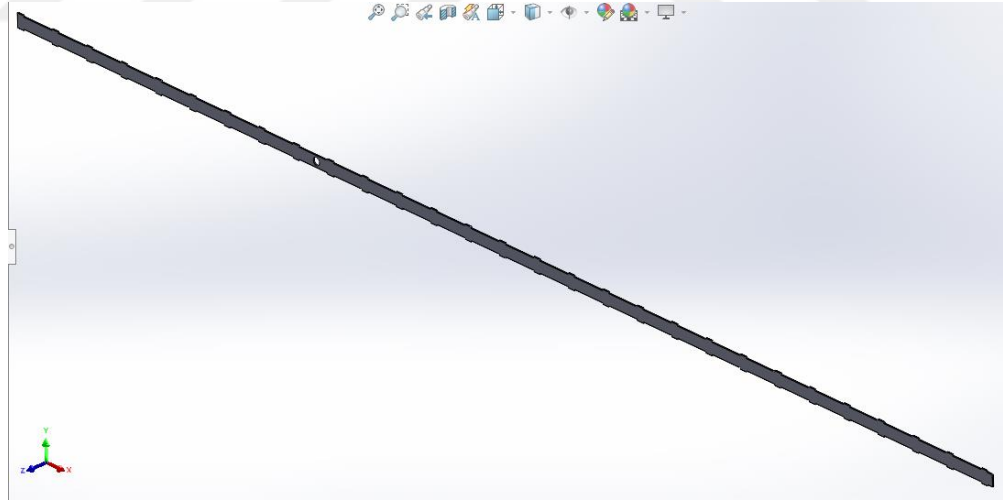
Heliostat tasarımında çanak yapısı olarak inovatif bir sistem tasarlanmıştır. Bu inovatif sistemde iç bükey eğriliği Solarux Solar Tracking programı ile hesaplanmaktadır. Programa heliostatın kuleye uzaklığı, heliostatın çanak çapı ve heliostatın yüzeyindeki dilim sayısı verileri girilir. Tasarlanan çanak yapısıyla her konumda kuleye tam odaklanma sağlanabilir.

3.3.4.1 Çanak Yapısı Montajı

Çanak yapısında bulunan alt elemanların, St37 çeliğinden kalıplar halinde tedarik edilen sac malzemelerin teknik resimlere uygun olarak lazer kesim makinesi ile önce kesilmesi ardından eğer bükülmesi gerekiyorsa abkant makinesinde işlem görerek hazırlanan imalat resimlerinde belirtildiği ölçülerde imalatı gerçekleştirilmiştir.

3.3.4.2 Heliostat Ayna Tutucu Montajı Alt Elemanı

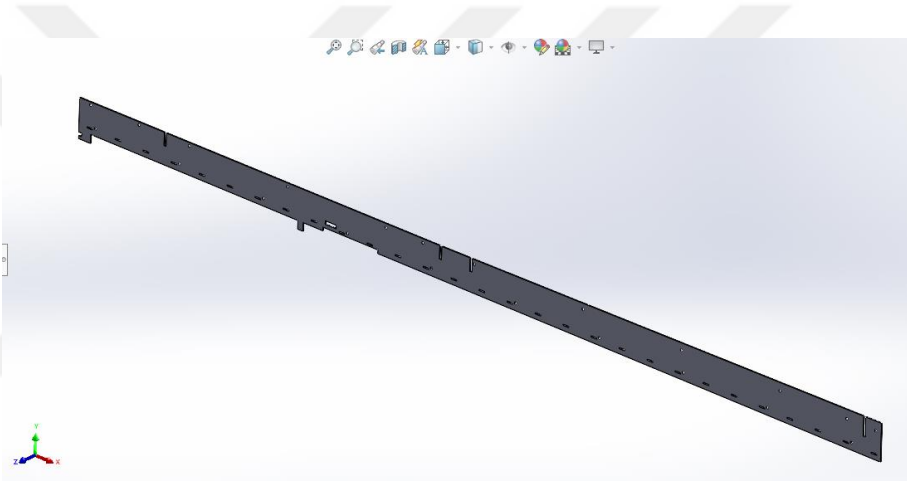
Bir adet Şekil 3.16’da verilen heliostat ayna tutucu 1A, Şekil 3.17’de verilen bir adet heliostat ayna tutucu 1B ve iki adet Şekil 3.18’de verilen heliostat ayna tutucu 50m alt elemanlarının montajlanması ile aynaların montajlandığı ayna tutucu parçası oluşturulmuştur. İşlevi aynaların oturduğu yerlerin konumlandırılmasında ve heliostatların kurulumu sırasında üzerinde bulunan vida elemanı ile aynaların iç bükümlük eğriliğinin kurulumu esnasında kalibre edilmesini sağlar. 3 metre heliostat montajında 12 adet ve 6 metre heliostat montajında 24 adet bu alt eleman kullanılmıştır. Bu sayı heliostatın çapına bağlı olarak değiştirilebilir. Eleman özellikleri Tablo 3.4 ve 3.7’de arasında verilmiş olup 3 metre ve 6 metre heliostat ayna-çanak montajları ise Şekil 3.19 ve 3.20’de verilmiştir.



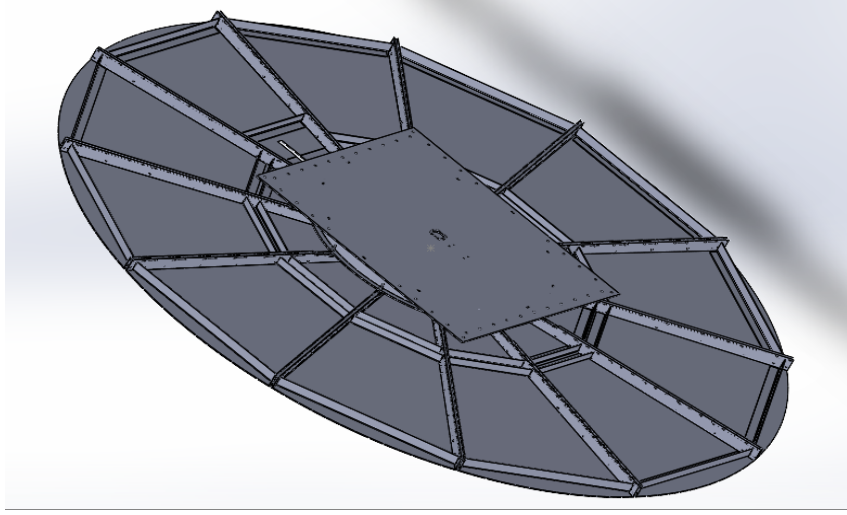
Şekil 3.16 3 metre heliostat ayna tutucu 1A



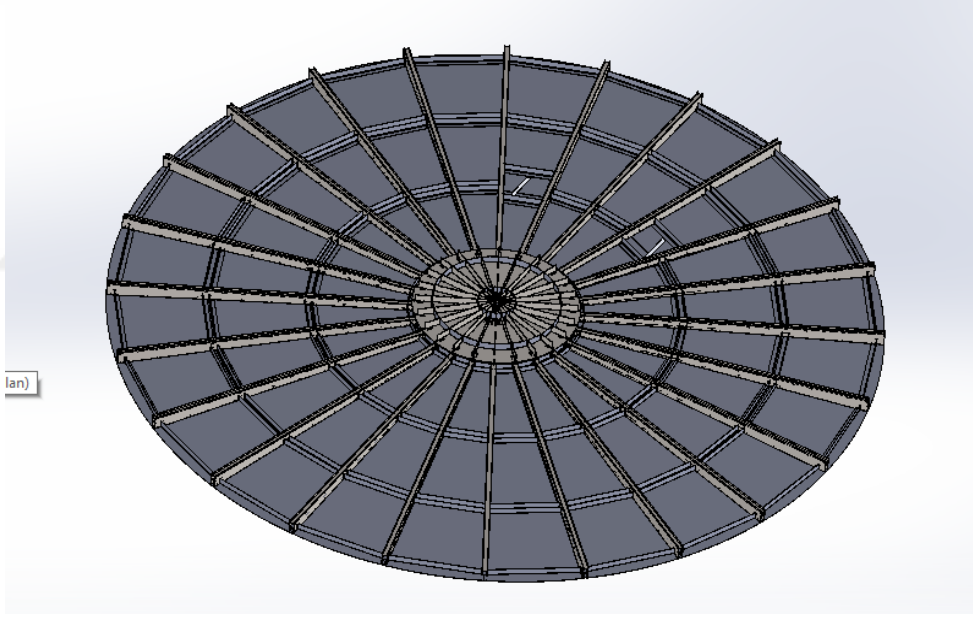
Şekil 3.17 3 metre heliostat ayna tutucu 1B



Şekil 3.18 3 metre heliostat ayna tutucu 50m



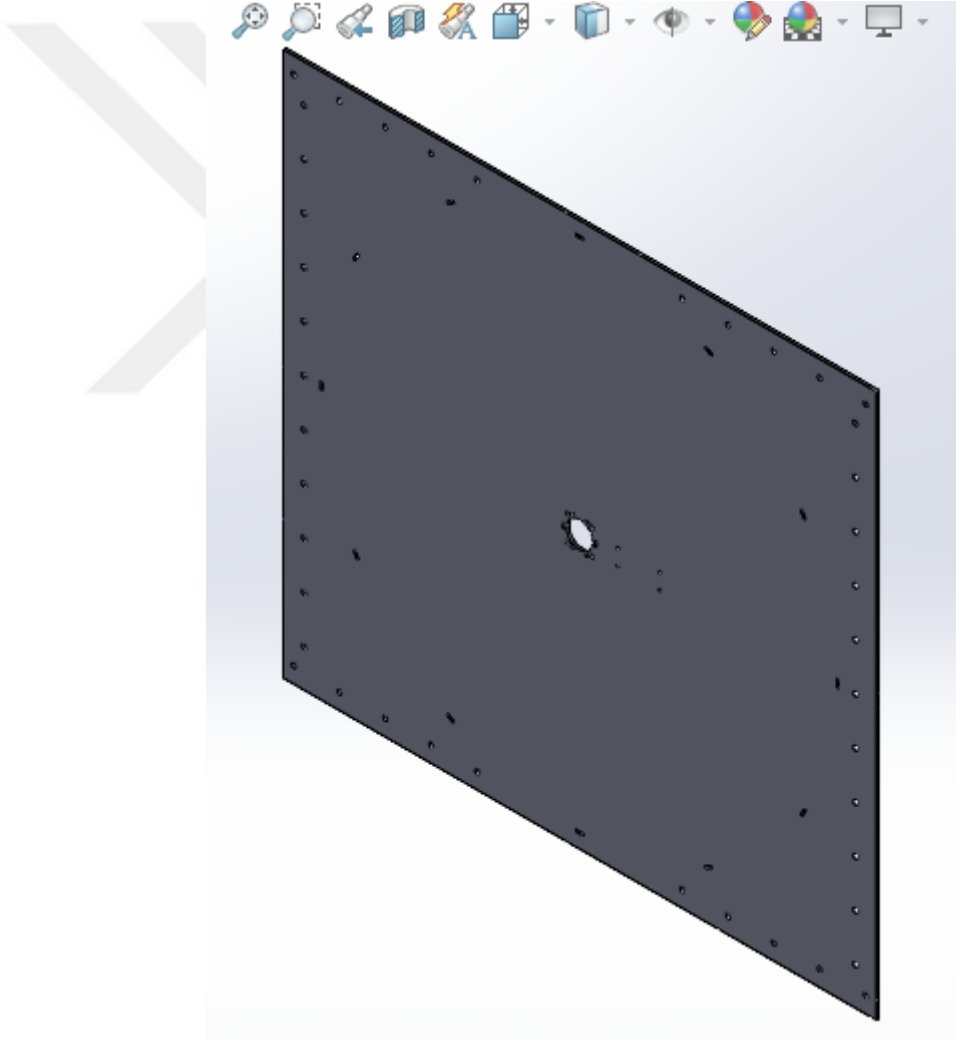
Şekil 3.19 3 metre heliostat çanak ayna yapı montajı



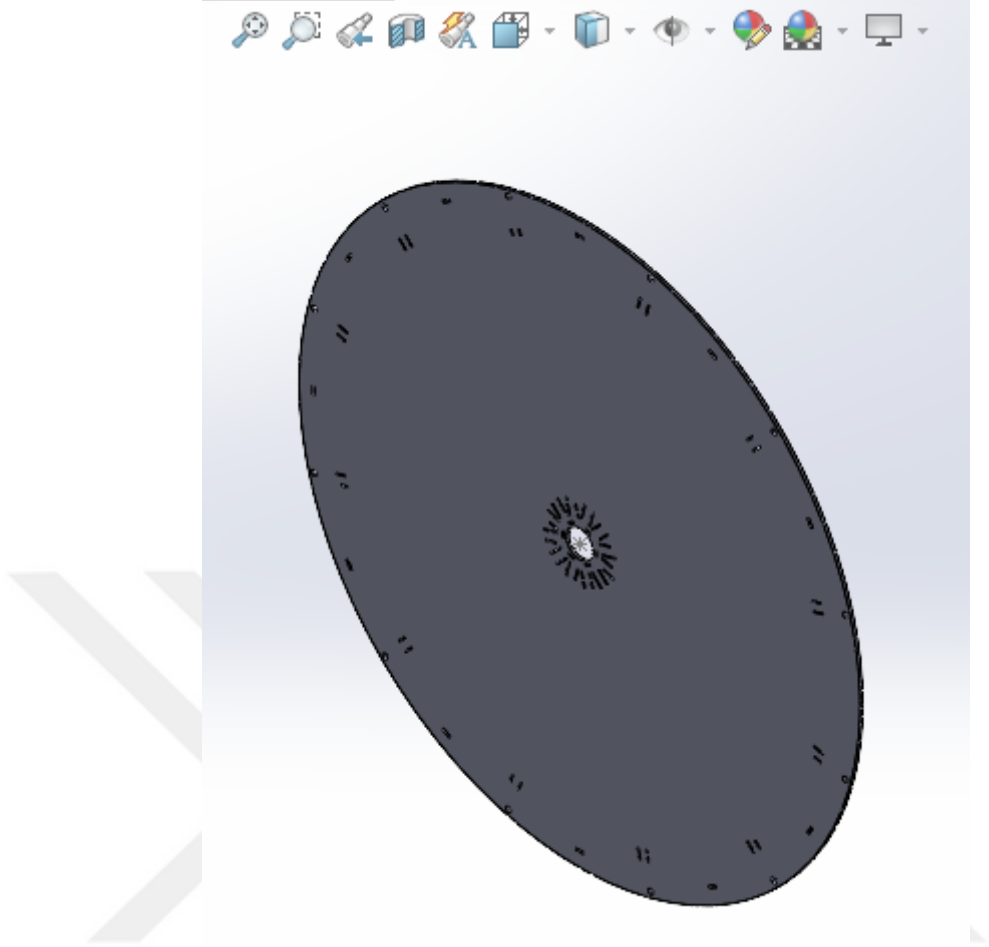
Şekil 3.20 6 metre heliostat çanak ayna yapı montajı

3.3.4.3 Heliostat Ayna Tutucu Ara Çember ve Üst ve Alt Disk Elemanları

Ara disk elemanı ayna tutucu elemanlarının ayna tutucu disk elemanlarına bağlanmasını sağlar. Amacı ayna elemanlarının odaklanmasındaki iç bükeyliği sağlayan ayna tutucu elemanlarının hareketini sağlamaktır. Ara disk elemanı üzerinde ayna tutucu montaj elemanı sayısı kadar kanal bulundurmaktadır. Şekil 3.21-3.23 arasında parça modelleri, Tablo 3.1-3.12 arasında parça özellikleri ve Şekil 3.19 ve 3.20’de çanak yapısı montajı gösterilmiştir.



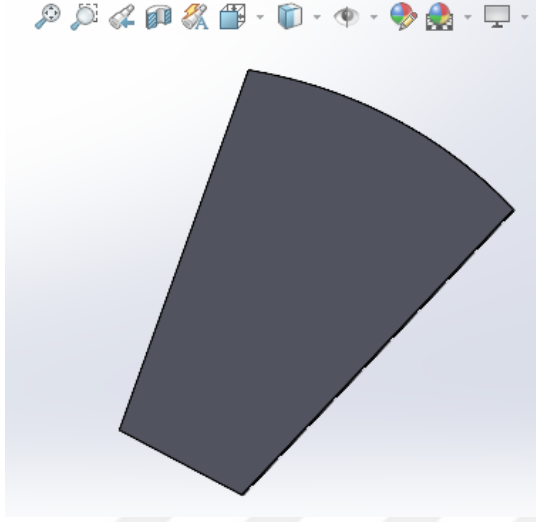
Şekil 3.21 3 metre heliostat ayna tutucu alt dik



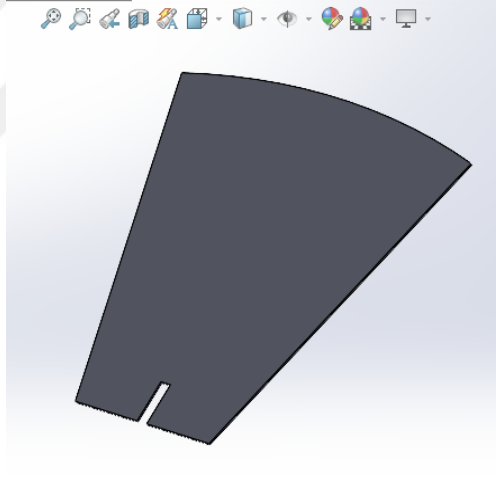
Şekil 3.23 3 metre heliostat ayna tutucu üst disk

3.3.4.4 Ayna

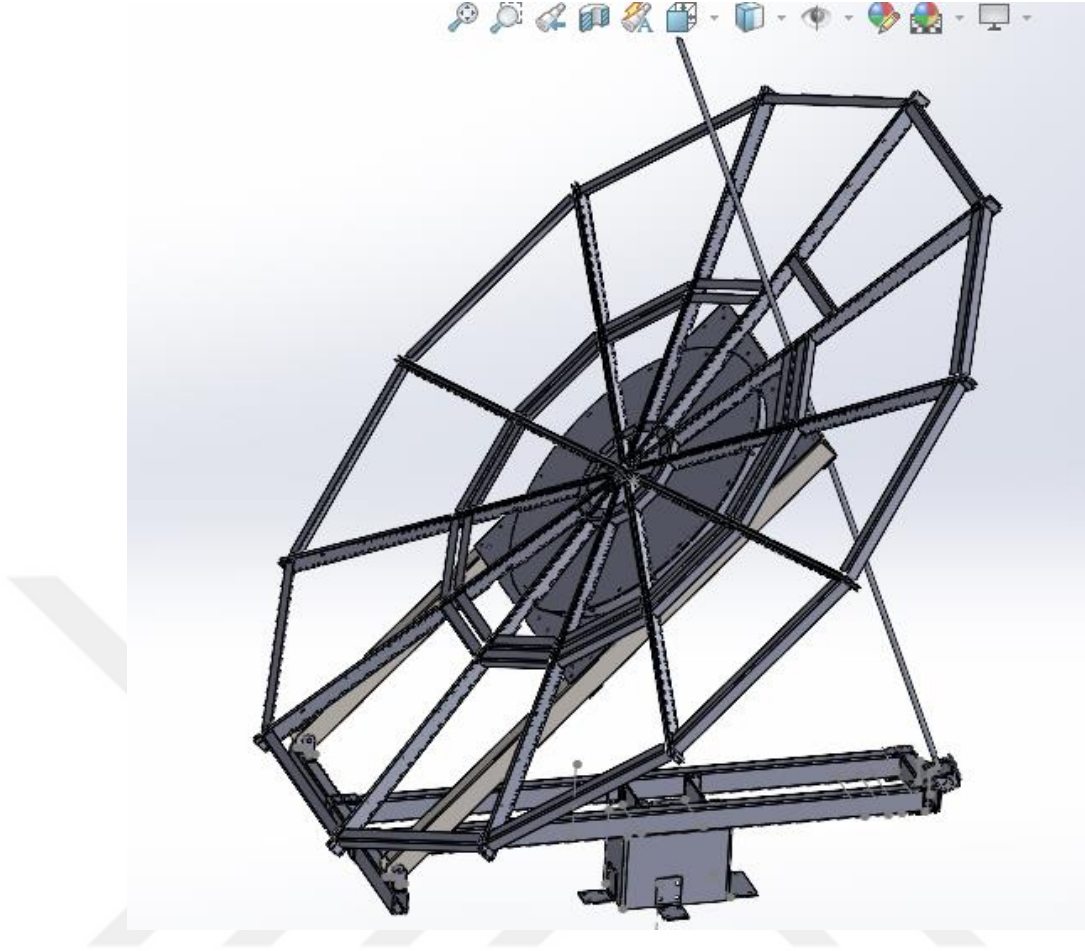
Yansıtma yüzeyi düzlemsel aynalardan oluşmaktadır. Aynalar, Solarux firması ve Şişecam firması ile ortak çalışmalarımız sonucunda rüzgâr yüklerinden ve konstrüksiyon kaynaklı metal genleşmelerden oluşacak kuvvetlere dayanabilecek dört milimetre kalınlığında tasarlanıp üretilmiştir. Aynalar, çanak yapısının modülerliğine uygun olarak iki farklı tipte tasarlanmıştır. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de kullanılan ayna modelleri gösterilmektedir. Heliostatın aynasız gösterimi ise Şekil 3.26’da görülmektedir.



Şekil 3.24 3 metre heliostat ayna



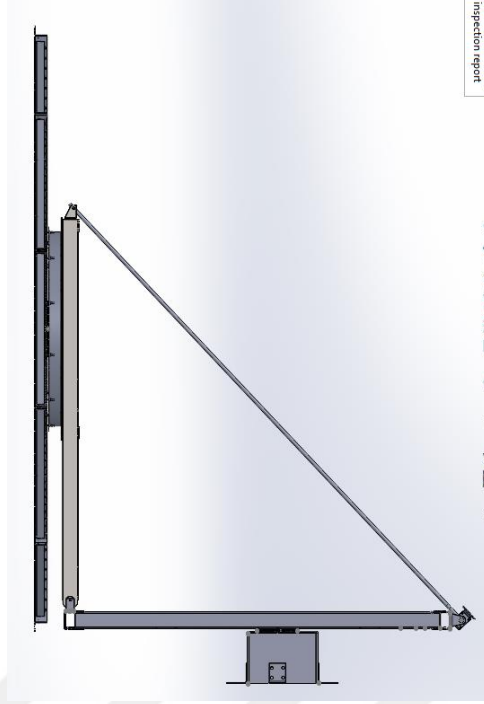
Şekil 3.25 3 metre heliostat kertikli ayna



Şekil 3.26 3 metre heliostat aynasız montajı

3.3.5 6 Metre ve 3 Metre Heliostat Tasarım Resimleri

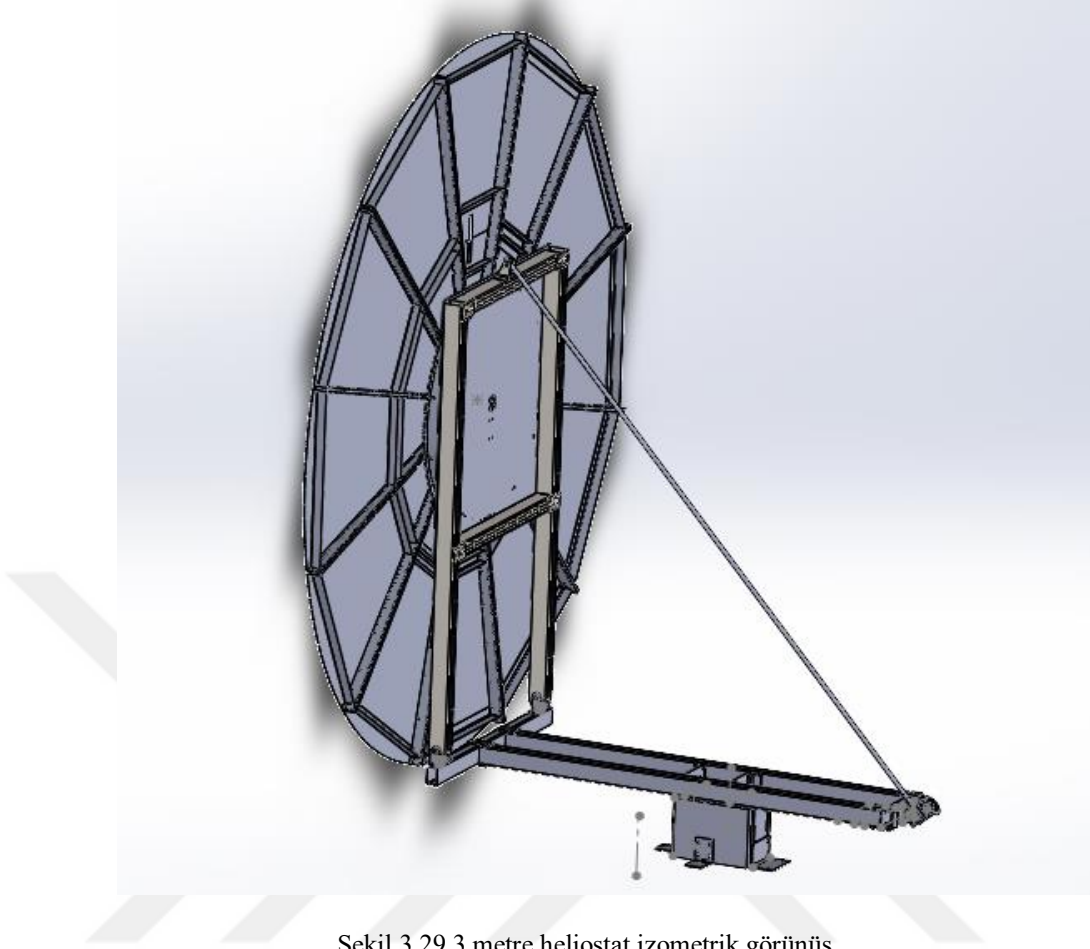
Tasarlanan 6 metre ve 3 metre heliostatların çalışma esnasında sınır konumlarının görüşleri Şekil 3.27-Şekil 3.40 arasında gösterilmiştir. Destek yapıları arasında herhangi bir çakışma olmadığı sonucu elde edilmiştir.



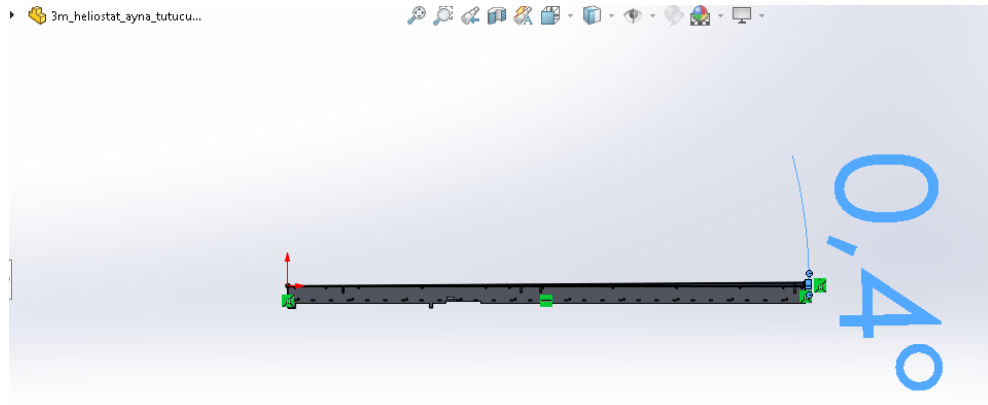
Şekil 3.27 3 metre heliostat 90 derece konumu



Şekil 3.28 3 metre heliostat 45 derece konumu



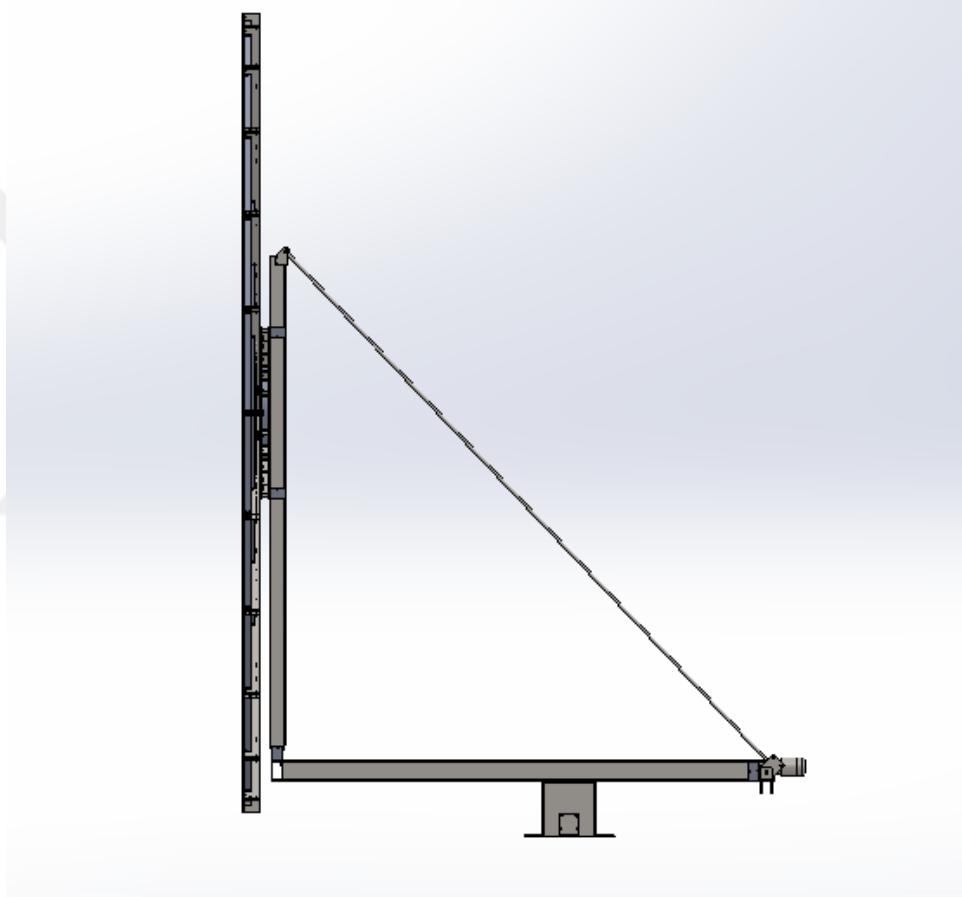
Şekil 3.29 3 metre heliostat izometrik görünüş



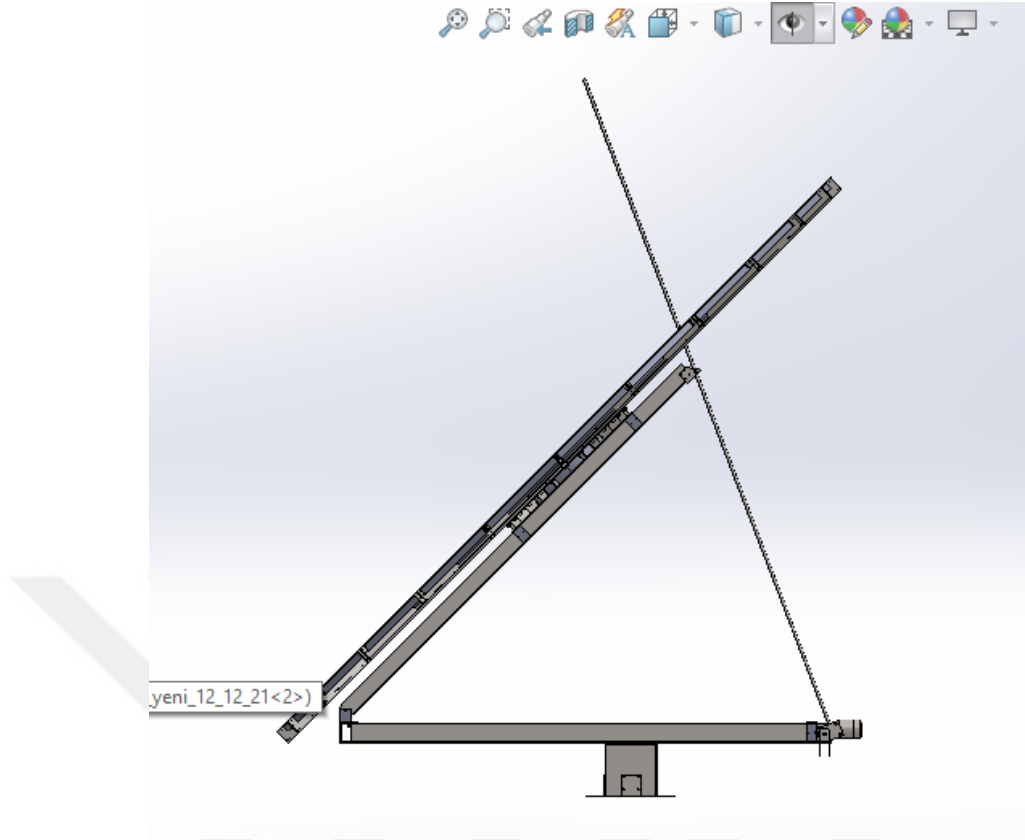
Şekil 3.30 3 metre heliostat ayna tutucu eğim açısı



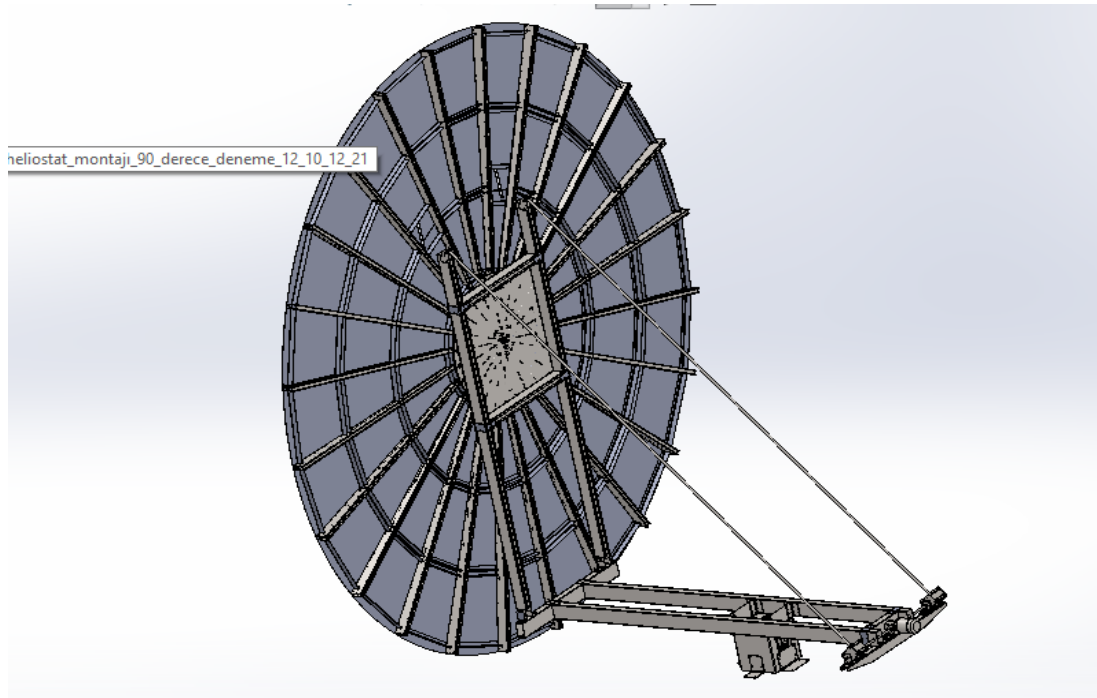
Şekil 3.31 3 metre heliostat ayna grubu montaj açısı gösterimi



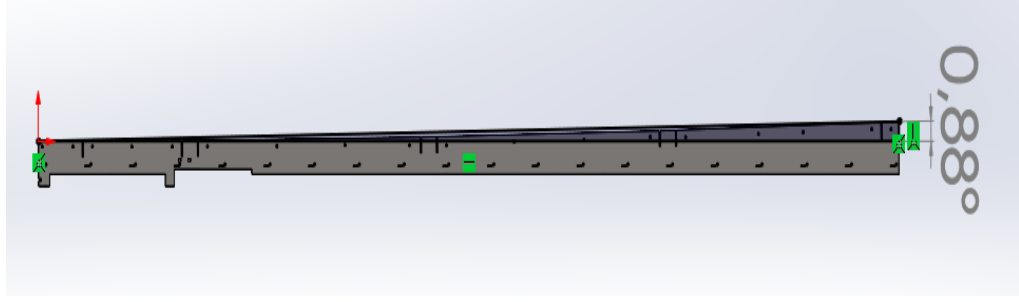
Şekil 3.32 6 metre heliostat 90 derece konumu



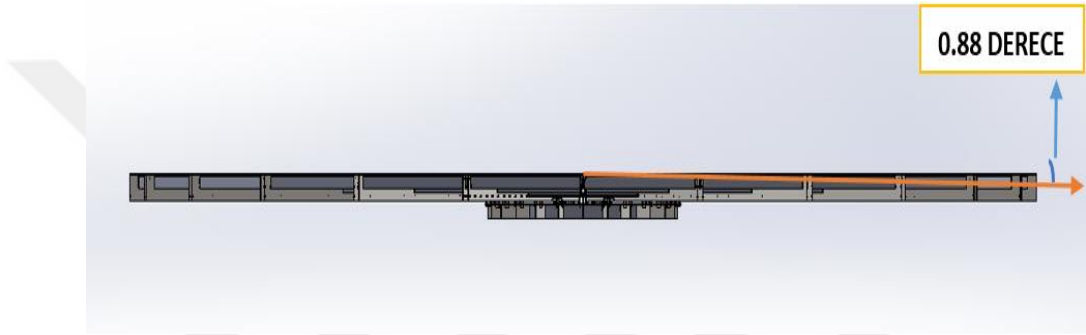
Şekil 3.33 6 metre heliostat 45 derece konumu



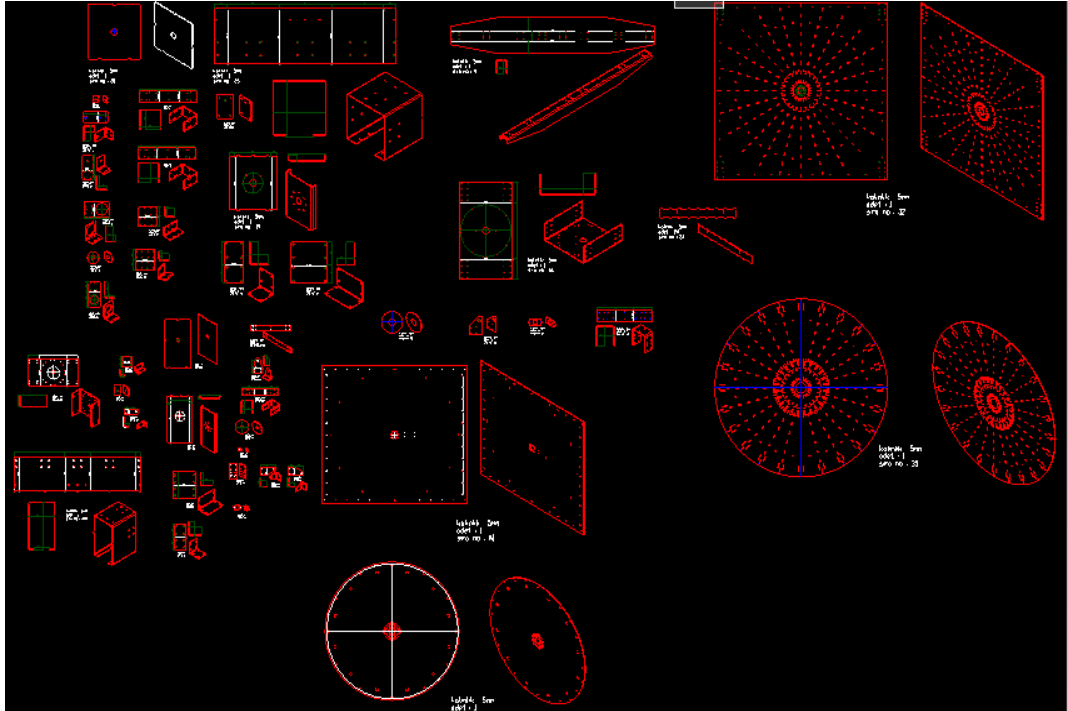
Şekil 3.34 6 metre heliostat izometrik görünüş



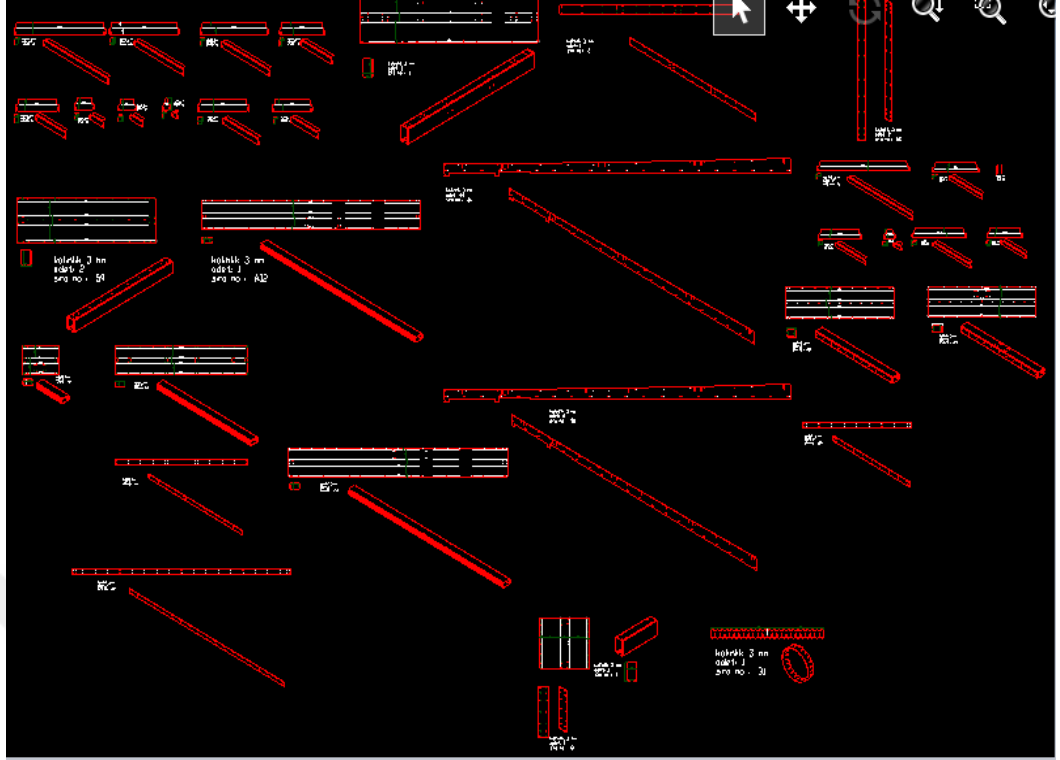
Şekil 3.35 6 metre heliostat ayna tutucu eğim açısı



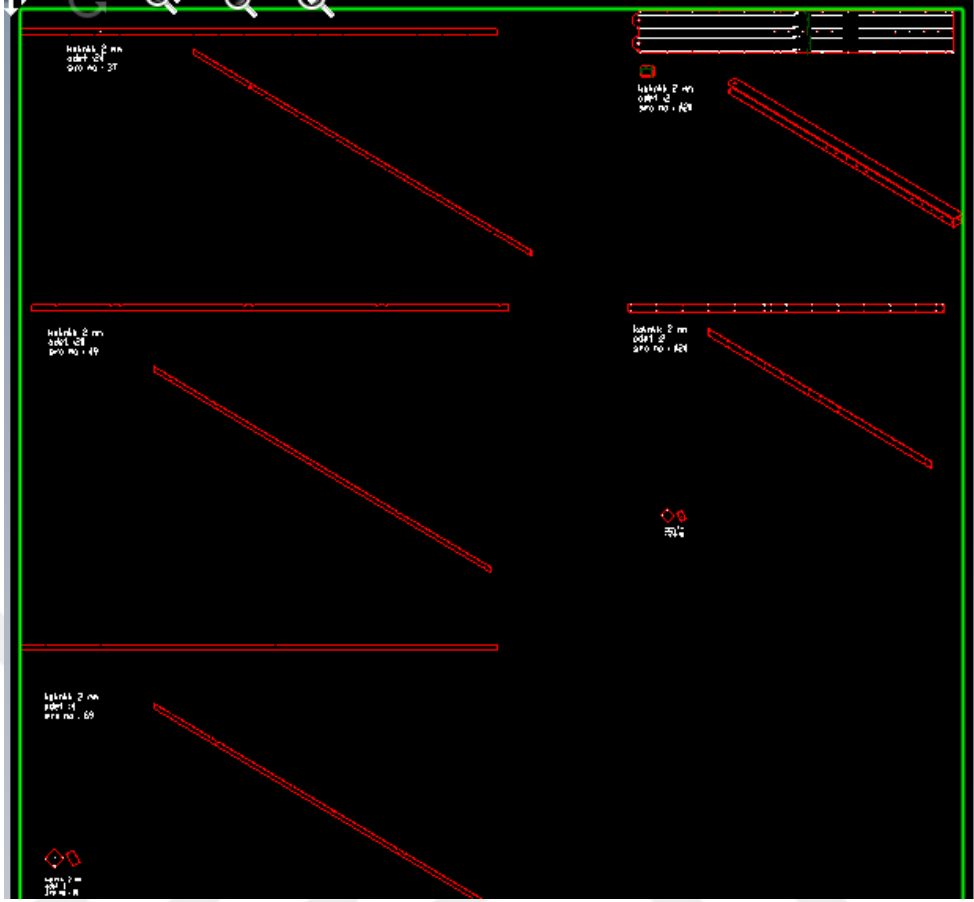
Şekil 3.36 6 metre heliostat ayna grubu montaj açısı gösterimi



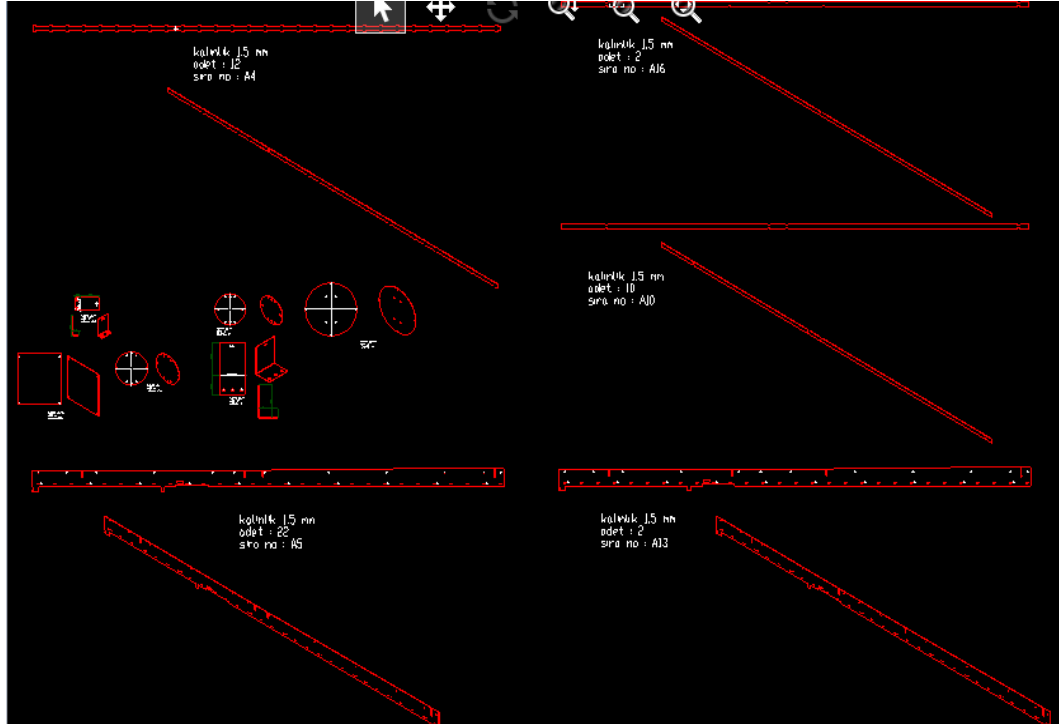
Şekil 3.37 6 metre ve 3 metre heliostat 5 mm sac malzemeler dxf dosyası



Şekil 3.38 6 metre ve 3 metre heliostat 3 mm sac malzemeler dxf dosyası



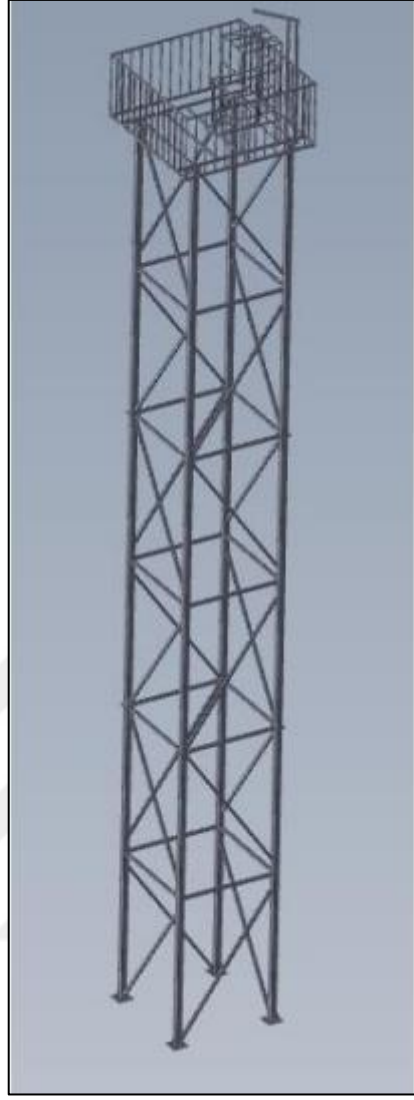
Şekil 3.39 6 metre ve 3 metre heliostat 2 mm sac malzemeler dxf dosyası



Şekil 3.40 6 metre ve 3 metre heliostat 1.5 mm sac malzemeler dxf dosyası

3.4 Kule Tasarımı

Heliostatlardan yansıyan güneş ışığı merkezi alıcılara sahip olan kulede toplanır. Enerji burada absorbe edilerek depolanır. Kule yüksekliği geniş bir alana yayılan birçok heliostat ile bağlantılı çalışma imkanı verir. Kule yüksekliği ne kadar fazla olursa alana kurulacak olan heliostatların birbirini gölgeleme olayı azalmaktadır. Bu da kule maliyetinin artması demektir. Kule yüksekli bu çalışmada mevcut bütçeye göre belirlenmiştir. Yapılan çalışmada Solarux firması tarafından tasarımı gerçekleştirilen kule, 18 metre yüksekliğinde ve 2 metre genişliğindedir. Üst tarafında 2,5 metre x 2,5 metre kare kafes sistemi bulunmaktadır. Kulenin taşıyıcı elemanları 120mm x120 mm St37 çeliğinden kare profillerden oluşmaktadır. Kafes sistemindeki korkuluk profiller ise 40 mm x 20 mm St37 çeliğinden dikdörtgen profillerden oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.41).



Şekil 3.41 Kule tasarımı (Bayram, 2014)

3.5 Analiz

Tasarlanan sistemlerin sınır koşullarına dayanıp dayanmadığı ANSYS programı aracılığı ile analizler yapılarak test edilmelidir. ANSYS programı aracılığı ile yapılan bu analizlerde tasarlanan sistemin üretime girmeden önce hasara uğrayabilecek bölgeler tespit edilebilir. Bu bölgelerde tasarım iyileştirme çalışması yapılarak nihai ürün elde edilir. Tasarladığımız heliostat prototipinde analizler kritik bölgeler olarak belirlenen parça ve montajlara yapılmıştır.

3.5.1 Alt Destek Montajı

Heliostata etki eden rüzgar yükü, sistemin kendi ağırlığı ve milden gelen kuvvet indirgenerek statik ve yorulma analizi yapılmıştır.

3.5.1.1 Rüzgar Kuvveti

Rüzgar kuvveti denklem (3.4) ile hesaplanmaktadır.

$$F_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho * V^2 * A \quad (3.4)$$

Burada;

- Havanın yoğunluğu, ρ (kg/m³)
- Havanın hızı, V (m/s)
- Yüzey alanı, A (m²)

olmaktadır.

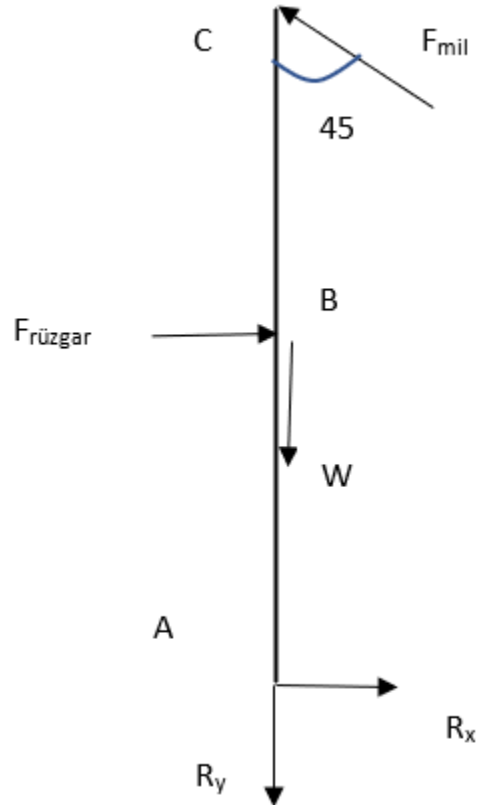
Denklem (3.4) kullanılarak yapılan hesap sonucunda rüzgar kuvveti ($F_{rüzgar}$) bulunur.

$$F_{rüzgar} = \frac{1}{2} * 1,1 * 16^2 * 7,08$$

$$F_{rüzgar} = 1000 \text{ N}$$

3.5.1.2 Mil Kuvveti

Şekil 3.42'deki gibi üst montajın serbest cisim diyagramı çizilerek mile gelen kuvvet bulunabilir.



Şekil 3.42 Üst montaj serbest cisim diyagramı

Şekil 3.42’de gösterilen serbest cisim diyagramında A noktasına göre moment alınır ve denklem (3.5) kullanılarak mil kuvveti bulunur.

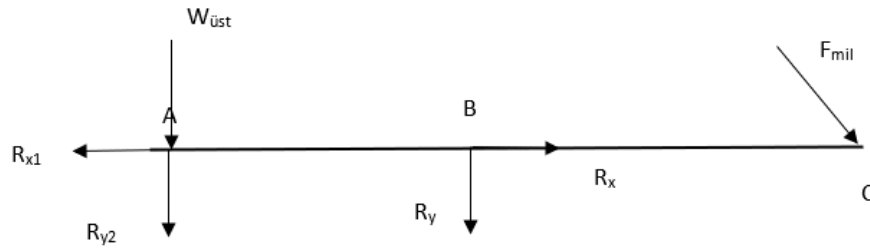
$$F_{rüzgar} * AB = F_{mil} * AC \cdot \sin(a) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) kullanılarak F_{mil} kuvveti hesaplanır.

$$F_{mil} = 1033 \text{ N}$$

3.5.1.3 Alt Montaja Gelen Kuvvetlerin İndirgenmesi ve Analiz Yapılması

Şekil 3.43’deki gibi alt montajın serbest cisim diyagramı çizilir ve bilinmeyen yatak kuvvetleri bulunur.



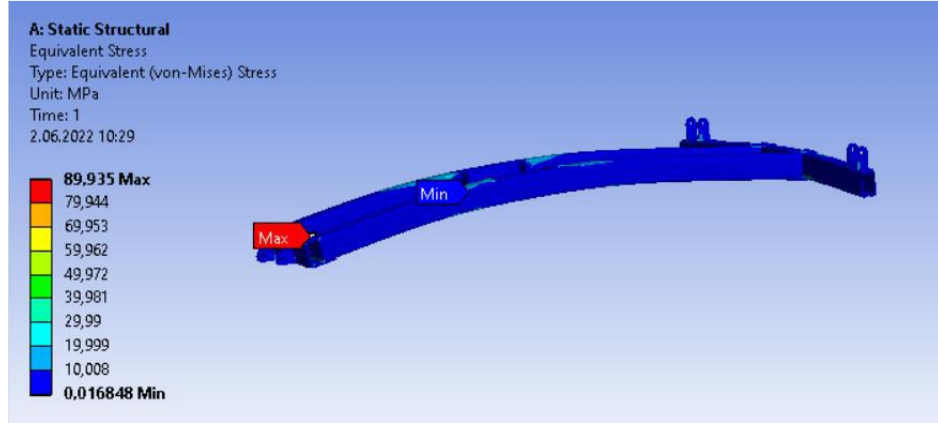
Şekil 3.43 Alt montaj serbest cisim diyagramı

X ve Y yönlerinde kuvvet dengeleri yazılır ve tepki kuvvetleri hesaplanır.

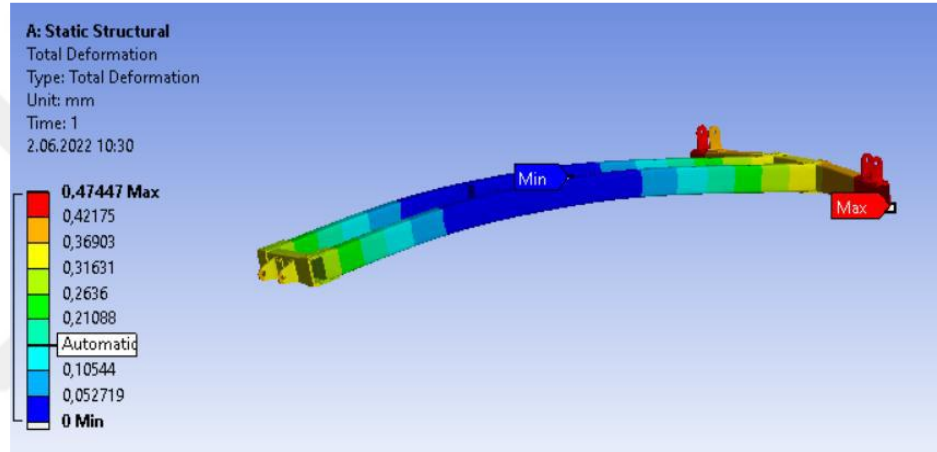
$$R_{x1} = F_{mil} * \cos(45) = 730 \text{ N}$$

$$R_{y1} = F_{mil} * \sin(45) = 730 \text{ N} + W_{üst} = 3130 \text{ N}$$

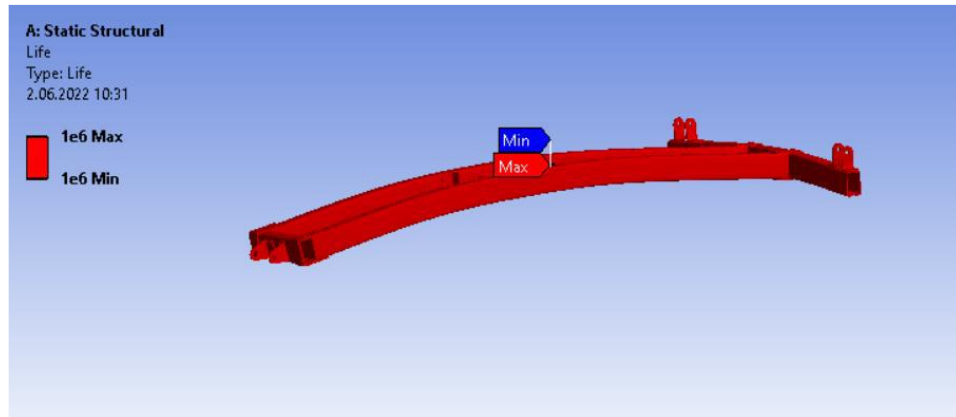
Kuvvetler bulunduğundan sonra ANSYS programında gerekli sınır şartları tanımlanır ve analiz yapılır.



Şekil 3.44 Heliostat alt montaj statik gerilme analizi



Şekil 3.45 Heliostat alt montaj statik deformasyon analizi

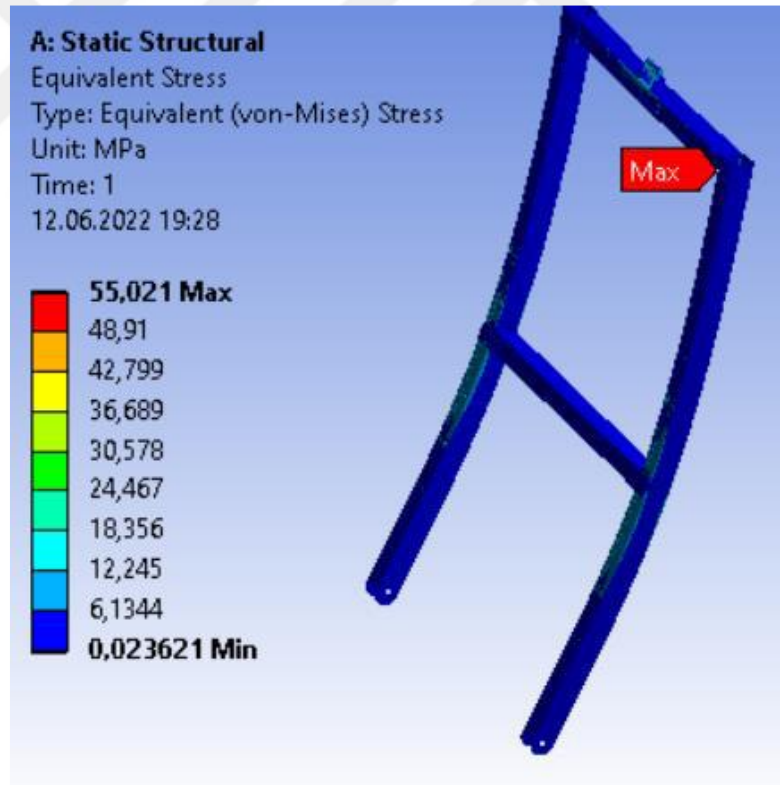


Şekil 3.46 Heliostat alt montaj yorulma analizi

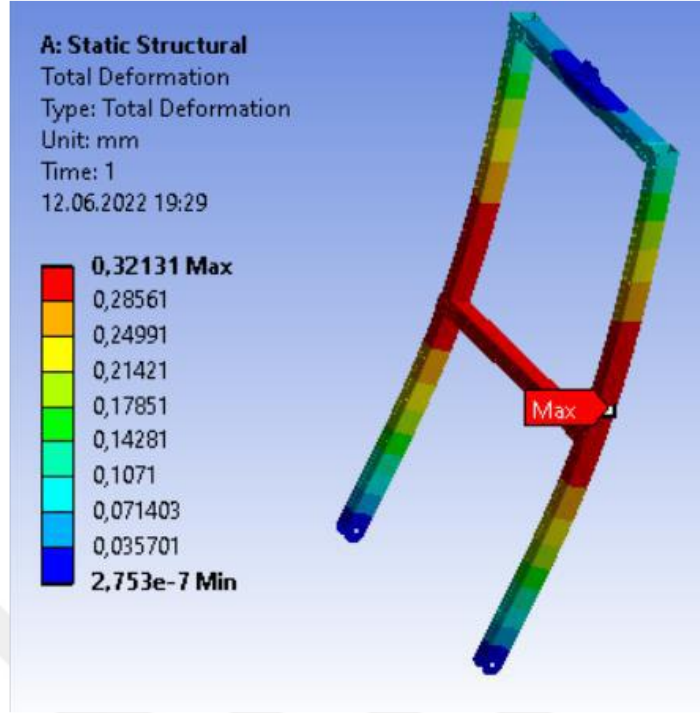
Alt montaja yapılan statik analiz sonuçları Şekil 3.44-Şekil 3.46 arasında verilmiştir. Analiz sonucunda Von Mises gerilmesi 89,935 MPa çıkmış olup, deplasmanı 0,47 milimetredir. Deplasman değerinin düşük gelmesi, sapmalar yönünden bakılırsa heliostata gelen rüzgar kuvvetlerinin sistemin çalışmasını etkilemeyecek olması açısından iyi bir durumdur. Ömür analizi sonucunda ise ömür sonsuz gelmiştir.

3.5.2 Üst Destek Montajı

Şekil 3.38'deki üst montaj serbest cisim diyagramında gösterilen kuvvetler ve sınır şartları ANSYS programına tanımlanarak analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.47 Heliostat üst montaj statik analizi



Şekil 3.48 Heliostat üst montaj deformasyon analizi

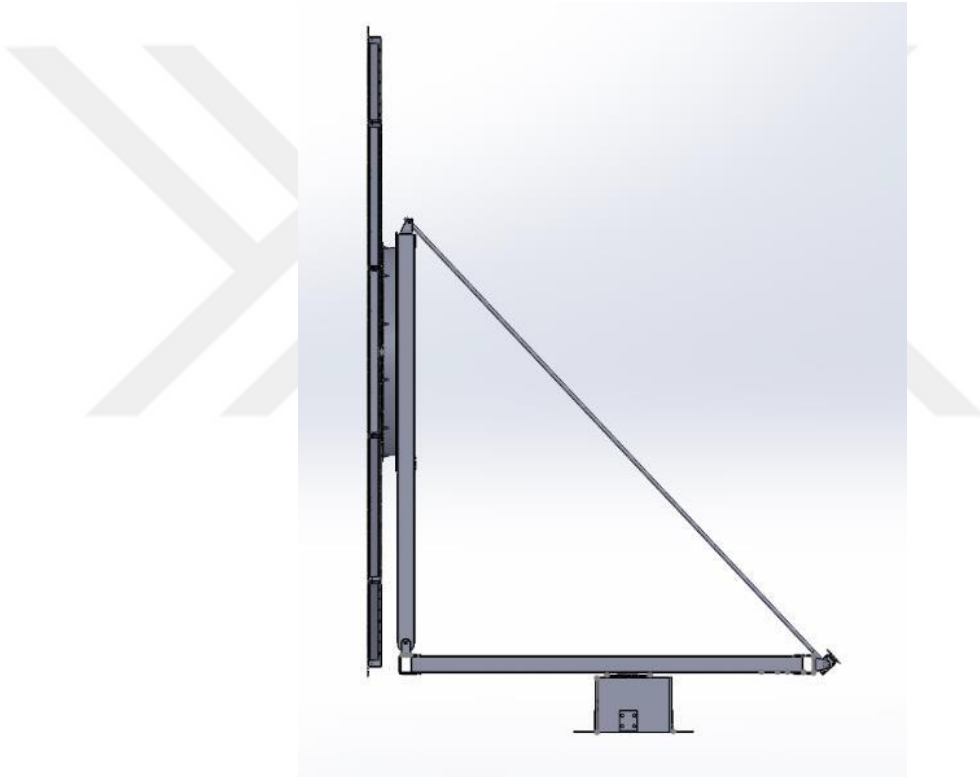
Şekil 3.47’de görüldüğü gibi maksimum gerilme 55,021 MPa gelmiş olup akma gerilmesinin altında kalmaktadır ve Şekil 3.48’de görülen toplam deformasyon odaklanmayı kaçırmayacak kadar küçük çıkmaktadır.

3.5.3 Vidalı Mil Burkulma Analizi

Burkulma probleminin amacı, düz eksen denge konumuna sahip bir kolonun eksenel basınç yükü altında başka bir eğri konumuna sahip olup olmadığını belirlemek ve varsa kolonun bu denge konumuna çeviren P_{kritik} yükünü hesaplamaktır. P_{kritik} denklem (3.6) ile hesaplanmaktadır. Denklem (3.6)’da görüleceği üzere P_{kritik} yükünü belirleyen en önemli değişken kolonun uzunluğu olmaktadır.

$$P_{kritik} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (3.6)$$

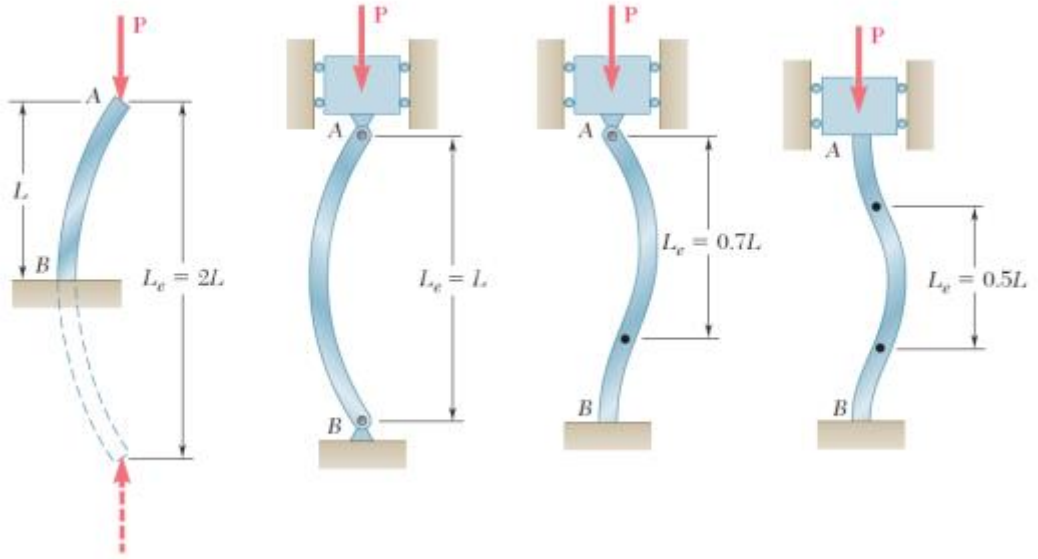
Tasarlanan heliostat sisteminde vidalı milin yük altında çalışan uzunluğu ve vidalı mile etkiyen kuvvet, aynanın yatayla yaptığı açıya göre değişmektedir. Vidalı milin yük altındaki uzunluğunun maksimum olduğu durum aynanın yatay ile 90 derece açı yaptığı konumda meydana gelir. Bu konumda vidalı milin kuvvet altında çalışan uzunluğu 2738 mm'dir ve mile gelen yük 707,11 N dur. Aynanın yatay ile 35 derece yaptığı durumda ise vidalı mile gelen 1917 N'luk maksimum kuvvet taşımaktadır ve bu konumda milin yük altındaki uzunluğu 1095 mm'dir. Milin analiz yapılacağı konumlar Şekil 3.49 ve 3.50 de verilmiştir.



Şekil 3.49 Heliostat aynasının 90 derecedeki konumu



Şekil 3.50 Heliostat aynasının 35 derecedeki konumu



Şekil 3.51 Burkulma sınır şartları (Gültekin, K., 2016)

Vidalı mil her iki ucundan mafsallı olarak bağlanmaktadır. Şekil 3.49’da her iki ucu mafsallı durum için eşdeğer uzunluk (L_e)’in milin yük altında çalışan uzunluğuna eşit olduğu görülmektedir.

Dairesel kesit için vidalı milin atalet momenti denklem (3.7) ile hesaplanmaktadır.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) kullanılarak milin atalet momenti;

$$I = \frac{\pi(17,5)^4}{64} \quad (3.7)$$

$$I = 4603,86 \text{ mm}^4$$

bulunur.

Verilen her iki durum için de P_{kritik} kuvvetleri denklem (3.6) ile hesaplanacak olursa,

Aynanın yatay ile yaptığı 90 derece açı için:

$$P_{kritik} = \frac{\pi^2(210.10^3)(4603,86)}{2738^2} \quad (3.6)$$

$$P_{kritik} = 1272,84 \text{ N}$$

Aynanın yatay ile yaptığı 35 derece açı için:

$$P_{kritik} = \frac{\pi^2(210.10^3)(4603,86)}{1095^2} \quad (3.6)$$

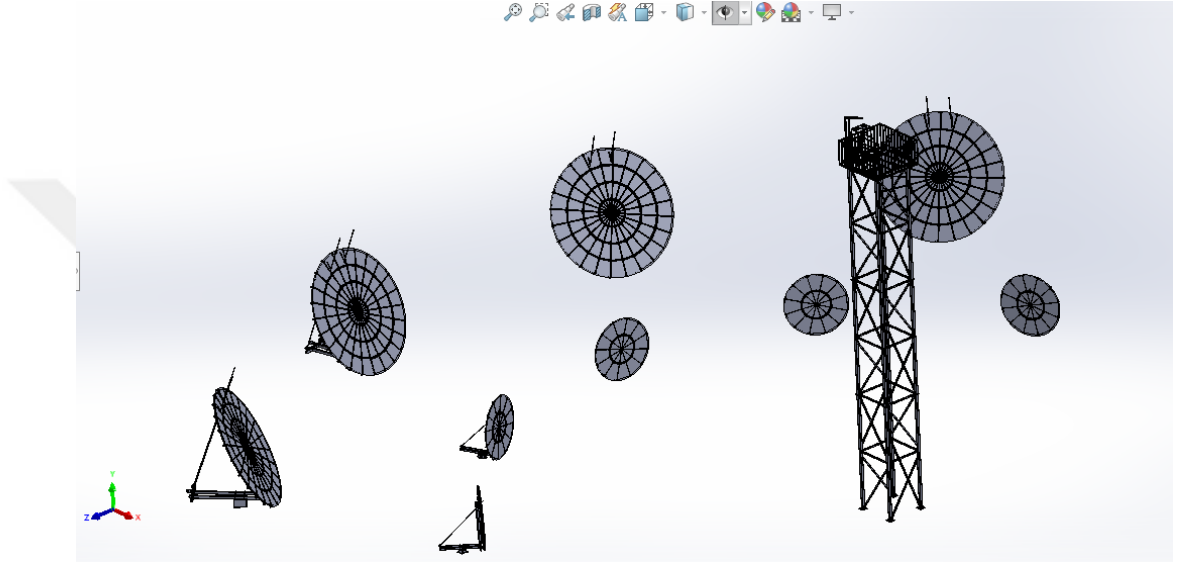
$$P_{kritik} = 7958 \text{ N}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Her iki durumda vidalı mile gelen kuvvetler hesaplanan P_{kritik} yüklerinden küçük olduğu için vidalı mil burkulma açısından emniyetlidir.

3.6 Yerleşim Planı

Modellenen heliostatların kule ile birlikte alana yerleşim planı Şekil 3.52’ de örnek olarak gösterilmiştir. Maliyet açısından 1 adet 3 metre heliostat ve 1 adet 6 metre heliostatın imalatı uygun görülmüştür.



Şekil 3.52 6 metre ve 3 metre heliostatların yerleşim planı

3.7 Maliyet Araştırması

CSP sistemlerinde kullanılan heliostatlarda maliyet hesabı metrekare baz alınarak yapılır. Sponsor firma Solarux ile yapılan ortak çalışmalar sonucunda 6 metre heliostat için aynaların toplam yüzey alanı $56,74 \text{ m}^2$, 3 metre heliostat için aynaların toplam yüzey alanı ise $14,18 \text{ m}^2$ olarak tasarlanmıştır. Toplam yüzey alanı $70,92 \text{ m}^2$ dir. Tasarlanan heliostatların metrekare başına toplam maliyeti 93,34 USD olarak hesaplanmıştır. Maliyet analizi Tablo 3.13’te verilmiştir.

Tablo 3.13 3 metre ve 6 metre heliostat maliyet tablosu

MALZEMELER ve GİDERLER	BİRİM FİYAT(USD)	ADET	TOPLAM FİYAT(USD)
St 37-1500*6000*1.5 sac levha + Lazer kesim 3m+6m	500,00 \$	1	500,00 \$
St 37-1500*6000*2 sac levha+Lazer kesim 3m+6m	750,00 \$	1	750,00 \$
St 37-1500*3000*3 sac levha+Lazer kesim 3m+6m	800,00 \$	1	800,00 \$
St 37-1500*3000*5 sac levha + Lazer kesim 3m+6m	700,00 \$	1	700,00 \$
özel üretim ayna+ Sujeti kesim 3m+6m	1.350,00 \$	1	1.350,00 \$
motor-gamak 0,18kW 3metre dikey aç	80,00 \$	1	80,00 \$
motor-gamak 0,37kW 6 metre dikey aç	120,00 \$	1	120,00 \$
Step motor yatay 2.5 Nm 3 meter yatay aç	75,00 \$	1	75,00 \$
Step motor yatay 4.5 Nm 6 meter yatay aç	125,00 \$	1	125,00 \$
özdemir redüktör-FN 028 3m yatay aç +6 metre yatay aç +3m dikey aç	40,00 \$	3	120,00 \$
özdemir redüktör-FN 063 +6 metre 1 adet yatay aç + 2 adet dikey aç	100,00 \$	3	300,00 \$
özdemir redüktör-FN 050 +6 metre dikey aç	75,00 \$	1	75,00 \$
solarux gravity sensörler 3m dikey aç	50,00 \$	1	50,00 \$
solarux gravity sensörler 6m dikey aç	150,00 \$	1	150,00 \$
solarux encoder 18 bit 3m dikey aç	75,00 \$	1	75,00 \$
solarux encoder 18 bit 6m dikey aç	75,00 \$	1	75,00 \$
bağlantı elemanları	75,00 \$	1	75,00 \$
işçilik ve giderler	1.200,00 \$	1	1.200,00 \$
TOPLAM MALİYET	6.340,00 \$		6.620,00 \$

BÖLÜM DÖRT

SONUÇ

Referans alınan Solarux CSP sistemi üzerinden yola çıkılarak güneş kule sistemleri için büyük öneme sahip heliostatların gelişimi ve yeniliği için tasarlanan iki adet heliostatın CSP sistemlerine destek sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Heliostatların kuleye odaklanması, heliostat yansıtma yüzeyinin iç bükeylik eğrisi sayesinde sağlanır. Heliostatın iç bükeylik eğrisini kuledeki yansıtma yüzeyine uzaklığı belirler ve bu uzaklık heliostatın iç bükey eğrisinin odak uzaklığına eşittir. Muadili sistemlerde heliostatların iç bükeylik eğrisi üretim esnasında verilir veya saha kurulum aşamasında vakumlama yöntemi ile her bir ayna tek tek vakumlanarak iç bükeylik eğrisi verilir. Bu işlemler ise maliyetleri artırırken, uygulamada ise zorluklar yaratmaktadır.

Tasarlanan heliostatların çanak yapısı, düzlemsel ayna parçalarından oluşmaktadır. Heliostat iç bükeylik eğrisi üretim esnasında verilir ve ayna alt tutucularında bulunan ayar vidaları sayesinde heliostatın alandaki konumuna göre, iç bükeylik eğrisi kolay kalibre edilebilir bir sistem olarak tasarlanmıştır. Yapılan bu sistem, kalıplama ve vakum yöntemine göre uygulama kolaylığı sağlamıştır.

Bu yüzden, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi tesislerinde kullanılan heliostatların üretim ve kurulum maliyetlerini de göz önünde bulundurarak Solarux projesi kapsamında geliştirilen düzlemsel aynalar ile oluşturulmuş modüler çanak yapısına sahip heliostatın kullanılması muadili heliostatlara kıyasla daha uygun bir tercih olacağı analiz sonuçları ile de desteklenmiştir.

Bu çalışma TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilen bir proje olduğu için teknik resimleri hazırlanmış olan parçaların imalatı gerçekleştirilmiş olup alanda (Dokuz

Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü) kurulması için bütçenin serbest bırakılması beklenmektedir. Bu nedenle, alanda projenin kurulum aşaması henüz gerçekleştirilememiştir.



KAYNAKLAR

Abido, M.A., Hamanah, W.M, Salem, A. , (2020). Heliostat Dual-Axis Sun Tracking System: A Case Study in KSA. ICREPQ'20.

Andraka, C., Ho, C., Ma, Z., Mehos, M., Kolb, W., Kruizenga, Turchi, C., Vidal, J. ve Wagner, M., A., (2017), Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap, *Technical Report NREL/TP-5500-67464*.

Anonim, (2019). Heliostat.
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Heliostat.jpg/330px-Heliostat.jpg>.

Araújo, A.K.A. ve Medina T., G.I., (2018), Analysis of the effects of climatic conditions, loading level and operating temperature on the heat losses of two-tank thermal storage systems in CSP, *Solar Energy*, 176, 358-369.

Astrain, D., Barberena, J.G., Sánchez, M. ve Zaversky, F., (2013). Transient molten salt two tank thermal storage modeling for CSP performance simulations. *Solar Energy* 93, 294–311.

Bayram, T., (2014). Solarux CSP Tasarım. Solarux Makine Elektrik Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti.

Brent, A.C., Gauche, P., Landman, W.A., Mabaso, M., Rudman, J. ve von Backstrom, T.W. (2017), System value and progress of CSP, *Solar Energy* 152, 106-139.

Bonanos, C., Burisch, M., Caliot, C., Fernandez, J., Ferriere, A., Kirby, P., Montenon, A., Monterreal, R., Papanicolas, C., Sanchez, M., Sansom, C., Tellez, F. Ve Villasente, C., (2017). State of the art in heliostats and definition of specifications. *European Commission*.

Bouaichaoui, S., Debbache, M., Hamidat, A., Karoua, H., Laissaoui, M., Mahfoud, O., Takilalte, A., (2016). Mathematical Model of an Azimuthal- Elevation Tracking System of Small Scale Heliostat. International Science Press.

Cabeza, L.F., (2014). *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Elsevier.

Cabeza, L.F., Dolado, P., Gil, A., Lazaro, A., Martorell, I., Medrano, M. ve Zalba, B. (2010) State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 31-55.

Cabeza, L.F., Gomez-Vidal, Fernandez, A.G., J., Oro, E., Kruizenga, A. ve Sole, A. (2019), Mainstreaming Commercial CSP Systems: A Technology Review, *Renewable Energy* 140, 152-176.

Coventry, J., Gross, F., Liedke, P., Pfahl, A., Röger, M., Vásquez-Arango, J. F., Wolfertstetter, F., ve (2017). Progress in heliostat development. *Solar Energy*, 152, 3-37.

González-Aguilar, J. ve Romero, M., (2014). Solar thermal CSP technology. Wiley Interdisciplinary Reviews: *Energy and Environment*, 3(1), 42-59.

Huibregtse, R., Slack, M., Sonn, A. ve Zavadny, M., (2015). Kule tabanlı CSP yapay ışık kalibrasyon sistemi. *Enerji Prosedürü* 69, 1488-1497.

Fan, Y., Luo, L., Pelay, U., Rood, M. ve Stitou, D. (2017), Thermal Energy storage systems for concentrated solar power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 82-100.

Gauché, P., ve Malan, K. J., (2014). A locally developed 40 m² heliostat array wireless control system. In Proceedings of the Southern African Solar Energy Conference (SASEC'14).

Goswami, D.Y., Kuravi, S., Stefanakos, E.K., Rahman, M.M. ve Trahan, J., (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science* 39, 285–319.

Guerra, J., Iranzo, A., Pino, F.J. ve Suárez, C., (2015). Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to standby heat loss. *Applied Energy* 142, 56–65.

Gültekin, K., (2016). Mukavemet 2 ders notları. 19 Mayıs Üniversitesi. file:///C:/Users/OnurErol/Downloads/12.%20Hafta.pdf

Günther, M., Hoffschmidt, B., Sattler, J. ve Joemann, M., (2015). Thermal Energy Storage. Technical Report, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Herrmann, U., Schulte-Fischedick, J. ve Tamme, R., (2008, August). *CFD analysis of the Cool Down Behaviour of Molten Salt Thermal Storage Systems*, Energy Sustainability, Jacksonville, Florida - USA.

Hiyama, T. ve Syafaruddin (2010), Renewable energy technology, economics and environment. Autumn Semester, Lecture 5-Solar Thermal Power Plants, Time and Venue: Wednesdays: 10:20 – 11:50, Room No: 208.

Kaplan, G.M., (1985) *Understanding Solar Concentrators, Volunteers in Technical Assistance*, Arlington, VA.

National Renewable Energy Laboratory (24 Kasım 2017) , *Concentrating solar power projects with operational plants*.
https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/projects_by_status.cfm?status¼Operational.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (20 Nisan 2017). *CSP Teknolojisi Nedir ? Yoğunlaştırılmış Fotovoltaikler*. <https://www.thesisat.org/csp-teknolojisi-nedir-yogunlastirilmis-fotovoltaikler.html>

EKLER

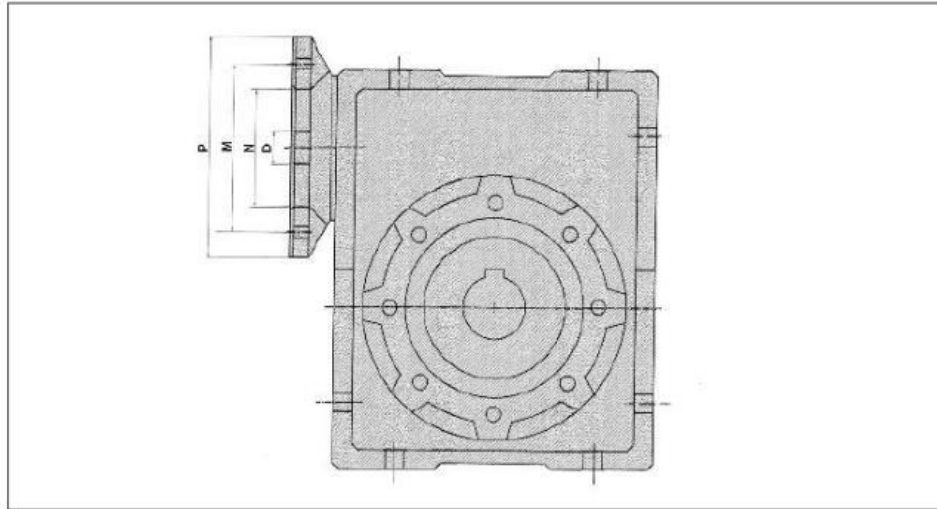
EK 1: Motor Kataloğu

ALÜMİNYUM GÖVDE

4 kutuplu (1500 d/dak)

Anma Gücü	Tip	Anma Gücünde							Kalkışta				Devrilme Moment Oranı	Eylemsizlik Momenti	Yaklaşık Ağırlık
		Hız	Akım	Moment	Güç Katsayısı Cos φ	Verim η			Akım Oranı		Moment Oranı				
		d/dak	A	Nm		4/4	3/4	1/2	Doğrudan	Y/Δ	Doğrudan	Y/Δ			
0,06	AGM 56 M 4a	1370	0,26	0,4	0,61	56,9	56,8	52,2	3	-	2,4	-	2,6	0,00011	2,6
0,09	AGM 56 M 4b	1375	0,4	0,6	0,58	62,5	62,3	55,1	3,1	-	2,2	-	2,4	0,00012	2,8
0,12	AGM 63 M 4a	1365	0,45	0,8	0,74	57,1	57,1	53,3	3,1	-	2	-	2,2	0,00017	3,4
0,18	AGM 63 M 4b	1340	0,6	1,3	0,73	59,7	59,7	55,8	2,9	-	2	-	2	0,00021	3,9
0,25	C.AGM 63 M 4c	1350	0,95	1,8	0,63	60,7	60,7	56,8	3	-	2	-	2	0,00026	4,5
0,25	AGM 71 M 4a	1380	0,8	1,7	0,72	61,9	61,8	58,2	2,9	-	1,8	-	2,2	0,0004	4,9
0,37	AGM 71 M 4b	1390	1,15	2,5	0,68	68,1	68,1	67,1	3,7	-	2,2	-	2,5	0,00054	5,8
0,55	C.AGM 71 M 4c	1385	1,6	3,8	0,75	68,6	68,6	67,6	3,4	-	1,9	-	2,1	0,00062	6,4
0,55	AGM 80 M 4a	1365	1,6	3,8	0,72	69,1	69	65,2	3,5	-	1,9	-	2	0,00083	7,5

EK 2: Redüktör Kataloğu



Tip Type	Flanş Ölçüleri Flange Dimensions				Çevrim Oranı (1) Ratio											
					7,5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	
	MOTOR	N	M	P	D											
ÖRSF 028	63 B14	60	75	90	11	11	11	11	11	11	11	11	-	-	-	
	56 B14	50	65	80	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	-	
ÖRSF 040	71 B14	70	85	105	14	14	14	14	14	14	14	14	-	-	-	
	63 B14	60	75	90	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
ÖRSF 050	80 B14	80	100	120	19	19	19	19	19	19	-	-	-	-	-	
	71 B14	70	85	105	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	-	
ÖRSF 063	90 B14	95	115	140	24	24	24	24	24	24	-	-	-	-	-	
	80 B14	80	100	120	19	19	19	19	19	19	19	19	19	-	-	
	71 B14	70	85	105	-	-	-	-	-	-	14	14	14	14	14	

EK 3: Motor Tork Hesabı (MATLAB Kodu)

```
1 -   clc;clear;
2 -   th=1; % Çalışma açısı
3 -   f=0.05; % Sürtünme kuvveti
4 -   D=17.5; % Mil çapı
5 -   p=10; % Hatve
6 -   S=1.2; % Güvenlik katsayısı
7 -   Fr=1000; % Rüzgar Kuvveti (N)
8 -   W=240*9.81; % Ağırlık kuvveti (N)
9 -   AB=1330; % Uzunluk (mm)
10 -  AC=1820; % Uzunluk (mm)
11 -  Fmil=(W*cosd(th)*AB +AB*Fr*sind(th) )...
12 -      /(AC*sind(acosd(0.707*(1-cosd(th))....
13 -      /sqrt(1-cosd(th) )))); % Mile etkiyen kuvvet (N)
14 -
15 -  Cmotor=(S*Fmil*D*((f*pi*D)/(pi*D-f*p))/2); % Motor torku (Nmm)
16 -
17 -  |
18 -
```